



**PREPARACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE POLIURETANOS COMPUESTOS
DE ESCORIA PARA APLICACIONES EN ATENUACIONES RADIOLÓGICAS**

MARTHA LORENA NARVÁEZ QUINTERO

**UNIVERSIDAD ECCI
FACULTAD INGENIERÍA
PROGRAMA INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ, D.C.
2017**

**PREPARACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE POLIURETANOS COMPUESTOS
DE ESCORIA PARA APLICACIONES EN ATENUACIONES RADIOLÓGICAS**

MARTHA LORENA NARVÁEZ QUINTERO

**PROYECTO DE GRADO PRESENTADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
INGENIERA MECÁNICA**

Director(a) de proyecto

**LIBARDO ENRIQUE MENDOZA GENEY
Ing. Mecánico, MSc, Ph.D**

Co-director(a) de proyecto

**MARYLUZ MORENO RUEDA
Química, MSc, Ph.D**

**UNIVERSIDAD ECCI
FACULTAD INGENIERÍA
PROGRAMA INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ, D.C.
2017**

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C., Abril de 2017

DEDICATORIA

A Dios por absolutamente todo lo que me ha dado, tantos privilegios y amor incondicional.

A mi ángel hermosa, mi madre, mi luz, mi fortaleza, mi camino y mi esperanza. Cada éxito por ella y para ella.

A mi padre por su apoyo permanente en la construcción de mis sueños. A mi hermano, mi soporte, mi familia, mi mejor amigo.

Y a mis amigos, por su cariño, su comprensión y su apoyo en mi crecimiento.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a Dios por todas sus bendiciones y ser luz en todos los capítulos de mi vida. A mi familia, por estar siempre a mi lado, por los valores y el amor brindado a lo largo de estos años.

A la doctora Maryluz Moreno, por darme la oportunidad de trabajar a su lado, por todo el tiempo dedicado a realizar mi proyecto profesional, por ser un ejemplo de vida, una tutora increíble, por compartir sus conocimientos, su sabiduría y su paciencia. Hoy y siempre mil gracias.

Al doctor Libardo Mendoza por sus enseñanzas, su apoyo permanente, sus sugerencias y su ayuda brindada.

A los jefes de laboratorios de Ingeniería Mecánica y Química, por su amable colaboración y su compromiso con el desarrollo de nuevos proyectos en la Universidad ECCI.

Al docente Bernardo Ruiz por su apoyo en la obtención y caracterización de la escoria en la Compañía General de Aceros, al docente Harley Martinez por su colaboración para realizar la caracterización de atenuación en el Instituto Nacional de Cancerología y al docente Leonardo Ramirez por el apoyo y sugerencias brindadas.

A los Ingenieros Andrés Guevara y Carlos Cristancho por su voto de confianza, sus enseñanzas, su amistad y por contribuir en mi crecimiento laboral.

A los docentes de Ingeniería Mecánica de la Universidad ECCI, quienes se tomaron el trabajo de revisar el proyecto, además de sus enseñanzas en estos cinco años, por ser la base de mi profesión y por compartir sus conocimientos de una manera tan grata a sus estudiantes.

A mis compañeros de trabajo en la Universidad ECCI, por impulsarme a continuar en momentos difíciles, por su paciencia y por compartir sus conocimientos conmigo.

Y a mis amigos que siempre estuvieron pendientes de mi trabajo de grado, por ser un apoyo infinito en la construcción de mis sueños. Mil gracias.

TABLA DE CONTENIDO

1. TÍTULO DE LA INVESTIGACIÓN	9
2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	9
2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	9
2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	10
3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	10
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	10
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	10
4. JUSTIFICACIÓN Y DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	11
4.1. JUSTIFICACIÓN	11
4.2. DELIMITACIÓN.....	11
5. MARCO DE REFERENCIA DE LA INVESTIGACIÓN	12
5.1. MARCO TEÓRICO	12
6. DISEÑO METODOLÓGICO.....	26
7. RESULTADOS	36
9. REFERENCIAS (BIBLIOGRAFÍA).....	48

