



# **Caracterización de mortero mediante transmisión y retrodispersión de rayos gamma**

**Rafael Hurtado Carrillo**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ciencias, Departamento de Física  
Bogotá D.C., Colombia  
2020



# **Caracterización de mortero mediante transmisión y retrodispersión de rayos gamma**

**Rafael Hurtado Carrillo**

Tesis o trabajo de grado presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:  
**Físico**

Director:  
Ph. D Fernando Cristancho Mejía

Línea de Investigación:  
Física Nuclear  
Grupo de Investigación:  
Grupo de Física Nuclear de la Universidad Nacional de Colombia

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ciencias, Departamento de Física  
Bogotá D.C., Colombia  
2020



**Para mis padres**



## **Agradecimientos**

A mi director, Fernando Cristancho por liderar la idea principal de esta investigación, además de permitirme hacer parte del grupo de Física Nuclear, en el cuál he aprendido a mejorar como estudiante y profesional, a todos los miembros del grupo de investigación, quienes en algún momento me han brindado su ayuda, en especial a Freddy Torres, quién diseñó y construyó los montajes experimentales que utilicé, a mis padres, por su amor y apoyo incondicional que ha sido constante todos estos años de estudio pese a la distancia, y finalmente a Andrea Domínguez quien con cariño y desinterés me ayudó y acompañó en este proceso.



## Resumen

El mortero hidráulico es uno de los materiales más usados en el área de la construcción, por lo que conocer sus propiedades representa un especial interés. Técnicas como la transmisión y retrodispersión de radiación gamma, permiten caracterizar propiedades de los materiales tales como su densidad o grosor. Esto ha motivado el presente trabajo a explorar un método de análisis estructural, para identificar la integridad del material cuando es posible acceder a él desde sólo un lado. El método hace uso de las dos técnicas previamente mencionadas. Con la primera, transmisión, se determinan experimentalmente los coeficientes de atenuación lineal del material en función de la energía, y con el segundo, retrodispersión, se estudia la intensidad dispersada por el material a ángulos mayores a  $90^\circ$ , en especial entre  $112^\circ$  y  $160^\circ$ . El mortero que será objeto de estudio es construido según lo describen las normas NTC 220 de ICONTEC, su preparación es descrita paso a paso para lograr una alta fiabilidad.

**Palabras clave:** Mortero, Rayos gamma, Fuente radiactiva, Coeficiente de atenuación lineal, Transmisión, Retrodispersión, Fotopico.

## Abstract

Hydraulic mortar is one of the most used materials in the construction industry, hence the special interest in the knowing of its properties. Gamma ray transmission and backscattering techniques, allow to characterize the properties of materials, like its density or thickness. This has encouraged the present work towards a structural analysis method exploration, to identify the integrity of the material if only one side of it can be accessed. The mentioned method uses two techniques previously explained. With the first one, transmission, the linear attenuation coefficients are experimentally determined as function of the energy. With the second technique, backscattering, the intensity dispersed by the material at angles greater than  $90^\circ$  is studied, specially between  $112^\circ$  and  $160^\circ$ . The mortar that will be studied is built along the NTC 220 norms by ICONTEC, its preparation is described step by step in order to reach a high reliability.

**Keywords:** Mortar, Gamma rays, Radioactive source, Linear attenuation coefficient, Transmission, Backscattering, Photopeak.

# Contenido

<b>Agradecimientos</b>	<b>VII</b>
<b>Resumen</b>	<b>IX</b>
<b>1 Marco Teórico</b>	<b>1</b>
1.1 Emisión Gamma. . . . .	1
1.2 Interacción: Radiación gamma - materia . . . . .	2
1.2.1 Absorción fotoeléctrica . . . . .	2
1.2.2 Dispersión Compton . . . . .	3
1.2.3 Producción de pares . . . . .	4
1.3 Coeficiente de atenuación lineal: $\mu$ . . . . .	5
1.4 Transmisión . . . . .	6
1.5 Retrodispersión . . . . .	7
1.6 Metodología . . . . .	9
<b>2 Preparación y caracterización de muestras</b>	<b>10</b>
2.1 Composición de las muestras . . . . .	10
2.2 Elaboración de las muestras . . . . .	11
2.3 Caracterización de las muestras . . . . .	12
<b>3 Análisis experimental</b>	<b>15</b>
3.1 Transmisión de rayos gamma en morteros . . . . .	15
3.1.1 Montaje Experimental . . . . .	15
3.1.2 Resultados . . . . .	16
3.1.3 Análisis . . . . .	18
3.2 Retrodispersión de rayos gamma en morteros . . . . .	22
3.2.1 Montaje Experimental . . . . .	22
3.2.2 Resultados . . . . .	23
3.2.3 Análisis . . . . .	24
3.3 Análisis de la integridad estructural de la muestra . . . . .	27
3.3.1 Montaje Experimental . . . . .	27
3.3.2 Resultados y análisis . . . . .	28

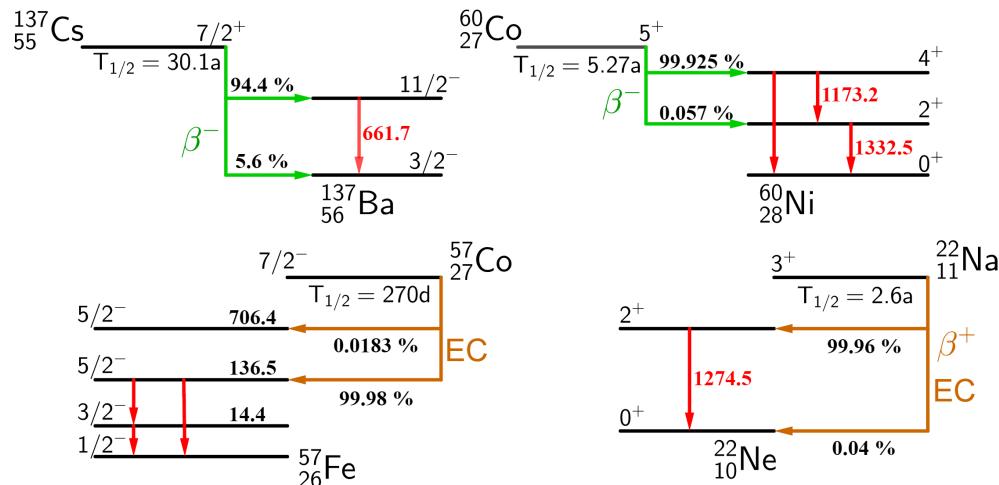
<b>4 Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>32</b>
4.1 Conclusiones . . . . .	32
4.2 Recomendaciones . . . . .	33



# 1 Marco Teórico

## 1.1. Emisión Gamma.

Los núcleos atómicos pueden sufrir una variedad de procesos que resultan en la emisión de radiación de algún tipo. Estos procesos principalmente se dividen en dos categorías: transformaciones radiactivas y reacciones nucleares [1]. En una transformación radiactiva, denominada también decaimiento radiactivo, sucede una liberación espontánea de energía dentro del núcleo de un átomo, debido a un cambio en la masa del nucleido, lo que deriva en la emisión de partículas o de radiación electromagnética.



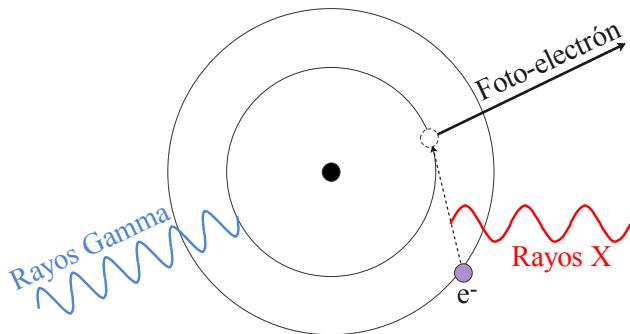
**Figura 1-1:** Esquemas de niveles nucleares de algunas fuentes gamma comunes.  
Las energías están dadas en kiloelectronvoltios

Cada tipo de radiación es caracterizada por un espectro de energía, el cual es indicativo del proceso nuclear subyacente. La radiación gamma, estrictamente, no es un proceso de decaimiento, sino una des-excitación del núcleo que, al estar caracterizado por niveles discretos de energía, permite la emisión gamma a energías únicamente resultantes de las transiciones entre los estados excitados del núcleo. Frecuentemente, la emisión gamma aparece como un sub-producto del decaimiento alfa o beta. Los esquemas de niveles, que ilustran la estructura energética específica de algunas fuentes típicas de rayos gamma, se muestran en la Figura 1-1.

## 1.2. Interacción: Radiación gamma - materia

La detección de rayos gamma depende de sus procesos de interacción con la materia. Para partículas no cargadas, como los fotones, los procesos más comunes son las colisiones inelásticas con electrones atómicos, que resultan en la transferencia de energía de rayos gamma a los electrones dentro del material detector. Los procesos de interacción principales de la radiación con la materia son: las interacciones fotoeléctricas dominantes a bajas energías, la producción de pares a altas energías y la dispersión Compton, siendo esta última más importante en el rango de medianas energías [2].

### 1.2.1. Absorción fotoeléctrica

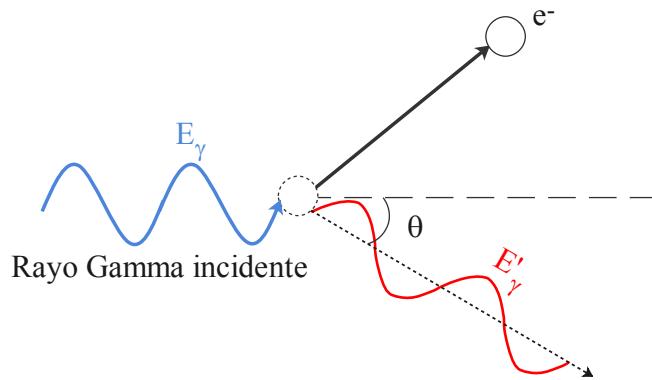


**Figura 1-2:** Efecto Compton.

En el efecto fotoeléctrico se tiene un proceso de colisión inelástica entre dos partículas, un fotón incidente y un electrón ligado a un átomo del material. El fotón cede toda su energía  $E_\gamma$  al electrón, y éste es eyectado del átomo con una energía cinética  $E_e = E_\gamma - E_0$ , con  $E_0$  siendo la energía que mantiene ligado el electrón al material [3].

Al quedar el átomo en un estado excitado, con un exceso de energía  $E_0$ , recupera el equilibrio de dos maneras posibles: mediante una **emisión en cascada Auger**, a través de la cual los electrones restantes del átomo pueden también ser emitidos; o mediante **fluorescencia de rayos X**, a través de la cual el hueco dejado por el foto-electrón es ocupado por un electrón de una capa superior, emitiendo rayos X característicos al hacer esta transición [2].

### 1.2.2. Dispersión Compton



**Figura 1-3:** Efecto Compton.

El efecto Compton tiene lugar cuando una colisión entre un fotón (con energía  $E_\gamma$ ) y un electrón libre, que está inicialmente en reposo, resulta en el cambio de energía y trayectoria del fotón incidente. Cumpliendo con el principio de conservación de la energía y el momentum, la energía  $E'_\gamma$  del fotón dispersado está dada por:

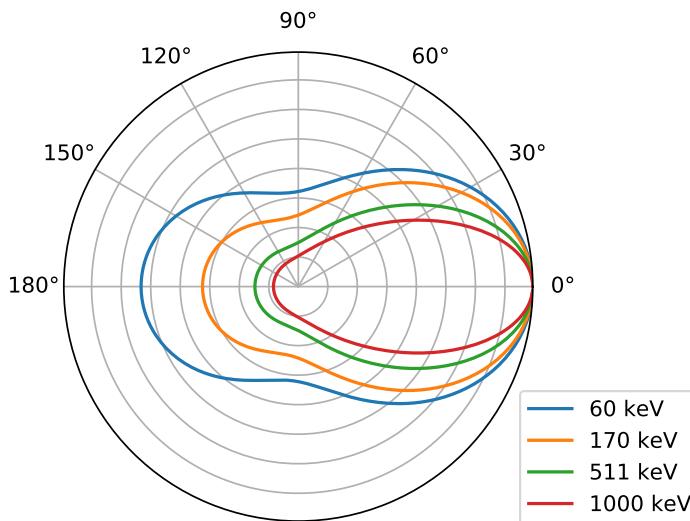
$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \epsilon(1 - \cos\theta)}. \quad (1-1)$$

Donde  $\theta$  es el ángulo de desviación del fotón respecto a su trayectoria inicial y  $\epsilon = E_\gamma/m_e c^2$  es la energía del fotón incidente en unidades de la masa del electrón.