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Compuestos del Poliuretano [9-10] [10].	12
Tabla 2. Propiedades de espumas flexibles de poliuretano según su base de poliol [9].	14
Tabla 3. Propiedades típicas de espumas rígidas de poliuretano [9].	15
Tabla 4. Nombres y fórmulas de compuestos Isocianato [13].	16
Tabla 5. Métodos de preparación espumas [9] [13].	17
Tabla 6. Materiales atenuadores para diferentes tipos de radiación [17].	20
Tabla 7. Composición química típica de escoria negra [23].	22
Tabla 8. Composición química de escoria blanca [22].	23
Tabla 9. Composición química de escorias de alto horno [24].	24
Tabla 10. Experimentos para caracterización	26
Tabla 11. Resultados de la composición química de escoria proveniente de acero SAE 1045	36
Tabla 12. Propiedades mecánicas a compresión	43
Tabla 13. Porcentajes de atenuación del poliuretano compuesto de escoria	43
Tabla 14. Porcentaje de atenuación cambiando la variable de kilovoltaje máximo (kvp)	44
Tabla 15. Coeficientes de atenuación lineal	45
Tabla 16. Coeficientes de atenuación lineal variando el kxp	45

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Espectro electromagnético [14]:.....	18
Figura 2. Medidas probetas rectangulares	27
Figura 3. Escoria proveniente de acero SAE 1045 con y sin molienda	27
Figura 4. Influencia del polvo de escoria en la tonalidad del poliuretano	28
Figura 5. Componentes de un Microscópio electrónico de Barrido [31].....	30
Figura 6. Microscopio electrónico de barrido Phenom ProX de la Universidad ECCI	31
Figura 7. Probetas para ensayo de compresión	32
Figura 9. Ensayo de compresión	32
Figura 8. Máquina Universal de ensayos de la Universidad ECCI.....	33
Figura 10. Analizador de rayos X marca RaySafe X2 con sensor R/F	34
Figura 11. Tubo de rayos X marca General Electric.....	34
Figura 12. Caracterización de atenuación	35
Figura 13. Muestras para SEM provenientes de probetas originales.....	37
Figura 14. Resultados imágenes SEM tomadas en 240x y 1000x	38
Figura 15. Gráfica Atenuación vs % de escoria	44

1. TÍTULO DE LA INVESTIGACIÓN

Preparación y caracterización de poliuretanos compuestos de escoria para aplicaciones en atenuaciones radiológicas.

2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La industria nuclear y el sector de la medicina representan unas de las fuentes de mayor exposición a la radiación ionizante por el tipo de equipos y reactivos que utilizan para diversas aplicaciones ligadas a la producción de energía o al diagnóstico médico en humanos. La exposición a radiaciones ionizantes tiene efectos dañinos en la salud de los humanos, de acuerdo a la dosis absorbida o dosis recibida, puede afectar el funcionamiento de órganos y tejidos, enrojecimiento de la piel, quemaduras, caída del cabello, síndrome de irradiación aguda, mutaciones, cáncer o la muerte [1]. Es por esto, que se hace necesario una protección en los humanos y en los equipos contra este tipo de radiaciones, por lo cual se utilizan materiales atenuadores que realizan un blindaje contra las radiaciones reduciendo la energía que va a pasar a través de este material. Los materiales más comunes para protección en radiación ionizante son el plomo, acero, y concreto, siendo el plomo el de mayor importancia y uso en esta aplicación por su alta densidad, alto número atómico, maleabilidad y bajo costo [2] [3] [4]. Sin embargo, una de las mayores dificultades del plomo es su toxicidad para el ser humano y ha sido una de las causas de las más relevantes enfermedades profesionales [5]. Intoxicaciones y absorción de éste material por diferentes vías, como la respiratoria y digestiva, pueden provocar deficiencia en el desarrollo neurológico, agudeza auditiva, dificultades en motricidad, anemia, fatiga, parálisis y cólicos [5].