En el caso más complejo de un haz de fotones, la fórmula de Klein-Nishina,

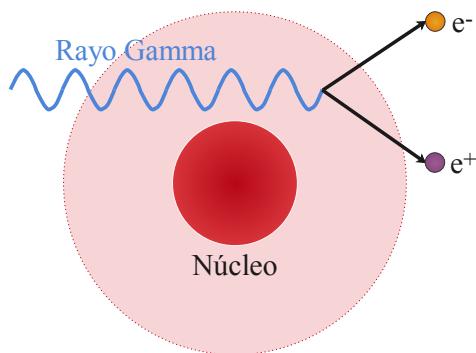
$$\frac{d\sigma_c}{d\Omega}(\theta, \epsilon) = \frac{r_e^2}{2} \frac{1}{[1 + \epsilon(1 - \cos\theta)]^2} \left[ 1 + \cos^2\theta + \frac{\epsilon^2(1 - \cos\theta)^2}{1 + \epsilon(1 - \cos\theta)} \right] \quad (1-2)$$

describe la distribución angular, en términos de la sección eficaz diferencial, de fotones dispersados por un único electrón libre que, a bajas energías, lleva a la dispersión Thomson, mientras que a altas energías (altas frecuencias) lleva a la **dispersión Compton**. Con  $\sigma_c$ , la sección eficaz total del efecto Compton y  $r_e$ , el radio clásico del electrón.



**Figura 1-4:** Gráfica polar de la fórmula de Klein-Nishina (1-2) en función del ángulo, para distintas energías incidentes.

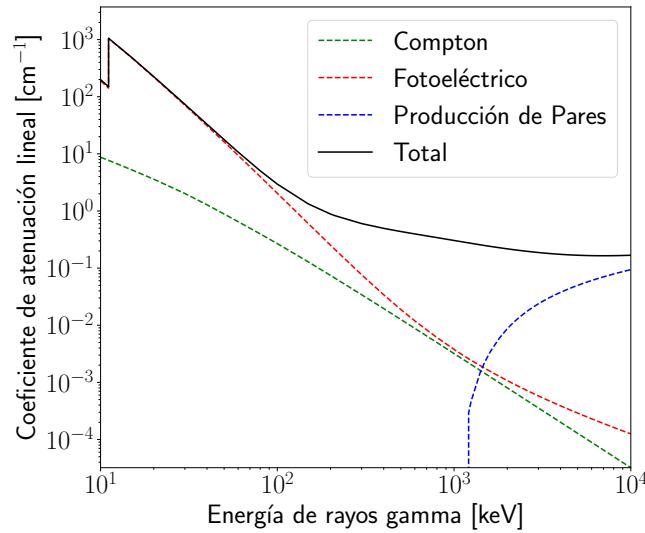
### 1.2.3. Producción de pares



**Figura 1-5:** Creación de pares [4]

A diferencia de las anteriores interacciones radiación-materia, la producción de pares resulta de la interacción de un rayo gamma con el átomo completo. El proceso se lleva a cabo dentro del campo de Coulomb del núcleo, donde el rayo gamma se desvanece convirtiéndose en una pareja electrón-positrón. Para que ello ocurra es necesario que el rayo gamma tenga una energía mínima de 1022 keV, energía equivalente a la suma de las masas en reposo de las partículas producidas, de 511 keV cada una.

### 1.3. Coeficiente de atenuación lineal: $\mu$



**Figura 1-6:** Coeficiente de atenuación lineal y sus componentes para el germanio.

La atenuación de un haz de rayos gamma se da por la pérdida de intensidad provocada al interactuar cierta fracción de fotones con los átomos del material que atraviesa. El **coeficiente de atenuación** es una medida de esta reducción de intensidad, en una energía particular, causada por un material absorbente determinado. Por tanto, este coeficiente es proporcional a la probabilidad de interacción por unidad de recorrido para cada proceso de interacción radiación-materia (fotoeléctrico, Compton, producción de pares), siendo el coeficiente de atenuación total, la suma de todos estos, como lo ilustra la Figura 1-6.

A partir de la descripción previa, el coeficiente de atenuación lineal  $\mu$  para una muestra mono-elemental, puede ser matemáticamente descrito como:

$$\begin{aligned} \mu &= \sigma n, \\ \mu &= \sigma \frac{N_A \rho}{w}, \\ \text{con : } \sigma &= \sigma_f + \sigma_C + \sigma_p. \end{aligned} \tag{1-3}$$

Siendo  $n$  centros dispersores por unidad de volumen,  $\rho$  densidad de la muestra,  $w$  su peso atómico y  $\sigma$  la sección eficaz total por centro dispersor, resultante de la suma de secciones eficaces para la absorción foto-eléctrica  $\sigma_f$ , la dispersión Compton  $\sigma_C$  y la producción de pares  $\sigma_p$  [4].

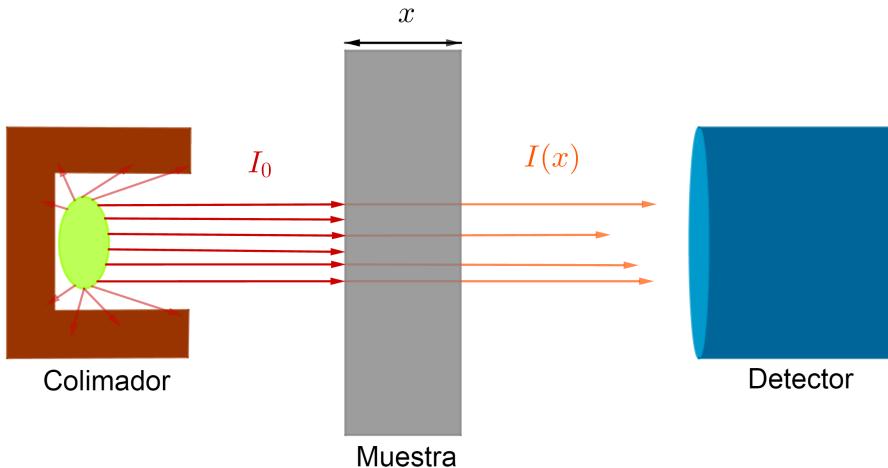
El coeficiente  $\mu$  al depender de  $\rho$ , para una muestra compuesta del mismo elemento, varía según el estado físico de la misma (sólido, líquido, gaseoso), por lo que es útil introducir una

cantidad que dependa exclusivamente de la composición de la muestra, esta es, el coeficiente másico,  $\mu_m$ , que se define como:

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho}, \quad \mu_m = \sigma \frac{N_A}{w}, \quad (1-4)$$

y es la cantidad que más frecuentemente se encuentra en bases de datos y en representaciones gráficas.

## 1.4. Transmisión



**Figura 1-7:** Esquema del montaje experimental- transmisión de rayos gamma.

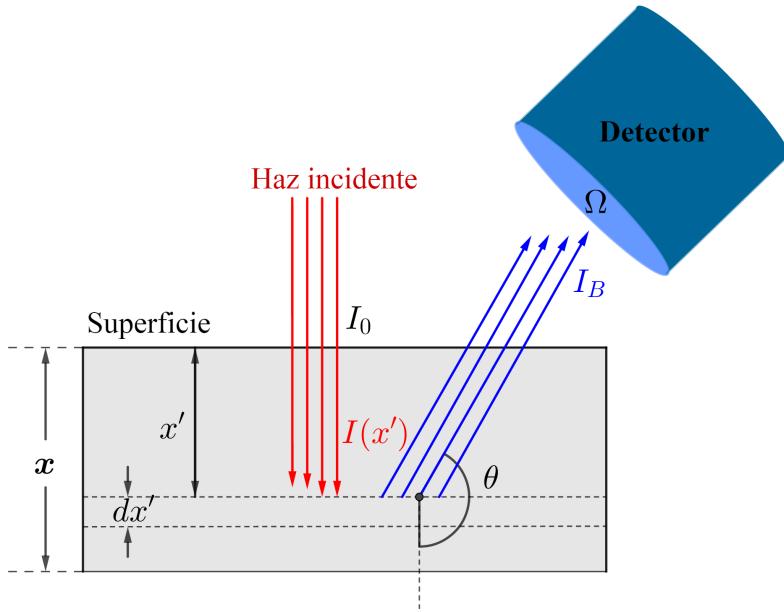
Cuando un rayo pasa a través de la materia, como se muestra en la Figura 2-7, la probabilidad de absorción en una capa fina es proporcional al grosor de dicha capa, lo que implica un decrecimiento exponencial de la intensidad

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x}, \quad (1-5)$$

donde  $I_0$  es la intensidad inicial del rayo gamma,  $\mu$  el coeficiente de atenuación lineal y  $x$  el espesor del material [5].

## 1.5. Retrodispersión

El fenómeno de fotones dispersados a ángulos  $\theta$ , entre  $90^\circ$  y  $180^\circ$ , es llamado retrodispersión. Para obtener una aproximación analítica de fotones dispersados en cada elemento de volumen del material de interés, se supondrá el montaje ilustrado en la Figura 1-8.



**Figura 1-8:** Esquema del montaje experimental para retrodispersión de rayos gamma.

Con  $I_0$  la intensidad inicial del haz, equivalente al número de fotones que alcanzan la superficie del material,  $I(x')$  número de fotones que alcanzan el grosor  $x'$  y  $I_B$  número de fotones retrodispersados por la muestra a un grosor  $x'$  que alcanzan el detector.

Para obtener una predicción de  $I_B$  matemáticamente, se hacen las siguientes consideraciones: Siendo  $dR(x') = I(x') w$  el número de fotones retrodispersados en el grosor  $x'$ , con  $I(x') = I_0 e^{-\mu_1 x'}$  según la relación (1-5), y  $w = \mu_{C1} dx' \Omega / 4\pi$  la probabilidad de retrodispersión en un grosor  $dx'$  del material en dirección al detector, de los  $dR(x')$  fotones que arrancan el viaje de vuelta en  $x'$ , únicamente  $dI_B(x') = dR(x') e^{-\mu_2 x'}$  alcanzan el detector.  $\mu_1$  y  $\mu_2$  coeficientes de atenuación lineal describen dos energías distintas, el primero la energía del rayo gamma emitido  $E_1$ , y el segundo la energía con la que este es retrodispersado  $E_2$ . Finalmente, para  $dI_B$  se tiene [6],

$$dI_B = I_0 \mu_{C1} \frac{\Omega}{4\pi} e^{-(\mu_1 + \mu_2)x'} dx'. \quad (1-6)$$

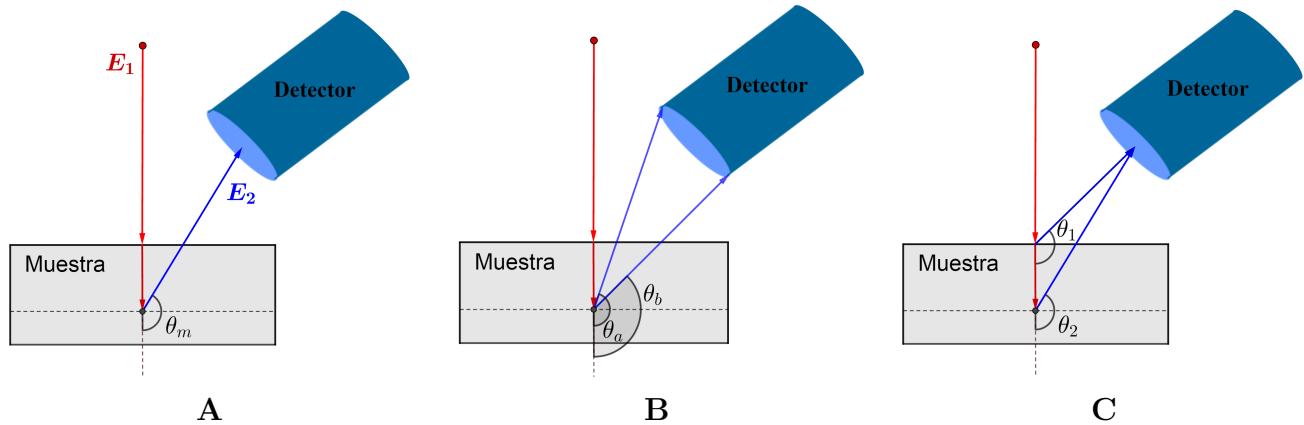
Ahora, integrando (1-6) desde la superficie  $x' = 0$  hasta cierta profundidad  $x' = x$ , se obtiene

$I_B(x)$ , la contribución total a la intensidad retrodispersada de todas las capas de grosor  $dx'$ .

$$\begin{aligned} I_B(x) &= I_0 \frac{\Omega}{4\pi} \frac{\mu_{C1}}{\mu_1 + \mu_2} [1 - e^{-(\mu_1 + \mu_2)x}] , \\ &= i_0 [1 - e^{-\mu_T x}] , \end{aligned} \quad (1-7)$$

con

$$\mu_T = \mu_1 + \mu_2. \quad (1-8)$$



**Figura 1-9:** Casos de retrodispersión: **A:** Los rayos gamma incidentes son retrodispersados en el centro de la muestra, y llegan al centro del detector. **B:** Los rayos gamma incidentes se retrodispersan en el centro de la muestra, y llegan a distintos puntos de la cara del detector. **C:** Los rayos gamma incidentes son retrodispersados a cualquier profundidad de la muestra, y llegan al centro del detector

La deducción de  $I_B$  se desarrolla considerando el experimento ideal de retrodispersión, en el cual la radiación gamma retrodispersada se origina en el centro de la muestra y llega al centro del detector, matemáticamente esto es a un ángulo fijo  $\theta_m$ , entre el centro de la muestra y el detector (Figura 1-9 A). En la práctica pueden presentarse casos más complejos, ya que la radiación gamma puede llegar al centro de la muestra y retrodispersarse a distintos ángulos  $\theta_a$ ,  $\theta_b$ , llegando a puntos distintos del detector como lo ilustra la Figura 1-9 B. Asimismo, la retrodispersión puede suceder a cualquier profundidad en la muestra y luego llegar al centro del detector, formando ángulos  $\theta_1 \neq \theta_2$  como se exhibe en la Figura 1-9 C.