Es por esto, que se busca un material con propiedades atenuadoras libre de plomo para aplicaciones radiológicas, y que en lo posible se le pueda dar un valor agregado. Es así como la escoria de acero en diferentes artículos ha demostrado tener propiedades en atenuaciones de radiaciones ionizantes, en su gran mayoría por medio de simulaciones que han realizado diferentes investigadores en el mundo [6]. A pesar de ser un desecho en la industria siderúrgica [7].

En Colombia, en el año 2012 la producción total de aceros fue de 1.266.000 toneladas [8], distribuidas en diferentes plantas, lo que indica una importante producción de escoria, la cual es un desecho y no se realiza un procedimiento para darle un mayor valor agregado y mayor aún es el impacto ambiental que éstas producen si tienen una disposición final inadecuada, pues al dejarse en vertederos se acumulan y pueden ser fuente de enfermedades, contaminación y algunas

escorias contienen metales pesados en su composición química que pueden ser tóxicas para los humanos [8].

Por todo lo anterior con el desarrollo de este estudio se busca darle un valor agregado a un desecho contaminante producto de la fabricación del acero que provoca graves impactos ambientales, y usarlo en aplicaciones de atenuaciones en radiaciones ionizantes.

2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Es viable utilizar poliuretanos compuestos de escoria para aplicaciones en atenuaciones radiológicas?

3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. OBJETIVO GENERAL

Caracterizar poliuretanos compuestos de escoria para aplicaciones en atenuación radiológica.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Preparar poliuretanos compuestos de escorias provenientes de un acero SAE (Society of Automotive Engineers) 1045.
- Caracterizar poliuretanos compuestos de escorias mediante propiedades fisicoquímicas y físico-mecánicas.
- Determinar la viabilidad del uso de poliuretanos compuestos de escoria en atenuaciones radiológicas.

4. JUSTIFICACIÓN Y DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. JUSTIFICACIÓN

Debido a los problemas que presenta el plomo como material atenuador de radiaciones ionizantes por su alto nivel de toxicidad, su peso y costo, se busca una opción para obtener atenuaciones en aplicaciones radiológicas libre de plomo y contribuir a darle un valor agregado a las escorias del acero, que presenta impactos ambientales altos.

El desarrollo de este proyecto en relación con la preparación y caracterización de poliuretanos con escoria de acero para aplicaciones en radiaciones ionizantes proporciona los siguientes beneficios:

- Materia de costos:
 - Economía en su fabricación.
 - Ahorro en materia prima.
 - Valor agregado a un desecho de la industria.

- Impacto ambiental:
 - Reducción del uso de plomo para atenuaciones de radiaciones ionizantes.
 - Aprovechamiento de espacios vertederos de escoria.

- Impacto social:
 - Reducción de intoxicaciones por plomo como enfermedad profesional.
 - Reducción de enfermedades ligadas al impacto ambiental de los vertederos.

Por lo tanto, esta investigación es importante porque puede permitir el desarrollo y caracterización de un nuevo material que hasta el momento no ha generado publicaciones científicas a nivel nacional similares al desarrollo de un material para atenuaciones radiológicas con escoria. El proyecto es exploratorio y por ende podría generar publicaciones científicas, y establecer las bases iniciales para futuros desarrollos en este campo.

4.2. DELIMITACIÓN

Se prepararon poliuretanos compuestos de escoria, y sólo se caracterizaron mediante pruebas fisicoquímicas, físico-mecánicas y se evaluó su viabilidad en aplicaciones de atenuación radiológica.

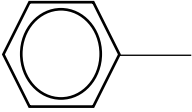
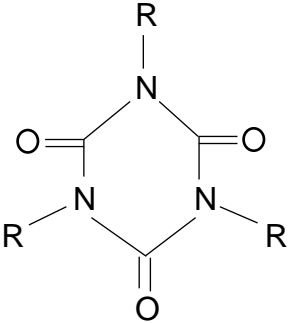
5. MARCO DE REFERENCIA DE LA INVESTIGACIÓN

5.1. MARCO TEÓRICO

5.1.1. POLIURETANOS

Los poliuretanos son polímeros especiales que contienen el grupo uretano en la cadena principal, es decir, además del grupo uretano puede contener: ésteres, aromáticos, amidas, éteres, y grupos isocianurato [9].