La Ec.(1-7) es exclusivamente válida cuando el haz retrodispersado recorre la misma distancia  $x$  dentro del material que el haz inicialmente transmitido. Pero debido a que la trayectoria que siguen los fotones de la fuente, a determinado grosor del material, no es paralela a la que siguen los fotones retrodispersados hacia el detector, al coeficiente de atenuación  $\mu_2$ , que describe la atenuación de fotones retrodispersados, se le añade un factor de corrección

$l = 1/|\cos \theta_m|$ , obtenido del análisis geométrico del recorrido del haz retrodispersado con energía  $E_2$ , dentro de la muestra en la Figura 1-9 A [7],

$$\mu_2 x \rightarrow \frac{\mu_2 x}{|\cos \theta_m|}, \quad \mu_T = \mu_1 + \mu_2 \rightarrow \mu_T = \mu_1 + \frac{\mu_2}{|\cos \theta_m|}, \quad (1-9)$$

lo que resulta en la modificación de la expresión (1-8), es decir, el coeficiente de atenuación total  $\mu_T$  y, por tanto, en el valor de  $I_B$ , que ahora depende además del grosor de la muestra  $x$ , del ángulo  $\theta_m$ .

## 1.6. Metodología

Para lograr reproducibilidad del experimento y sus resultados, el material elegido, el mortero, ha sido elaborado según la Norma Técnica Colombiana para morteros hidráulicos NTC 220. Lo anterior se ha logrado usando los insumos y el laboratorio de estructuras de la Facultad de ingeniería de la Universidad Nacional, en conjunto con la asesoría de un ingeniero civil de la facultad. Dada la importancia del método de elaboración y la caracterización de las muestras de mortero, el Capítulo 2 está dedicado a ellas. La información obtenida será útil para los experimentos con rayos gamma y para la comparación de algunos resultados con valores de base de datos.

Los procesos de interacción entre el haz de fotones incidente y el material de interés son empleados como métodos de caracterización del mortero. Con el primer método, transmisión, se determina experimentalmente el coeficiente de atenuación  $\mu$  del material, empleando 5 fuentes radiactivas distintas:  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{22}\text{Na}$ , y utilizando un detector de germanio hiperpuro conectado a un procesador de señal y fuente de alimentación (PX5-HPGe). Con el segundo método, retrodispersión, se estudia la intensidad dispersada por el material a ángulos mayores de 90 grados, hallando un valor experimental del coeficiente de atenuación total  $\mu_T$ , utilizando una única fuente radiactiva de  $^{137}\text{Cs}$ , y empleando un detector de yoduro de sodio de  $3'' \times 3''$  acoplado a un foto-multiplicador. El detector además está conectado a un tubo digital TB-5 que contiene toda la electrónica necesaria para lograr una alta eficiencia.

Finalmente como aplicación, empleando el montaje de retrodispersión para dos láminas de mortero, se explora un método diagnóstico de la anormalidad estructural del material, esto se hace situando dos láminas de mortero a una cierta distancia entre ellas, dejando aire en el medio y considerando a este conjunto como una única muestra. A partir de los valores del coeficiente de atenuación lineal total  $\mu_T$ , se identifica que la muestra usada no corresponde a una muestra de mortero del mismo grosor.

## 2 Preparación y caracterización de muestras

Los experimentos descritos a continuación se realizaron con 12 láminas de mortero de cemento hidráulico, usando para cada lámina un molde de sección cuadrada de 12 cm de lado y 1 cm de profundidad. La composición y elaboración de los morteros intentan ser lo más fieles posible a las especificaciones de la norma técnica colombiana NTC 220. La descripción posterior tiene como objetivo establecer las pautas necesarias para la reproducibilidad de las muestras de ensayo empleadas aquí.

### 2.1. Composición de las muestras

La NTC 220 establece que “las proporciones en masa para formar un mortero normal deben ser de una parte de cemento por 2.75 partes de arena gradada normalizada seca. Para todos los cementos Portland constituidos por clinker y yeso únicamente, debe emplearse una relación agua/cemento de 0.485 y de 0.460 para todos los cementos Portland con incorporadores de aire” [8]. Para cubos de ensayo de  $125 \text{ cm}^3$  de volumen, cada uno, las proporciones anteriores se traducen en cantidades de materiales (cemento, arena y agua) para 6 o 9 cubos de ensayo de la siguiente manera:

Material		6 cubos	9 cubos
Cemento	g	500	740
Arena	g	1375	2035
Agua	ml	242	359

**Tabla 2-1:** Cantidad de materiales para la elaboración de mortero aplicado a 6 o 9 cubos de ensayo, establecidas por NTC 111 (ASTM 230). Tomado de [8]

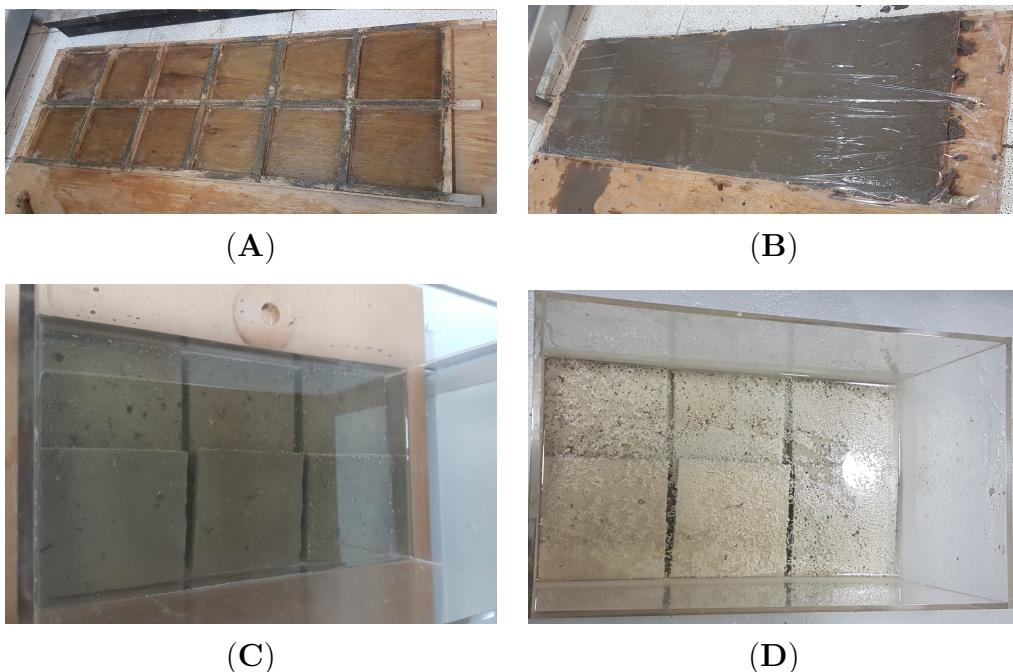
Para elaborar 12 láminas de mortero de área  $144 \text{ cm}^2$  y grosor 1 cm, lo cual implica un volumen total de  $1728 \text{ cm}^3$ , se usan las cantidades de materiales equivalentes a lo necesario para elaborar 15 cubos de ensayo de mortero, cuyo volumen total es  $1875 \text{ cm}^3$ . Haciendo uso de la Tabla 2-1, se calculan las cantidades correspondientes para este volumen.

Material	15 cubos	
	g	%
Cemento Portland	1240	23.612
Arena Sílice	3410	64.933
Agua	601.6	11.455

**Tabla 2-2:** Materiales y su proporción porcentual en la elaboración de mortero.

## 2.2. Elaboración de las muestras

Primeramente, la arena normalizada gradada, se logra mezclando 1705 g de arena obtenida del tamiz No. 100 (grano de 150  $\mu\text{m}$  de diámetro) y 1705 g de arena obtenida del tamiz No. 30 (grano de 600  $\mu\text{m}$  de diámetro) [9], ambas arenas son silíceas al 99 %. Las arenas se vierten en el recipiente de mezcla y se mezclan durante 2 min, a velocidad baja, para obtener finalmente la arena gradada. Seguidamente se agregan 1240 g de cemento Portland y, con velocidad baja, se mezcla con la arena por otros 2 min. Por último, 601.6 g de agua es agregada y mezclada durante 2 min, a velocidad baja, y después durante 2 min a velocidad alta. La mezcladora implementada cumple los requisitos de la NTC 112 [10].



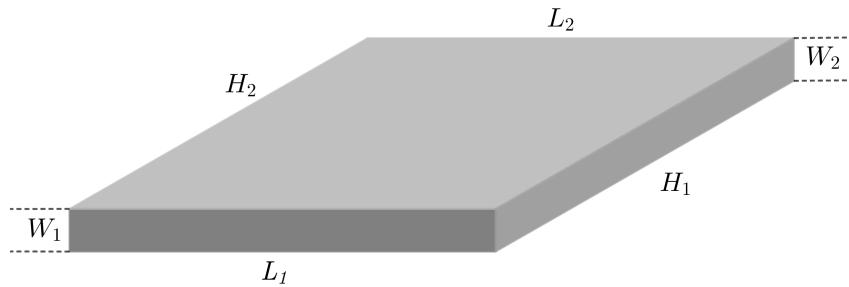
**Figura 2-1:** (A): molde de balso humedecido con Eucodesmoldante. (B): moldes llenos con la mezcla de mortero, cubierto con vinipel. (C): curado de láminas día 1. (D): curado de láminas día 41.

Los moldes, hechos en balso para las láminas de ensayo, son previamente humedecidos con *Eucodesmoldante*, antes de verter la mezcla resultante (Figura 2-1 (A)), lo que reduce la cantidad de agua absorbida de la mezcla por la madera del molde. En cada molde de lámina se vierte la mezcla para mortero en dos capas, cada una se apisona con un compactador haciendo entre 10 y 12 golpes con la punta del mismo de manera uniforme sobre la superficie. Luego se hace uso de un palustre para eliminar los excesos.

Para evitar la rápida pérdida de agua y deshidratación de los morteros, la superficie de los moldes es cubierta con papel vinipel (Figura 2-1 (B)), mientras son curados en un día. Seguidamente las láminas de mortero se desmoldan y se sumergen en agua durante 41 días, antes de llevar a cabo su caracterización. El primer y último día de curado de los morteros, son ilustrados en las Figuras: 2-1 (C) y 2-1 (D) respectivamente.

### 2.3. Caracterización de las muestras

Previamente a estudiar la incidencia de radiación gamma sobre las láminas de mortero, es importante caracterizar las dimensiones, la masa y la composición elemental de las muestras obtenidas.



**Figura 2-2:** Esquema de medidas tomadas para cada lámina de Mortero.

En la Tabla 2-3 son recolectados los datos para las doce láminas de mortero, incluyendo su masa, y las dimensiones de cada uno de sus lados y su opuesto, rotuladas en cada arista como lo exhibe la Figura 2-2.

Láminas de Mortero - Lote B							
Lámina #	Masa [g]	$H_1$ [cm]	$H_2$ [cm]	$L_1$ [cm]	$L_2$ [cm]	$W_1$ [cm]	$W_2$ [cm]
	(+/- 0.01)	(+/- 0.001)					
1	320.52	11.090	11.093	11.119	11.121	1.182	1.245
2	327.02	11.106	11.131	11.004	11.184	1.199	1.260
3	295.60	11.083	11.062	11.032	11.068	1.236	1.088
4	305.48	11.108	11.089	11.169	11.003	1.160	1.262
5	281.76	11.109	11.111	11.121	11.140	1.196	1.044
6	304.77	11.092	11.117	11.122	11.086	1.208	1.192
7	303.24	11.072	11.088	11.059	11.055	1.068	1.213
8	323.40	11.031	11.067	11.128	11.069	1.210	1.322
9	309.37	11.076	11.050	11.071	11.094	1.180	1.297
10	298.26	11.080	11.084	11.143	11.067	1.162	1.202
11	314.73	11.019	11.146	11.101	11.046	1.207	1.278
12	322.86	11.045	11.069	11.037	10.947	1.228	1.189

**Tabla 2-3:** Medidas experimentales del lote de morteros.

Con los datos obtenidos en la Tabla 2-3, se hace el cálculo de dos cantidades importantes para los posteriores experimentos, la densidad de cada lámina, y su grosor promedio, asociado a los valores  $W_1$  y  $W_2$ .