Tabla 1. Compuestos del Poliuretano [9-10][10].

Nombre	Fórmula general
Uretano	$\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{R}-\text{N}-\text{C}-\text{O}-\text{R} \\ \\ \text{O} \end{array}$
Éster	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \\ \text{R}-\text{C}-\text{OR}' \end{array}$
Aromático	
Amida	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \\ \text{R}-\text{C}-\text{NH}_2 \end{array}$
Éter	$\text{R}-\text{O}-\text{R}$
Isocianurato	

Los poliuretanos se producen por la reacción de un diisocianato y un reactivo con más de un grupo hidroxilo, el cual puede ser un poliol [9]. Las fuentes de grupos hidroxilo para casi todos los usos comerciales de polímeros de uretano son poliéteres, poliésteres, y los aceites de origen natural tales como aceite de ricino [9]. El poliuretano puede ser termoplástico o termoestable según la estructura química que tenga, y según su estructura física puede ser una espuma, sólido rígido o elastómero [9]. Los poliuretanos son especies versátiles debido a que su composición química puede variar dependiendo de la especie y el origen del poliol y el isocianato [9].

Entre las propiedades más importantes de los poliuretanos se encuentra que es: espumable, resistente a la abrasión, resistente a la corrosión, a los hongos, a la humedad a los ácidos y a las bases [9]. Tiene una resistencia a la tensión de $3,4 a - 24,6 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$, una resistencia a la compresión de $0,8 a - 20,7 \times 10^2 \text{ kg/cm}^2$, una resistencia a la flexión de $4,2 a - 42,2 \times 10^2 \text{ kg/cm}^2$ y una dureza de A55–A95 Rockwell. La temperatura más alta que puede alcanzar para su uso es aproximadamente los 220°F (104°C) [9].

Clasificación

De acuerdo a su aplicación se pueden dividir en 7 tipos de poliuretanos: bloques flexibles (Muebles, Industria automotriz, textiles para camas, alfombras, soportes), espumas moldeadas flexibles (Industria automotriz y textiles para camas), espumas rígidas (Industria automotriz, electrodomésticos y aislamiento), elastómeros sólidos (elastómeros, revestimientos, adhesivos e Industria médica), moldeo por inyección de reacción (RIM) (Industria automotriz), soportes (tapicería) y las formulaciones de dos componentes (encapsulados, sellantes) [9]. Sin embargo los de mayores aplicaciones son:

Espumas flexibles de poliuretano: se utilizan en gran medida en asientos y cojines en la industria automotriz, refuerzo de alfombras y cojines, textiles para las camas, muebles, y envases [9] [10] [11]. Su gran producción y éxito se debe a propiedades como su peso ligero, mayor resistencia mecánica y facilidad de fabricación en comparación con la espuma de látex [9]. Se ha convertido en un material de gran uso en la industria de muebles debido a la escasez de madera y mano de obra calificada [9]. Además, por su durabilidad, libertad de olor, propiedades no alergénicas, facilidad de limpieza, resistencia a aceites, el uso como sustituto de pelo de animales en colchonería y cojinería [9].

Las espumas flexibles tienen celdas abiertas, lo que permite la libre circulación del aire y les da su característica de flexibilidad, su densidad es de $458,9482 - 136,708 \text{ kg/m}^3$ [9]. Sus principales características están controladas por la densidad, el tamaño, la forma, la textura, el método de producción, y las variaciones en las

cantidades de productos químicos auxiliares [9]. Se caracterizan por tener excelentes propiedades de aislamiento acústico, baja conductividad térmica, y buena resistencia a la mayoría de los disolventes y detergentes. Pero tienen baja resistencia a los ácidos fuertes y álcalis cuando están calientes. Su resistencia a la tensión a base de poliéster es mayor que en poliéter, y oscila entre 1,5–2,4 kg/cm^2 [9]. Sus propiedades se registran en la siguiente tabla.

Tabla 2. Propiedades de espumas flexibles de poliuretano según su base de polioli [9].