Lámina #	Grosor	Densidad
	cm	g/cm <sup>3</sup>
1	1.21(3)	2.13(4)
2	1.23(3)	2.16(5)
3	1.16(7)	2.07(9)
4	1.21(5)	2.05(7)
5	1.12(7)	2.0(1)
6	1.200(8)	2.05(1)
7	1.14(7)	2.17(9)
8	1.26(5)	2.08(7)
9	1.23(6)	2.03(7)
10	1.18(2)	2.05(3)
11	1.24(3)	2.06(5)
12	1.20(2)	2.19(3)

**Tabla 2-4:** Valores de grosor y densidad de cada lámina rotulada, con incertidumbres estadísticas.

Haciendo la consideración de un material homogéneo, la densidad  $\rho$  del material mortero hidráulico será el promedio de las densidades de cada una de las láminas, obtenidas en la Tabla 2-4,

$$\rho = 2.08(1) \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}. \quad (2-1)$$

Por último, tomando la composición química porcentual (teórica) de cada uno de los materiales empleados para la elaboración de las láminas de mortero, y su proporción en la mezcla empleada, calculada y expuesta en la Tabla 2-2, se obtiene la concentración porcentual de cada elemento químico.

Elemento	% en masa
SiO <sub>2</sub>	79.80856
H <sub>2</sub> O	11.4550
CaO	5.19464
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.18060
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.70836
MgO	0.70836
SO <sub>3</sub>	0.70836
K <sub>2</sub> O	0.16528
Na <sub>2</sub> O	0.07084

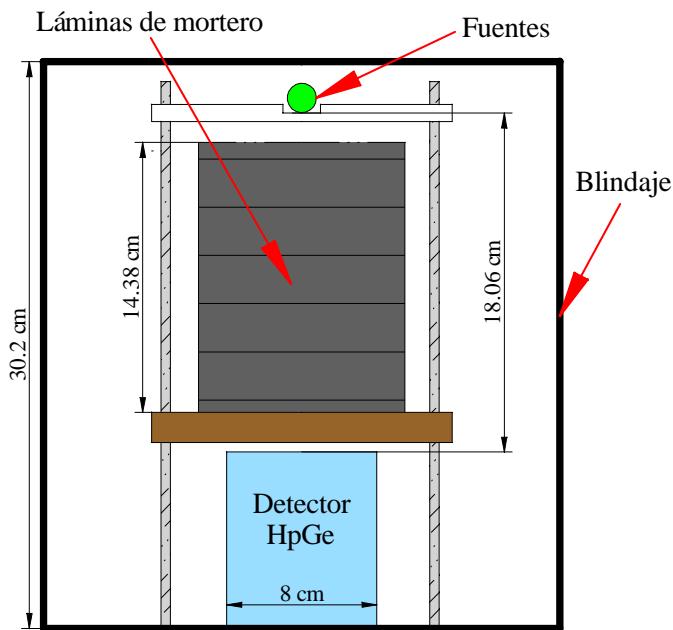
**Tabla 2-5:** Proporciones porcentuales teóricas en la composición química del mortero hidráulico NTC 220.

Debido a que no se realizó una caracterización experimental de composición química, los valores exhibidos en la Tabla 2-5, representan una aproximación teórica a los valores reales de las muestras resultantes. Con esta información y la densidad  $\rho$  en (2-1), es posible hallar valores en bases de datos para los coeficientes de atenuación lineal del mortero empleado.

# 3 Análisis experimental

## 3.1. Transmisión de rayos gamma en morteros

### 3.1.1. Montaje Experimental



**Figura 3-1:** Montaje experimental para transmisión, usando 5 fuentes radiactivas distintas.

El experimento de transmisión se lleva a cabo empleando el montaje experimental de la Figura 3-1, en el que, tanto como fuentes, láminas y detector son ubicados en el interior de una baliza de plomo, la cual aisla cierta porción de radiación exterior. El detector HPGe es ubicado en la parte inferior, encima de un riel motorizado vertical, y permite ajustar la altura del detector. En la parte superior se ubican las fuentes, usando una base plástica también ajustable y, en el medio, se ubican las láminas de mortero, encima de una base de madera.

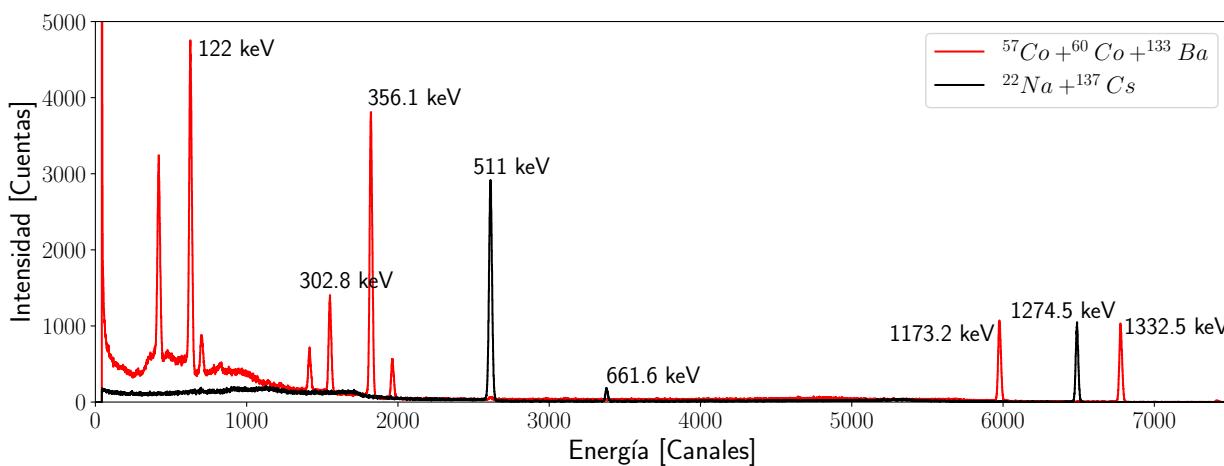
Para la determinación experimental de los coeficientes de atenuación lineal del mortero, a diferentes energías, se varía el número de láminas de mortero que están ubicadas entre el

detector de germanio (GeHP) y diversas fuentes radiactivas ( $^{57}\text{Co}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ), con el objetivo de obtener una variación de la intensidad de radiación detectada en función del grosor del material.

Para la toma de datos es necesario dividir las fuentes radiactivas en dos grupos, esto por la diferencia significativa de actividad entre ellas, en especial la diferencia de actividad entre las fuentes  $^{60}\text{Co}$  (menos activa) y  $^{22}\text{Na}$  (más activa). Cálculos muestran que, para alcanzar un número de cuentas y una incertidumbre del mismo orden en ambos grupos, es necesario que el tiempo de medida del grupo de fuentes menos activo sea aproximadamente **36** veces mayor al del grupo de fuentes más activas. El grupo denominado *fuentes1* está compuesto por:  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ , y  $^{60}\text{Co}$ ; el tiempo de medida por lámina es de 3 horas. En consecuencia, al grupo de *fuentes2*, compuesto por:  $^{137}\text{Cs}$  y  $^{22}\text{Na}$ , le corresponde un tiempo de medida por lámina de 5 minutos.

### 3.1.2. Resultados

El espectro resultante de cada grupo de datos (un espectro por lámina incluyendo la toma de datos sin láminas) contiene los fotopicos asociados a la energía liberada en los procesos de decaimiento de las fuentes radioactivas. Aunque, teóricamente, se conocen todos estos valores de energía, en el análisis de datos se debe elegir exclusivamente los fotopicos de energía que puedan aportar información suficiente para el cálculo del coeficiente de atenuación lineal. El criterio de esta elección es la incertidumbre en la determinación de la posición (en canales) y la intensidad (en cuentas) asociada al fotopico de energía de interés.

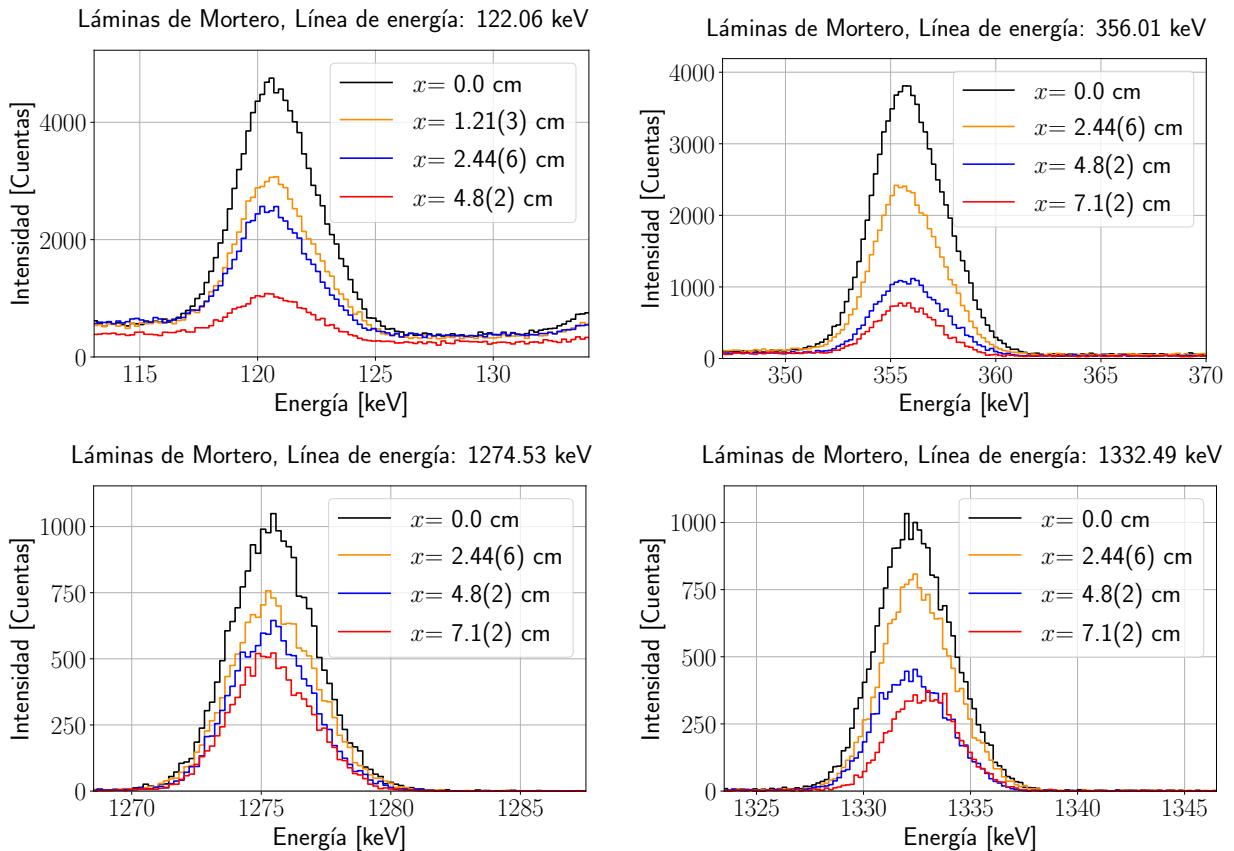


**Figura 3-2:** Espectro sin láminas de 5 fuentes radiactivas y los 8 fotopicos de interés.

En el espectro del vacío, es decir, sin láminas de mortero (Figura 3-2), para el grupo de todas las fuentes, se ilustran los fotopicos que han sido elegidos candidatos para el análisis, después de ver su posible detección tras la atenuación a altos grosores de mortero.

Fuentes	Energias [keV]
<i>fuentes1</i>	
$^{57}\text{Co}$	122.06
$^{133}\text{Ba}$	302.85
	356.1
$^{60}\text{Co}$	1173.23
	1332.49
<i>fuentes2</i>	
$^{137}\text{Cs}$	661.65
$^{22}\text{Na}$	511.0
	1274.53

**Tabla 3-1:** Fotopicos de interés, ilustrados en la Figura 3-2 y sus respectivas fuentes.



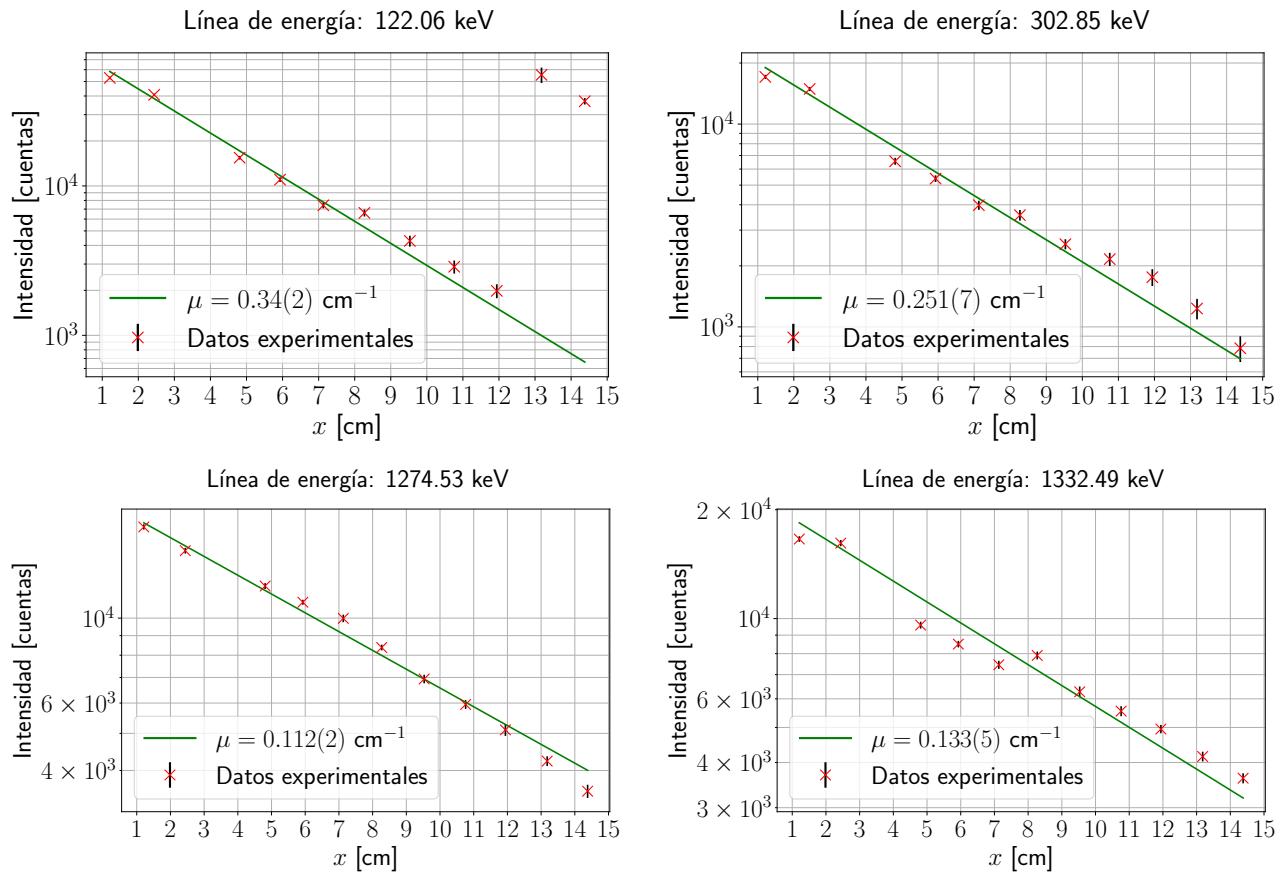
**Figura 3-3:** Espectros de distintas líneas de energía, para diferentes grosores  $x$  del mortero. Siendo  $x$  el ilustrado en la Figura 1-7, y descrito por la ecuación (1-5).

Eligiendo 4 de los 8 fotopicos del espectro, en la Figura 3-3 se ejemplifica la atenuación en intensidad de las gaussianas asociadas a cada fotopico, a medida que aumenta el grosor

del material, es decir, la cantidad de láminas de mortero. Adicionalmente, para las líneas de energía de 122.06 keV, 356.01 keV, y 1332.49 keV, de 2.44 cm a 4.8 cm, es decir, en el doble del grosor, se ve una disminución en la altura de las gaussianas de aproximadamente la mitad, mientras que 1274 keV muestra un comportamiento distinto.

### 3.1.3. Análisis

Si se integra sobre cada gaussiana, se obtiene la intensidad total de cada fotopico y, si esto se hace para cada uno de los espectros provenientes de diferente número de láminas, es posible obtener la intensidad y su reducción en función del grosor del material para cada energía.

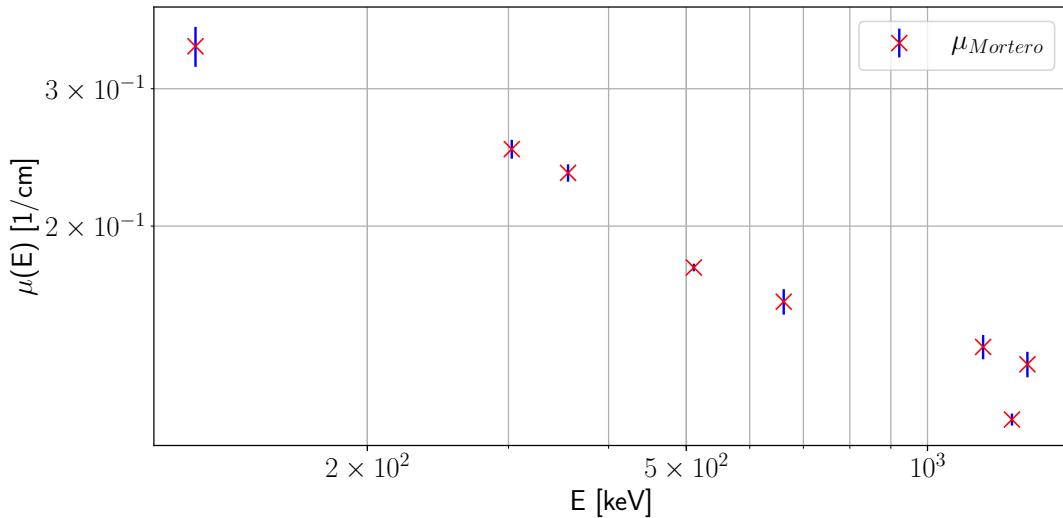


**Figura 3-4:** Intensidad en función del grosor para diferentes energías y su ajuste de la forma (1-5), para 11 datos.

Haciendo un ajuste de la forma (1-5) para los valores de intensidad hallados para cada grosor, con 12 láminas en total (omitiendo el espectro para 3 láminas), se puede obtener el promedio del coeficiente de atenuación lineal para las energías de interés, como se ejemplifica para 4 energías de diferentes fuentes en la Figura 3-4.

Cabe señalar que, a partir de aproximadamente 8 cm (7 laminas de grosor) para energías de 122.06 keV y 302.85 keV, se evidencia un distanciamiento considerable de las intensidades obtenidas respecto a sus valores esperados, la razón de esto es que, a grosores muy grandes, las cuentas son muy pequeñas, la incertidumbre en los cálculos aumenta y la determinación de la posición e intensidad del fotópico es menos precisa, en adición a ello, para 122.06 keV, los ajustes para los últimos dos valores de grosor en  $x = 13.18$  cm y  $x = 14.38$  cm son despreciables. El código de análisis implementado, al no poder detectar una gaussiana, toma partes muy grandes del espectro y las integra sin estar relacionadas con este fotópico.

Por otro lado, para altas energías: 1274.53 keV y 1332.49 keV, sus valores de intensidad se encuentran, más o menos, a la misma distancia respecto a su valor esperado, aún a partir de grosores grandes ( $x = 8$  cm), puesto que, al separar las fuentes en distintas tomas de datos, se reduce la superposición de fotópicos con bordes Compton, lo que resulta en fotópicos mucho más definidos, aún a bajas cuentas.



**Figura 3-5:** Coeficientes de atenuación lineal del mortero, para las energías en la Tabla 3-1

Graficando ahora los 8 valores de coeficientes de atenuación lineal obtenidos para diferentes energías, se logra la Figura 3-5, en la cual se observa que, a medida que la energía incrementa, el coeficiente de atenuación lineal decrece. En una escala logarítmica se ve una dependencia exponencial, por lo que se propone un ajuste con dos parámetros  $\alpha$  y  $n$ , de la forma [7]

$$\mu = \alpha \times E^{-n}, \quad (3-1)$$

[7], con la cual se obtendrá la forma funcional de los coeficientes de atenuación del mortero, para cualquier energía entre 122.06 keV y 1332.49 keV.

Con el fin de tener un marco de referencia para los resultados experimentales, los datos del repositorio NIST [11] son usados, primero, para comparar los coeficientes de atenuación lineal del mortero obtenidos en el laboratorio y el porcentaje en que difieren con los de la base de datos; y, en segundo lugar, para obtener otro par de parámetros  $\alpha$  y  $n$ , que permitan describir la forma funcional del coeficiente  $\mu$ .

Mortero ( $\rho = 2.08(1)$ g/cm <sup>3</sup> )			
E	$\mu_{\text{lab}}$	$\mu_{\text{NIST}}$	$\Delta\mu$
[keV]	[cm <sup>-1</sup> ]		%
122.06	0.34(2)	0.310(1)	9.67
302.85	0.251(7)	0.223(1)	12.55
356.01	0.233(6)	0.209(1)	11.96
511.00	0.177(2)	0.1813(8)	2.37
661.65	0.159(6)	0.1621(7)	1.29
1173.23	0.140(4)	0.1235(5)	13.36
1274.53	0.112(2)	0.1185(5)	4.64
1332.49	0.133(5)	0.1158(5)	14.85

**Tabla 3-2:** Comparación entre coeficientes de atenuación lineal del experimento, y los obtenidos a partir del coeficiente de atenuación másico de la base de datos NIST [11] por la densidad  $\rho$  hallada en (2-1).

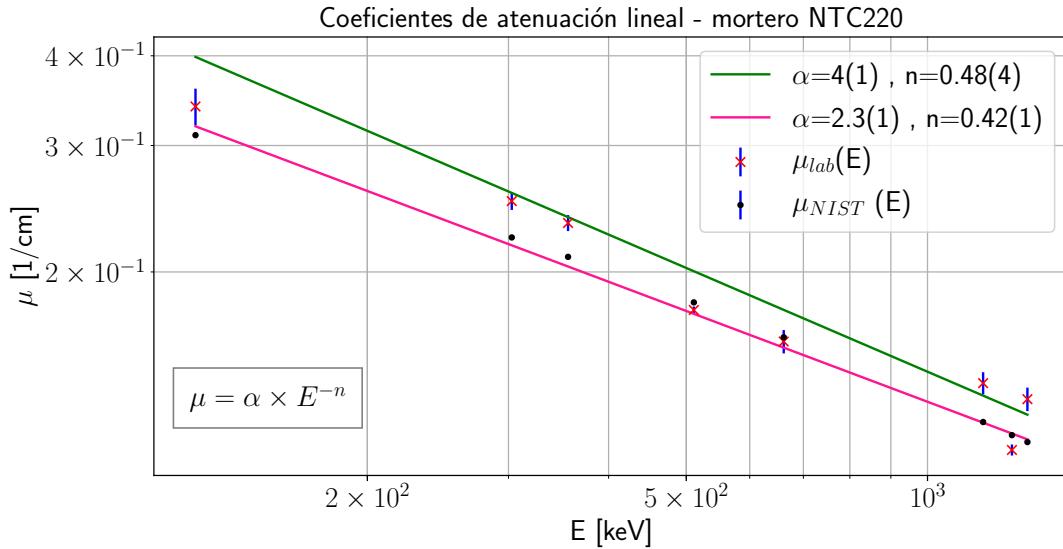
Comparando valores experimentales del coeficiente de atenuación lineal con valores de base de datos, en la Tabla 3-2 se encuentra que los valores  $\mu_{\text{lab}}$ , con menor diferencia porcentual  $\Delta\mu$  (1 % a 5 %), pertenecen a energías asociadas a *fuentes1*, mientras que las energías asociadas a *fuentes2* tienen valores de  $\mu_{\text{lab}}$  con diferencia porcentual  $\Delta\mu$  más alta, de entre 10 % y 15 %.

Haciendo un ajuste de la forma (3-1) para los valores de los coeficientes de atenuación lineal, tanto experimentales como del NIST de la Tabla 3-2, se obtienen dos funciones distintas,

$$\mu_{\text{lab}}(E) = 4(1) \times E^{-0.48(4)}, \quad (3-2)$$

$$\mu_{\text{NIST}}(E) = 2.3(1) \times E^{-0.42(1)}, \quad (3-3)$$

con las que se puede calcular un valor aproximado de  $\mu$ , para las energías dentro de la región [122 keV - 1332 keV].

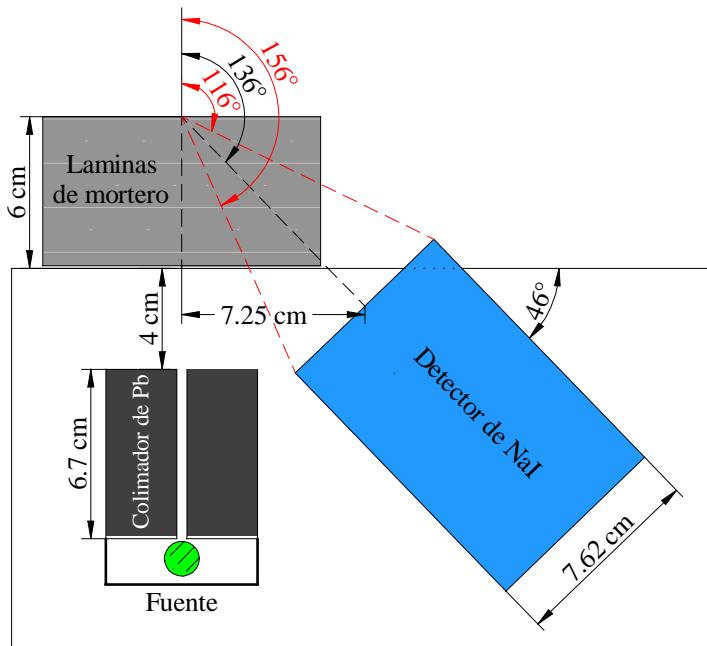


**Figura 3-6:** Visualización del ajuste de datos experimentales (línea verde) respecto al ajuste de los valores obtenidos del NIST (línea rosada).