Propiedad mecánica	Base Poliéter	Base Poliéster
Densidad (kg/m^3)	478,47 - 136,708	458,9482 - 136,708
Compresión a 90% de deformación permanente	2-10	6-15
Tensión (kg/cm^2)	0,55-1,6	1,5 - 2,4
Elongación (%)	100-280	200-450

Espumas rígidas de poliuretano: Se utilizan en gran medida en la Industria de refrigeradores congeladores, camiones frigoríficos, contenedores refrigerados, almacenes refrigerados, etc [9] [10] [11]. Son de gran aplicabilidad en esta industria por sus propiedades de aislante térmico y por su capacidad de ahorrar energía [9] [10] [11]. Además, tienen un alto porcentaje de celdas cerradas que le proporcionan características únicas, como dejarse preparar a temperatura ambiente sin necesidad de aumentar la temperatura, adherirse a diferentes materiales como resinas termoestables, espumas, acero, madera y fibras, son resistentes al aceite, petróleo y otros disolventes, y su densidad puede variar entre 20 a 3000 kg/m^3 [10]. El mayor mercado de espuma rígida de poliuretano es la industria de la construcción [9] [10] [11]. Se usa en paneles rígidos preformados y aislamiento de cubiertas, ya sea rociado o en paneles preformados. Puede ser aplicable en casas residenciales, edificios, o industrias [9] [10] [11]. La espuma rígida de poliuretano también tiene aplicaciones marinas, en equipos de flotación, en barcos modernos para mantener el barco en el agua. En buques más grandes se utiliza para relleno de huecos, botes salvavidas y buques frigoríficos [9] [10].

Las propiedades que tienen en común las espumas de poliuretano rígidas de poliéter y poliéster son la capacidad de espumar mediante el vertido, versatilidad en las propiedades físicas, alta resistencia, peso ligero, resistente al calor, buena adhesión al metal, madera, vidrio y cerámica [9].

Las variables que afectan las propiedades físicas de las espumas rígidas y pueden aumentar la capacidad de carga son [9]:

1. Contenido de isocianato.
2. Funcionalidad de la mezcla de isocianato.
3. Concentración de polioxipropileno triol.

En la siguiente tabla se muestran las típicas propiedades de las espumas rígidas.

Tabla 3. Propiedades típicas de espumas rígidas de poliuretano [9].

Propiedad	Espuma rígida de poliuretano
Densidad (kg/m^3)	73,23 – 9,76
Resistencia a tensión (Kpa)	206,84 – 275,79
Resistencia a la compresión paralela al crecimiento de la espuma (Kpa)	137,89 – 310,26
Resistencia a la compresión paralela al crecimiento de la espuma (Kpa)	68,94 – 172,36

COMPONENTES DEL POLIURETANO

Poliol: Es uno de los dos componentes del poliuretano generalmente líquido, que proporciona el grupo hidroxilo en la reacción exotérmica que se produce en su formación, e influye de manera decisiva en las propiedades del poliuretano final. Casi todos los polioles comerciales tienen su origen en poliéteres, poliésteres o aceites de origen natural. Los poliéteres son los más usados ya que proporcionan diversas estructuras moleculares en cuanto a la funcionalidad de hidroxilo [9] [10].

La elección del poliol de acuerdo a su origen, influye de manera relevante en las propiedades físicas de la espuma resultante. El poliol determina tres parámetros importantes, como la estructura física de la espuma, es decir si será rígida o flexible, si va a ser frágil o quebradiza, y el alcance de su permeabilidad al gas y la humedad [9] [10].

El poliol se combina con el isocianato y forma una red de polímero que proporciona la estructura y propiedades características de la espuma rígida. Las características más importantes del poliol son su peso equivalente, funcionalidad, y la rigidez o flexibilidad de unidades de cadena [9].

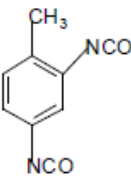
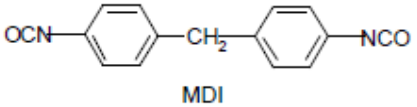
Usualmente los poliéteres dan espumas más suaves, resistentes, con una mejor resistencia a la hidrólisis que los poliésteres. Mientras que las espumas a base de poliéster pueden tener mayor resistencia a la tracción y una mejor resistencia a los

aceites, disolventes, y la oxidación. Con cualquier tipo de polioliol, un aumento en el grado de ramificación da como resultado un aumento de la capacidad de soporte de carga y el alargamiento inferior [9].