El parámetro que más difiere entre estas funciones es la base  $\alpha$ , mientras que el parámetro exponencial  $n$  logra solaparse en el rango de valores que abarcan sus incertidumbres. Graficando  $\mu_{lab}(E)$  y  $\mu_{NIST}(E)$ , en conjunto con los coeficientes lineales que éstas ajustan, se hace visible en una escala log-log, que las rectas, sin llegar a ser paralelas, tienen una pendiente  $n$  similar pero su punto de corte  $\alpha$  difiere visiblemente, como se ilustra en la Figura 3-6.

## 3.2. Retrodispersión de rayos gamma en morteros

### 3.2.1. Montaje Experimental

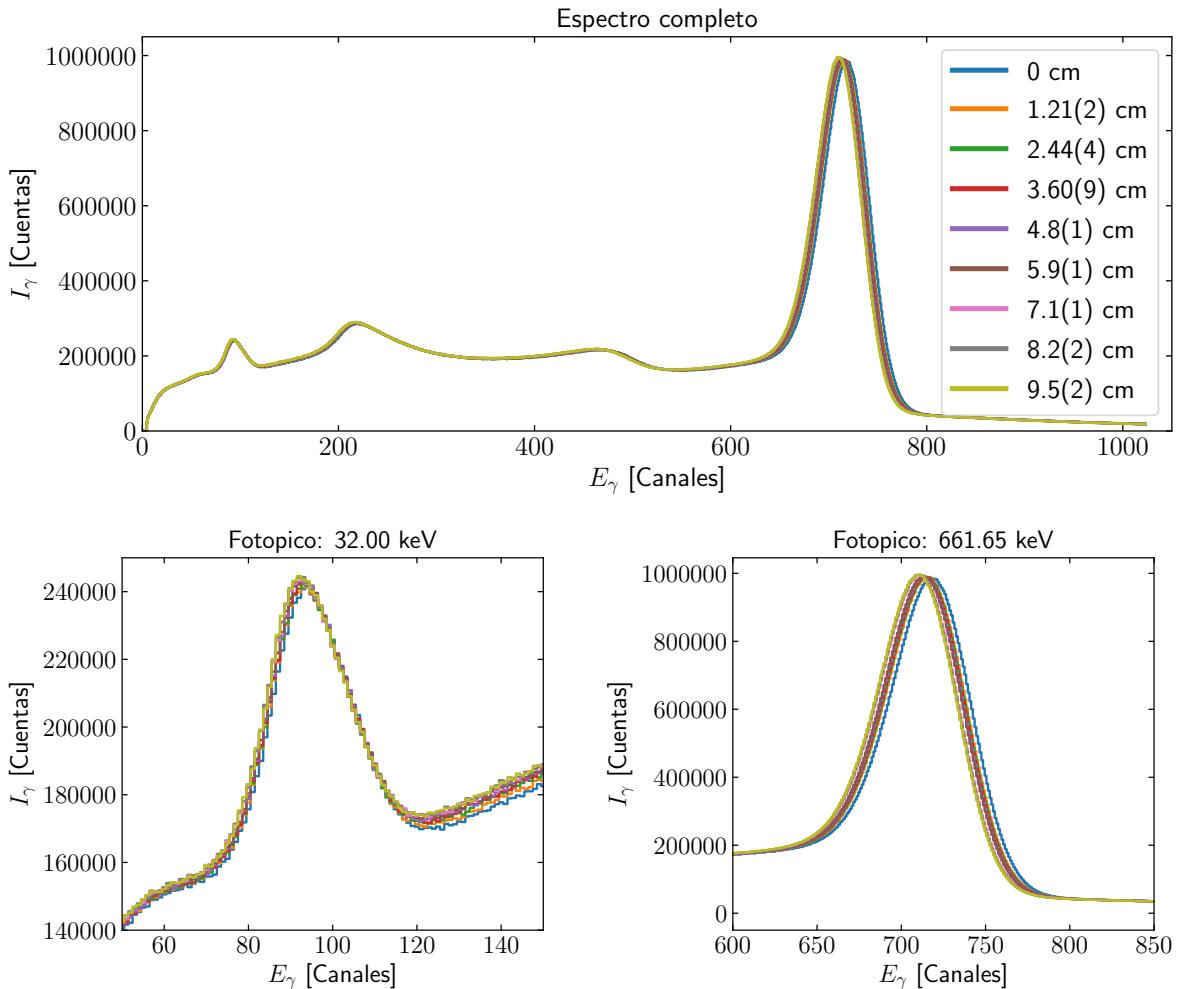


**Figura 3-7:** Montaje experimental para retrodispersión, con una fuente de  $^{137}\text{Cs}$

La configuración del montaje experimental para retrodispersión es esquematizada en la Figura 3-7. La fuente radiactiva de  $^{137}\text{Cs}$  está contenida dentro de un pequeño blindaje de plomo que posee una abertura que colima los rayos gamma salientes. Tanto el blindaje como el detector se ubican en la parte inferior del montaje empleando un soporte metálico que los sostiene; este soporte es adherido en medio de dos cajones de madera laterales, que cuentan en su base con láminas de plomo, mientras que en la parte superior del montaje se posicionan las láminas de mortero. El ángulo central, determinado por el ángulo formado entre el centro del detector y el centro de las láminas, el cual se ha propuesto a un grosor de 6 cm (aproximadamente 5 láminas), es de  $136^\circ$ ; y los ángulos límite, inferior y superior, determinados por el centro de las láminas a los bordes del detector, son  $116^\circ$  y  $156^\circ$  respectivamente.

Para obtener datos de los fotones dispersados en cada elemento de volumen (cada lámina) del mortero, se toma inicialmente un sin muestra, para observar las condiciones iniciales del experimento y tener un espectro de referencia. Posteriormente, una a una van siendo agregadas las láminas de mortero, para tener un espectro por lámina agregada hasta alcanzar un grosor de 8 láminas. El tiempo de medida para cada espectro es de 1 hora y el lapso total desde la primera hasta la última medida es de 3 días.

### 3.2.2. Resultados



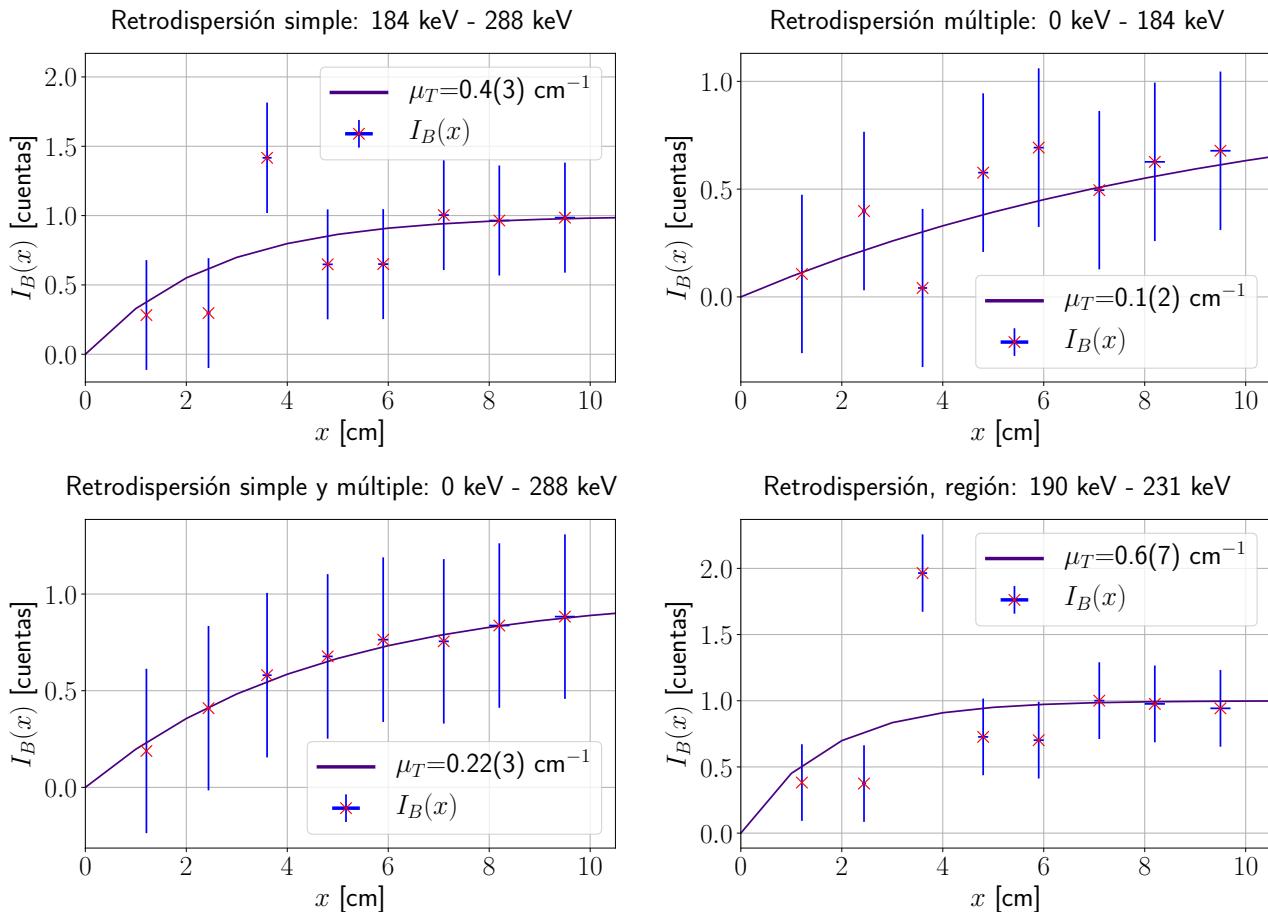
**Figura 3-8:** Intensidad en función de la energía para distintos grosores de mortero.

Se toman un total de 9 espectros, abarcando desde  $x = 0$  cm (espectro sin láminas) hasta  $x = 9.5$  cm de grosor del material. Los espectros resultantes se dividen en 3 regiones determinadas por las energías 184 keV y 288 keV, asociadas a los ángulos de retrodispersión de  $90^\circ$  y  $180^\circ$ , respectivamente. Si el fotón incidente interactúa, al menos una segunda vez con el material después de ser dispersado, llegará al detector con energías menores a 184 keV, a dicha región de energías se le denomina **región de retrodispersión múltiple**. Si el fotón es dispersado una única vez, éste tendrá un rango de energías de 184 keV a 288 keV, que recibe el nombre de **región de retrodispersión simple**. La región de transmisión abarca el rango de energías mayores a 288 keV.

Los espectros en la Figura 3-8 no se encuentran alineados unos con otros, esto a causa de la alta fluctuación dentro de la electrónica implementada. Para poder obtener información de cada región de energías en cada espectro, es necesario hacer una calibración de canales a energía por espectro, teniendo como referencia los fotopicos de 32 keV y 661.65 keV de la fuente  $^{137}\text{Cs}$ .

### 3.2.3. Análisis

Después de calibrar cada espectro, para que coincidan energías en el espacio de canales, a los espectros obtenidos de  $x = 1.21$  cm a  $x = 9.5$  cm se les resta el espectro de referencia tomado para  $x = 0$  cm y se examina, en cada región de retrodispersión, cómo el aumento en el grosor del material afecta el número de cuentas totales.



**Figura 3-9:** Intensidad retrodispersada en función del grosor para diferentes regiones y su ajuste de la forma (1-7), para 8 datos.

La dependencia entre intensidad retrodispersada y grosor, observada en los datos experimentales, puede ser descrita por el modelo de retrodispersión propuesto en la ecuación (1-7),

$$I_B(x) = i_0 [1 - e^{-\mu_T x}]$$

haciendo  $i_0 = 1$ , al normalizar las cuentas de cada región con el valor de intensidad del mayor grosor, y  $\mu_T$  (coeficiente de atenuación total) el parámetro de ajuste que determinará cada grupo de datos experimentales. La Figura 3-9 ilustra los diferentes valores de  $\mu_T$  obtenidos para el conjunto de datos de cada región, que varían significativamente tanto en su valor como en su incertidumbre.