Isocianato: Es uno de los dos componentes del poliuretano generalmente líquido, el cual contiene el grupo NCO que reacciona con el polioliol para la formación del poliuretano [9] [12]. Tiene tres importantes funciones, la primera es reaccionar con el agua para formar CO₂, el cual es el gas necesario para que las espumas se formen, la segunda es proporcionar el calor necesario para vaporizar el agente de soplado y asegurar un buen curado de la espuma, éste calor se origina de la reacción exotérmica que se produce cuando se mezcla con el polioliol. La tercera, el isocianato produce enlaces urea [9] [12]. Los vínculos de poliurea proporcionan rigidez y resistencia térmica a la espuma [9] [12].

En espumas flexibles el isocianato se basa en diisocianato de tolueno (TDI), y para las espumas rígidas se utilizan isocianatos poliméricos de la diisocianato Metilen difenil (MDI) [12].

Tabla 4. Nombres y fórmulas de compuestos Isocianato [13].

Siglas	Nombre	Fórmula estructural
TDI	Diisocianato de tolueno	
MDI	Metilen difenil 4,4'-diisocianato	

MÉTODOS DE PREPARACIÓN

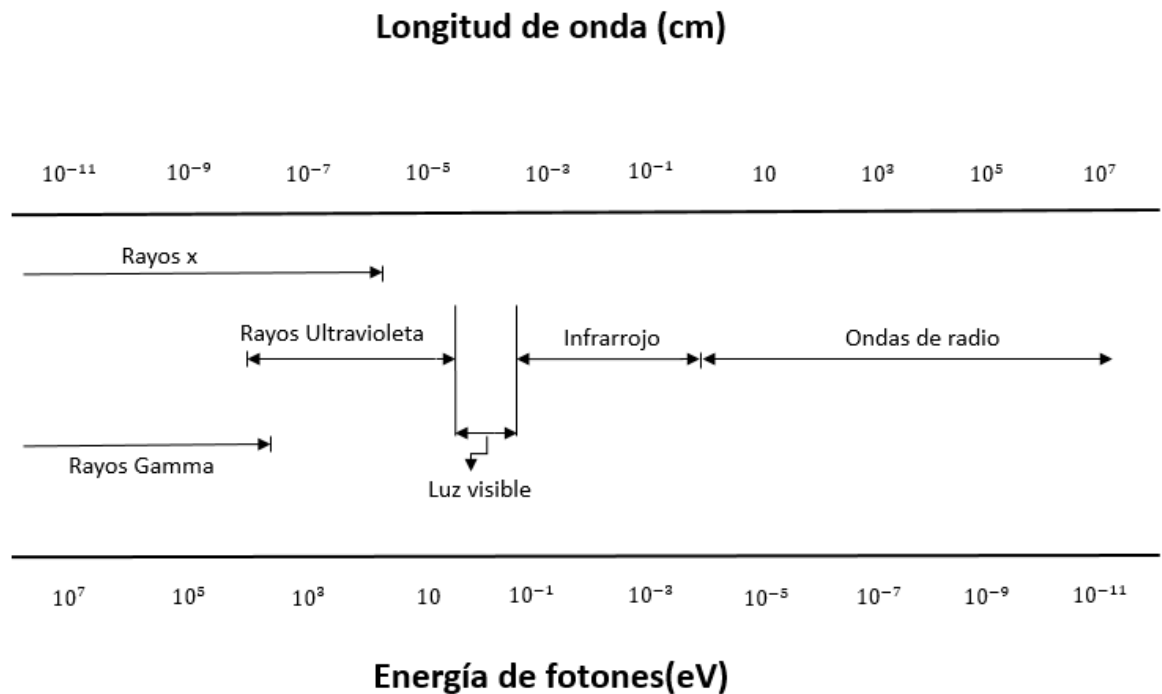
Tabla 5. Métodos de preparación espumas [9] [13].

Métodos preparación	Descripción
One shot (un solo paso)	Es una de las técnicas más antiguas y populares para preparación de espumas de poliuretano. Se inicia mezclando todos los componentes al mismo tiempo de manera manual o con un mezclador, se vierten en un molde o cavidad. La mezcla viscosa se extiende por los espacios de la cavidad e instantáneamente empieza a formarse la espuma. La espuma se deja curando por unas horas o días.
Prepolímero	Es una técnica muy popular basada en dos componentes, en el primer componente están todos los reactivos excepto el isocianato, éstos se pre-mezclan y posteriormente se unen con el segundo componente que es el isocianato para obtener la reacción exotérmica y se forme la espuma. La espuma se deja curando por unas horas o días.
Spray (Pulverización)	Es una técnica utilizada para aplicar en superficies planas tales como paneles, no es obligatoriamente necesario el uso de moldes o plantilla, sin embargo puede ser utilizada para llenado de moldes. Se utiliza especialmente en grandes áreas, como paredes o tanques. En ésta técnica se usa un equipo portátil que consta de una pistola que dispara por la boquilla la mezcla, para posteriormente formarse la espuma.

5.1.2 RADIACIÓN

La radiación es la emisión y propagación de energía en forma de ondas electromagnéticas o partículas. Las ondas de radiación varían en cuanto a su frecuencia y longitud de onda, se pueden describir según su posición en el espectro electromagnético. El espectro electromagnético está ordenado desde los más energéticos o ionizantes de izquierda a derecha, es decir rayos Gamma, rayos x, radiación ultravioleta, luz visible, radiación infrarroja y onda de radio, como se muestra en la figura 1 [14].

Figura 1. Espectro electromagnético [14]:



Para este proyecto los tipos de radiación de interés son las altamente ionizantes o energéticas, como son los rayos X y los rayos gamma [14].

Rayos X: Un rayo X se debe a transiciones de electrones de energía atómica, es decir, se forman por la interacción fuera del núcleo, de un átomo radiactivo, o de un electrón a medida que cambia de dirección cuando pasa un núcleo atómico [14] [15].

Rayos gamma: Un rayo gamma emana del núcleo de un átomo radiactivo, es decir, los rayos gamma son el resultado de las transformaciones que tienen lugar en el núcleo del átomo [15] [14].

Según la teoría cuántica, la radiación electromagnética se compone de paquetes de energía denominados fotones, los cuales viajan a la velocidad de la luz [14].

Hay diversos tipos de partículas de radiación:

Partículas Beta: Son electrones que han sido expulsados de un núcleo rico en neutrones. Se diferencian de un electrón solo porque es un producto de la

desintegración radiactiva. Son idénticas a los electrones, llevan una carga de $-1e$ [14] [2].

Partículas Alfa: Son las más pesadas, e idénticas al núcleo de un átomo de helio, compuesto por dos protones y dos neutrones, tienen una carga eléctrica de $2e$ [14] [2].

Positrones: Son iguales en masa a los electrones pero tienen una carga opuesta al electrón, es decir es de $+1e$ [14] [2].

Neutrones: Son aproximadamente iguales en masa al protón y no tienen carga eléctrica. [14] [2].

Unidades de medida para radiación: La cantidad de radiación recibida por un objeto es medida por diferentes unidades. Dado que la radiación interactúa con la materia por ionización o excitación de los átomos y las moléculas que componen el material, estas unidades son una medida de las cantidades resultantes de la ionización producida o la cantidad de energía depositada en el material [14] [16].

La unidad más antigua es el Roentgen, es una medida de la exposición y se define como $1 \text{ roentgen} = \text{la cantidad de rayos X que producen una ionización de } (1 \text{ esu/cm}^3)$ [14] [16].