La forma funcional de la dependencia entre intensidad y grosor propuesta ajusta todas las regiones elegidas, pero el modelo de retrodispersión implementado ha sido deducido únicamente para retrodispersión simple en el caso del experimento ideal, ilustrado en la Figura 1-9 A; en este caso el haz retrodispersado en el centro de las láminas llega al centro del detector. Usando una fuente de  $^{137}\text{Cs}$  se obtiene la mayor línea de energía en 661.65 keV, lo cual implica que la energía de rayo gamma retrodispersado en  $136^\circ$  según (1-1) es igual a:

$$E'_\gamma = \frac{661.65 \text{ keV}}{1 + \epsilon(1 - \cos 136^\circ)} = 205 \text{ keV}. \quad (3-4)$$

En adición a este valor central, teniendo en cuenta la posibilidad de que el rayo retrodispersado en el centro de las láminas llegue a cualquier punto de la cara del detector (como se ilustró en la Figura 1-9 B), el rayo gamma puede ser retrodispersado a ángulos entre  $\theta_a = 116^\circ$  y  $\theta_b = 156^\circ$ , lo que equivale a energías desde 190 keV hasta 231 keV. Este rango de energías determinan la región de interés, analizada en la Figura 3-9, donde el valor de  $\mu_T^{\text{retro}} = 0.6(7) \text{ cm}^{-1}$  puede también ser obtenido mediante un cálculo teórico utilizando los resultados del experimento de transmisión y la relación (1-9), que para este caso es:

$$\mu_T = \mu_1(661.65 \text{ keV}) - \frac{\mu_2(205 \text{ keV})}{\cos 136^\circ}. \quad (3-5)$$

De la Tabla 3-2 se obtiene el valor experimental del coeficiente de atenuación lineal para una energía de 661.65 keV,  $\mu_{\text{lab}}(661.65 \text{ keV}) = 0.159(6) \text{ cm}^{-1}$ , y utilizando la ecuación de ajuste (3-2) resultante de valores experimentales, para 205 keV se obtiene un coeficiente de atenuación lineal de  $\mu_{\text{lab}}(205 \text{ keV}) = 0.31(7) \text{ cm}^{-1}$ . Reemplazando estos valores en (3-5) como  $\mu_1$  y  $\mu_2$ , respectivamente, se obtiene:

$$\mu_T^{\text{trans}} = 0.6(1) \text{ cm}^{-1}. \quad (3-6)$$

Así mismo, empleando los valores de la base de datos NIST en la Tabla 3-2 y su ecuación de ajuste (3-3), se logran los coeficientes de atenuación lineal  $\mu_1$  y  $\mu_2$  correspondientes:  $\mu_{\text{NIST}}(661.65 \text{ keV}) = 0.1621(7) \text{ cm}^{-1}$ , y  $\mu_{\text{NIST}}(205 \text{ keV}) = 0.26(3) \text{ cm}^{-1}$ , los cuales dentro de la relación (3-5) resultan en

$$\mu_T^{\text{NIST}} = 0.52(4) \text{ cm}^{-1}. \quad (3-7)$$

El valor de  $\mu_T^{\text{trans}}$ , calculado con los datos del experimento de transmisión, coincide con el valor  $\mu_T^{\text{retro}}$  obtenido del ajuste en el experimento de retrodispersión,  $\mu_T^{\text{trans}} = \mu_T^{\text{retro}}$  pero, mientras la incertidumbre del primero es de solo 17%, la incertidumbre obtenida en este último es del 117%. Esto a causa, principalmente, del error propagado por los valores de intensidad retrodispersada  $I_B$ , que, como se aprecia en la Figura 3-9, además de poseer barras de error considerablemente grandes en las distintas regiones escogidas, dado el tiempo corto de 1 hora; en su mayoría, se alejan respecto a los valores de intensidad retrodispersada esperados al aumentar el grosor.

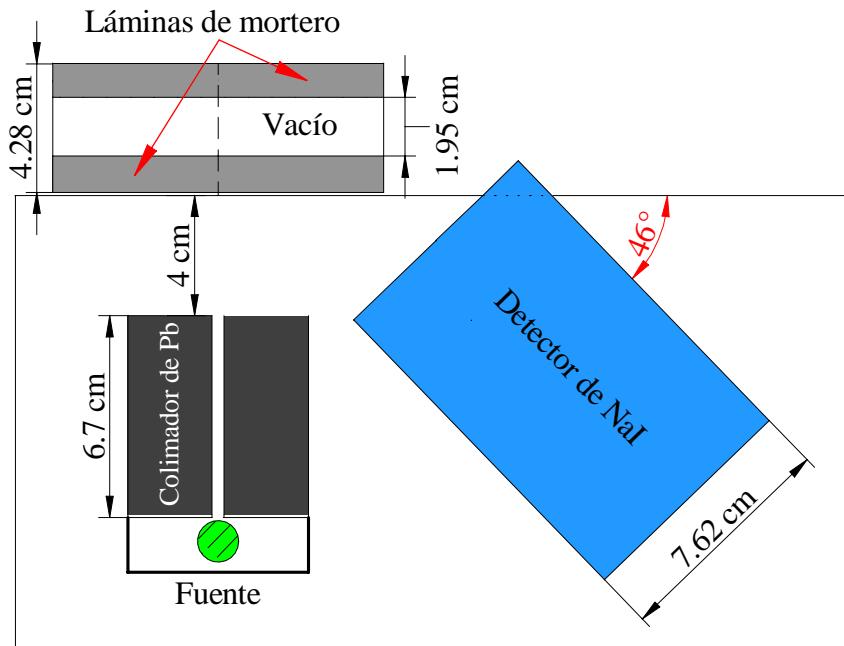
Región de retrodispersión		Ideal	Múltiple	Simple	Múltiple y Simple
Rango de energías [keV]		190 - 231	0 - 188	188 - 288	0 - 288
Valor experimental	$\mu_T^{\text{retro}}$	0.6(7)	0.1(2)	0.4(3)	0.22(3)
Valor teórico	$\mu_T^{\text{trans}}$	0.6(1)	--	--	--
	$\mu_T^{\text{NIST}}$	0.52(4)			

**Tabla 3-3:** Valores experimentales [hallados de la ecuación de ajuste (1-7)] y teóricos [calculados de la ecuación (3-5)] del coeficiente de atenuación total  $\mu_T$ , para distintas regiones de retrodispersión.

El ajuste para hallar el parámetro  $\mu_T$  (denotado para valores experimentales como  $\mu_T^{\text{retro}}$ ), el cual determina los valores de intensidad esperados, es muy sensible a la región escogida, como se observa en la Tabla 3-3. Las regiones de energía se eligen haciendo una calibración de canales a energía por espectro, entre más pequeña sea la región elegida, más precisa debe ser la calibración, es por eso que la zona de retrodispersión más grande, la región de retrodispersión total, que abarca tanto retrodispersión simple como múltiple, posee las intensidades experimentales más cercanas a su valor esperado y, por tanto, la incertidumbre más pequeña de todos los valores de  $\mu_T^{\text{retro}}$ .

### 3.3. Análisis de la integridad estructural de la muestra

#### 3.3.1. Montaje Experimental



**Figura 3-10:** Montaje experimental de retrodispersión, para desarrollar un método diagnóstico

Para el análisis estructural del mortero, se mantiene el montaje empleado en el experimento de retrodispersión, como se ve en la Figura 3-10, variando solamente la configuración de las muestras. Se analizan dos láminas de mortero, #4 y #5, por tener la superficie más uniformemente plana de todas, descritas en la Tabla 2-4, separadas 1.95 cm entre ellas por cuatro bases de bálsamo, ubicadas en cada esquina de la lámina, funcionando como soportes. La configuración resultante mide 4.28 cm de altura.

Para aplicar los resultados encontrados en el experimento de retrodispersión, es necesario mantener parámetros como la fuente implementada ( $^{137}\text{Cs}$ ) y el tiempo de medida de una hora. Se toma un único espectro para la configuración de muestras descrita, pero éste se analiza suponiendo que se tiene un mortero uniforme de grosor total 4.28 cm, pues se pretende identificar una anomalía en la estructura supuesta al obtener valores distintos de lo esperado para un mortero de este grosor. De llegar a identificarse alguna anomalía, el siguiente paso es determinar el grosor real del mortero, equivalente al grosor de las dos láminas implementadas, y comparar los cálculos resultantes con el valor real medido.

### 3.3.2. Resultados y análisis

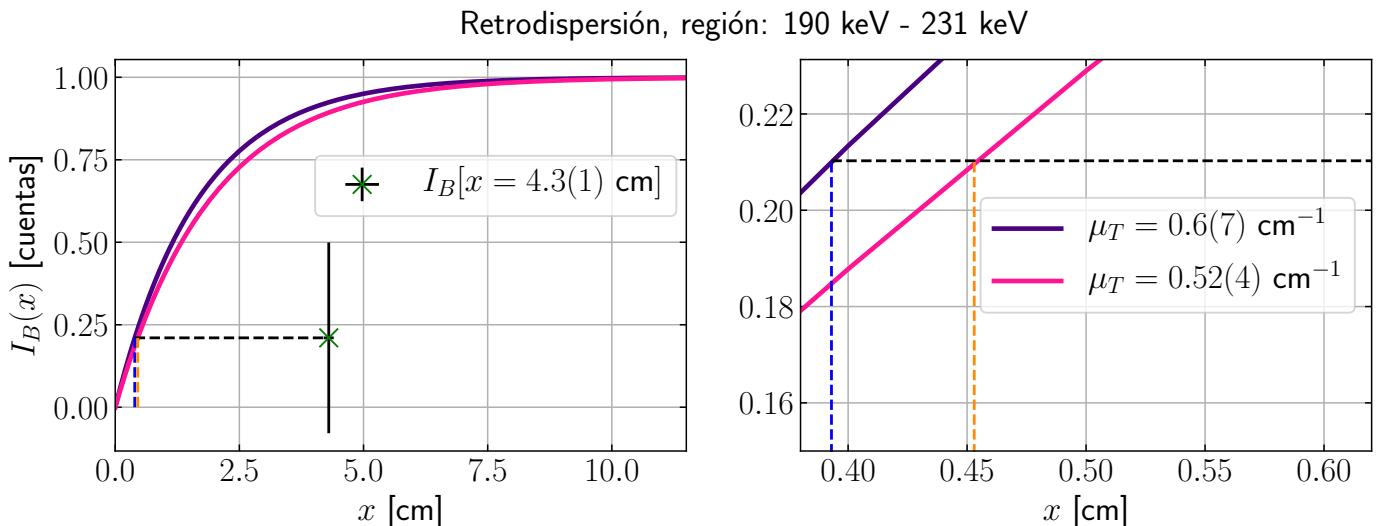
Se realiza una calibración de canales a energía para espectro resultante, con ella, se hace la selección de las correspondientes regiones de retrodispersión y, en cada una de ellas, se obtiene el número de cuentas totales, asociadas a la intensidad medida en ese rango de energías.

Para calcular la intensidad retrodispersada  $I_B$  por la configuración de muestras implementada en cada región de retrodispersión, a la intensidad medida  $I_M$ , se le resta una intensidad de referencia  $I_R$ , la cual fue previamente tomada en el experimento de retrodispersión para un grosor  $x = 0$  cm sin ninguna muestra de mortero. Siendo  $I_B = I_M - I_R$  un valor cuya dependencia con el grosor de la muestra es descrita por el modelo propuesto en (1-7)

$$I_B(x) = i_0 [1 - e^{-\mu_T x}] ,$$

es posible comparar el valor hallado respecto a la predicción teórica, y, con ello, observar qué información es posible extraer de la configuración de muestras. La predicción teórica variará de acuerdo a los parámetros  $\mu_T$  e  $i_0$  en cada región escogida.

#### Región de interés: 190 keV - 231 keV



**Figura 3-11:** Posición de  $I_B[x = 4.3(1) \text{ cm}]$  (intensidad retrodispersada de la configuración de muestras de la Figura 3-10) respecto a las curvas de predicción teórica del ajuste experimental (línea morada) y del cálculo obtenido con los datos del NIST (línea rosada). Las líneas punteadas, azul y naranja, señalan la correspondencia en  $x$  de la intensidad medida, según cada predicción teórica.

Para esta región se obtuvo una intensidad de saturación  $i_0 = 161855 \pm 42266$  cuentas, parámetro que describe la intensidad máxima que, después de cierto grosor, cierto material puede retrodispersar con cierto tiempo de medida. Además, se determinaron tres valores del parámetro  $\mu_T$ , un valor del ajuste de datos experimentales de retrodispersión y dos obtenidos mediante cálculo teórico, a partir de datos experimentales de transmisión y datos de la base de datos NIST, pero, debido a que dos de estos coinciden, es posible obtener solo dos curvas de valores esperados, las cuales son normalizadas respecto al valor  $i_0$ .

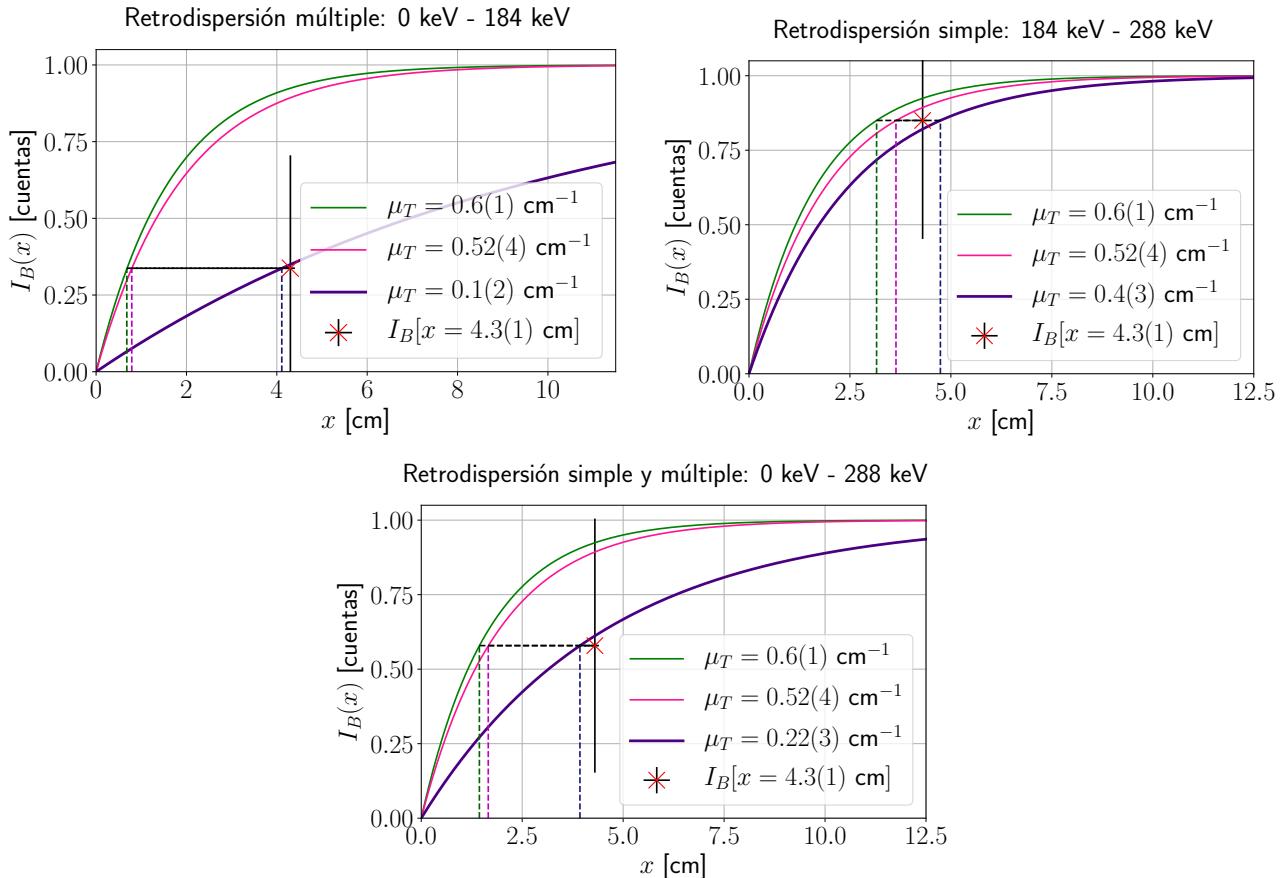
La intensidad medida en esta región para la configuración de muestras fue de  $I_M = 11194236 \pm 3345$  cuentas, mientras que la intensidad de referencia es de  $I_R = 11160202 \pm 3340$  cuentas, lo que implica un aporte resultante en la intensidad retrodispersada de  $I_B = 34034 \pm 46784$  cuentas. Para comparar gráficamente este valor con respecto a las curvas teóricas, el valor  $I_B$  es re-escalado dividiéndose por el factor de normalización  $i_0$ .

La gráfica obtenida en la Figura 3-11 muestra cómo el valor de intensidad obtenido para la configuración de muestras no coincide con ninguna de las curvas teóricas en este grosor, de modo que para dicho valor se calculan los posibles valores de grosor a los que puede estar asociado, según la predicción de cada curva, despejando  $x$  de la relación grosor intensidad

$$x = -\frac{\ln(1 - \frac{I_B}{i_0})}{\mu_T}, \quad (3-8)$$

se obtiene, para  $\mu_T = 0.6(7) \text{ cm}^{-1}$ , el coeficiente de atenuación total hallado del ajuste experimental, un grosor  $x = 0.4(8) \text{ cm}$ ; mientras que para  $\mu_T = 0.52(4) \text{ cm}^{-1}$ , calculado a partir de la base de datos NIST, se llega a una correspondencia de intensidad para el grosor  $x = 0.5(7) \text{ cm}$ . El error respecto al valor real  $2.3(1) \text{ cm}$ , para ambos, es del 78 % y 83 %, lo que muestra que, aunque es posible identificar una anomalía muy específica del material como puede ser el grosor aparente, no se llega a una cercana aproximación del valor real del grosor.

### Región de retrodispersión simple y múltiple



**Figura 3-12:** Curvas de predicción teórica del ajuste experimental (línea morada), del cálculo obtenido con los datos del NIST (línea rosada) y con los datos del experimento de transmisión (línea verde), para distintas regiones de retrodispersión. Las líneas punteadas, señalan la correspondencia en  $x$  (grosor) de la intensidad retrodispersada medida para la configuración de muestras, según cada predicción teórica.

Si se repite el análisis previo en las demás regiones de retrodispersión, se obtienen otros posibles valores del grosor correspondiente a la intensidad medida para la configuración de muestras. Se supone que, además del parámetro de ajuste  $\mu_T$  hallado de forma experimental, los valores teóricos calculados para este son válidos en las demás regiones de energía, y describen una propia predicción teórica, como exhibe la Figura 3-12. En ella se observa que el valor central de la medición experimental  $I_B$ , evaluada en  $x = 4.3(1)$  cm, coincide de manera muy cercana con la predicción teórica del ajuste experimental en las 3 regiones consideradas, por lo que no es posible identificar una anomalía en la suposición del grosor. Por otra parte, si  $I_B[x = 4.3(1)$  cm] se compara con las otras 2 predicciones teóricas de cada

región, la anormalidad sería solo identificable en la región de retrodispersión múltiple.

Para un análisis más detallado de los parámetros de ajuste de cada región y los valores de grosor que se obtienen a partir de ellos y, haciendo uso de la relación (3-8), se consignan los resultados obtenidos y su error correspondiente en una tabla.

		Region de retrodispersión								
		Múltiple			Simple			Simple y Múltiple		
$I_B$	[cuentas]	$152980 \pm 166924$			$202407 \pm 94678$			$55387 \pm 261602$		
$i_0$		$453438 \pm 374608$			$238164 \pm 65505$			$613767 \pm 34166$		
		Exp T.	NIST	Ajuste	Exp T.	NIST	Ajuste	Exp T.	NIST	Ajuste
$x$	[cm]	0.7(9)	1(1)	4(6)	3(4)	4(5)	5(7)	1(2)	2(2)	4(5)
$x_{\text{err}}$	%	69.5	56.5	73.9	30.4	73.9	117.4	56.5	13.0	73.9

**Tabla 3-4:** Valores del parámetro de ajuste  $i_0$  e intensidad retrodispersada por la configuración de muestras  $I_B$  para cada región de retrodispersión, y en ellas, el cálculo estimado del grosor  $x$ , según la correspondencia en intensidad de cada curva de predicción teórica, en conjunto al error porcentual respecto al grosor real.

Los resultados en la Tabla 3-4 muestran tanto incertidumbres como errores muy grandes en la determinación del grosor  $x$  de mortero; el único valor cercano al real es el calculado con el parámetro  $\mu_T$  del NIST en la región de retrodispersión simple y múltiple, con un error del 13 %. Pero, considerando el gran rango de valores para el grosor que se obtuvieron en estas regiones, para las distintas predicciones teóricas, no se logra acertar con efectividad un grosor de mortero cercano al real.

# **4 Conclusiones y recomendaciones**

## **4.1. Conclusiones**

Mediante el experimento de transmisión de rayos gamma sobre morteros fue posible determinar el comportamiento del coeficiente de atenuación del mortero en función de la energía, con dos parámetros,  $\alpha = 4(1)$  y  $n = 0.48(4)$ , válidos dentro del rango de energías 122 keV a 1332.49 keV. En ese sentido se hizo la determinación experimental de 8 coeficientes de atenuación, para diferentes energías, cuya diferencia porcentual fue baja respecto a los valores encontrados en la base de datos.

Por el contrario, en el experimento de retrodispersión de rayos gamma en mortero, la determinación del comportamiento de la intensidad retrodispersada, en función del grosor del material, dependió de la región de energías analizada, pues el modelo teórico propuesto que describe este comportamiento, coincidió con los resultados experimentales de manera evidente únicamente en la región de retrodispersión total, que abarca desde los 0 keV a 288 keV. Mientras que en el resto de regiones de análisis la dependencia entre grosor e intensidad fue menos clara, por causa de las grandes incertidumbres que se manejaban. Pese a esto, en la región de interés (denominada así pues con base en ella se desarrolló el modelo teórico propuesto) se encontró que los resultados obtenidos experimentalmente fueron consistentes con los que se calcularon a partir de los resultados en el experimento de transmisión. Para ambos casos se encontró  $\mu_T = 0.6 \text{ cm}^{-1}$ , esta región abarca las energías desde 188 keV hasta 238 keV.

Al explorar el método diagnóstico de la integridad estructural del material, mediante retrodispersión, se encontró que, bajo una suposición estimada del grosor del mortero, es posible identificar una anormalidad de la estructura como, por ejemplo, que entre dos capas de mortero haya un grosor vacío. Lo anterior fue válido únicamente para la región de energías entre 188 keV y 238 keV, denominada anteriormente región de interés, pues, en las demás regiones de retrodispersión consideradas, el rango de valores que cubre la incertidumbre del valor de intensidad retrodispersada por el grosor de mortero supuesto, se ubica dentro de los valores de la predicción teórica, imposibilitando la detección de cualquier anormalidad. Asimismo, en los casos donde se empleó la relación (3-8) para estimar el verdadero grosor de las muestras empleadas, los valores calculados discrepan mucho de la realidad, llegando a tenerse una serie de resultados con incertidumbres muy grandes que, además, fluctuaban en

un rango muy amplio de valores como se registró en la Tabla 3-4. Esto no implica que el modelo propuesto no funcione, pero sí deben de tomarse mejores datos experimentales, ya que los utilizados no cuentan con el nivel de calidad necesario para hacer una exploración profunda y consistente del método diagnóstico deseado.

## 4.2. Recomendaciones

El mayor inconveniente se encontró en el desarrollo del método diagnóstico, pues los espectros tomados en los experimentos de retrodispersión considerados, no presentaron las cuentas requeridas para un análisis de suficiente precisión. En principio, se planteó resolverlo aumentando, hasta tres veces más, los tiempos de medida por espectro, sin embargo experiencias previas han mostrado como la electrónica del TB-5, encargada de procesar los datos del detector de yoduro de sodio  $3'' \times 3''$ , varía en el procesamiento de datos respecto al tiempo, es decir que, para una misma muestra en un mismo tiempo de medida, pueden resultar espectros distintos en la distribución de canales, y, aunque pretendió contrarrestarse tal error reduciendo el tiempo de medida entre el primer y último espectro, se sacrificó el tiempo de medida por espectro, aumentando la incertidumbre. Una alternativa posible sería aumentar, ligeramente, el tiempo de medida por espectro, lo suficiente para alcanzar a tomar la mayor cantidad posible de datos en un mismo día. Si ello no mejorara los resultados, otra alternativa más drástica sería emplear otra electrónica con el detector.

De ser posible obtener datos de retrodispersión más precisos, el estudio del comportamiento entre intensidad retrodispersada y grosor puede mejorar en suficiente medida para determinar parámetros de ajuste  $\mu_T$  y  $i_0$  con menor incertidumbre. Esto implica que, de coincidir los valores experimentales con la predicción teórica, se puede determinar también un valor característico de los materiales, denominado distancia de saturación, grosor en el que se alcanza la mayor intensidad que cierta configuración del material puede retrodispersar hacia el detector, en otras palabras, el grosor donde se alcanza el valor de intensidad  $i_0$ .

Aunque los coeficientes de atenuación lineal hallados en el experimento de transmisión tuvieron, en general, una diferencia porcentual baja respecto a los de referencia, los coeficientes de las energías asociadas a las fuentes de  $^{137}\text{Cs}$  y  $^{22}\text{Na}$  (pertenecientes al grupo *fuentes1*) tuvieron diferencias porcentuales mayores al resto, y, aunque el tiempo de medida de estas últimas fue mayor, las *fuentes1* son más activas, por lo que la incertidumbre debida al número de cuentas no es un factor a tener en cuenta. Es por eso importante analizar en posteriores trabajos cuáles fuentes, y en qué energías de emisión, son las más aptas para calibración en experimentos de transmisión.

# Bibliografía

- [1] William R. Leo. *Techniques for nuclear and particle physics experiments: a how-to approach.* Springer Science & Business Media, 2012.
- [2] Gordon R. Gilmore. *Practical Gamma-ray Spectrometry.* Segunda Edición, John Wiley & sons Ltd, 2008.
- [3] Mauricio García Castañeda y Jeannine Ewert De-Geus. *Introducción a la física moderna.* Tercera Edición, Editorial Universidad Nacional de Colombia, 2003.
- [4] F. Cristancho. Instrumentación Nuclear NOTAS DE CLASE, 2019.
- [5] A. Serrano. Desarrollo de un método para la determinación de densidad de muestras en arena con retrodispersión, 2017.
- [6] D. Flechas, E. Fajardo, and F. Cristancho. The application possibilities of the gamma-ray compton backscattering technique. In *AIP Conference Proceedings*, volume 1529, pages 40-44.AIP, 2013.
- [7] F. Cristancho, comunicación privada.
- [8] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Determinación de la resistencia de morteos de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm ó 50,8 mm de lado, NTC220. Bogotá D.C.: El instituto. 2004.
- [9] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Cementos. Arena normalizada para ensayos de cemento hidráulico, NTC 3937. Bogotá D.C.: El instituto. 2016.
- [10] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Ingeniería civil y arquitectura. Mezcla mecánica de pastas de cemento hidráulico y morteros de consistencia plástica, NTC 112. Bogotá D.C.: El instituto. 2001.
- [11] National Institute of Standards and Technology NIST. Xcom nist.element compound mixture selection. url <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>