Dosis absorbida: Una cantidad relevante para la discusión de los efectos de la irradiación y para medir la energía total absorbida por unidad de masa. Hay dos unidades, el Gray o el rad [14] [16].

$$1 \text{ rad} = 100 \text{ erg/g energy absorbed}$$

$$1 \text{ Gray (Gy)} = 1 \text{ Joule/kg} = 100 \text{ rad.}$$

La unidad del Gray es la más reciente de las dos y ha sido propuesta por la General Conference on Weights and Measures para reemplazar el rad [16].

Atenuación: Es la reducción de la intensidad de un flujo de fotones, es decir, la disminución de la tasa de dosis de radiación al pasar a través de un material [2].

Materiales atenuadores: La protección radiológica para materiales radioactivos o sitios de trabajos sometidos a radiación se determina de acuerdo a la cantidad de radiación a la que se someterá el área de trabajo y los alrededores, los cuales se deben mantener a niveles mínimos permisibles. La cantidad de blindaje la define la elección del material, la distancia de la zona de trabajo de la fuente y el tiempo

máximo que está habitado. La elección del material de protección se determina a partir del tipo de radiación y su energía [16].

Tabla 6. Materiales atenuadores para diferentes tipos de radiación [17].

<i>Tipo de Radiación</i>	<i>Protección</i>
Rayos Gamma	Materiales con Z (número atómico) alto como: el Plomo o el acero.
Electrones	Materiales con Z (número atómico) bajo, como el poliestireno, polimetilmetacrilato.
Positrones	Materiales con Z (número atómico) alto, como el Plomo o el acero.
Neutrones	Materiales hidrogenadas tales como el agua o parafina y con una capa de un material de número atómico alto como el Plomo o de otro material de número atómico alto con el fin de absorber los rayos gamma de las reacciones de captura de neutrones.

Algunos materiales son más adecuados que otros para un determinado tipo de radiación, pero el costo por lo general es un importante limitante para la elección del material de protección [16]. Los más utilizados son el plomo, y el acero, el agua, el hierro, la parafina y el concreto [16]. El plomo se utiliza por su alto número atómico, densidad y se puede moldear fácilmente para llevarlo a diversas formas. Cuando se requieren grandes cantidades de plomo, por lo general es más barato utilizar chatarra de hierro o acero. Para volúmenes muy grandes, los bloques de concreto son generalmente los más ventajosos a nivel de costo [16].

CONCRETO

Puede ser definido como la mezcla de un material aglutinante como el cemento Portland Hidráulico y unos materiales de relleno (agregados o áridos), agua y aditivos, los cuales al endurecerse forman un sólido compacto que después de cierto tiempo es capaz de soportar grandes esfuerzos de comprensión [17].

En el mundo se utiliza ampliamente como material de construcción por su versatilidad en cuanto a las formas que puede tomar, sus propiedades físicas, sus propiedades mecánicas, y su economía. Estas propiedades lo convierten en un competente muy fuerte frente construcciones de madera, mampostería o acero [17].

El concreto como material atenuador en aplicaciones radiológicas se utiliza en gran medida por su bajo costo, cuando se necesitan gran cantidad de material atenuador el concreto por ser más barato que el plomo [15] [3] [18]. Además por su alta densidad lo convierten en un material común para blindaje de radiaciones [15] [3] [18].

PLOMO

El plomo es un metal de color gris azulado, muy blando, maleable, resistente a la corrosión y el menos tenaz de todos los metales [19] [5]. Posee una gran densidad y se ubica en la tabla periódica como el más alto en densidad en el grupo IVA, es en un metal denso y tóxico [19] [5]. Se utiliza en revestimiento de cables, en la industria automotriz, la industria construcción, como atenuador de radiaciones altamente energéticas o ionizantes, entre otros [19] [5].

La gran dificultad del uso de plomo es su toxicidad. La intoxicación por plomo siempre ha sido una de las más relevantes enfermedades profesionales. Los riesgos más grandes se dan en sus procesos de fabricación y exposición, en la extracción minera de éste se absorbe una cantidad considerable de plomo a través del aparato digestivo, en las fundiciones de plomo, el riesgo más alto se da por los absorción de polvos de plomo en las actividades de trituración y molienda del plomo en seco [5]. También se producen altos riesgos en las demoliciones de puentes o estructuras de acero con pinturas a base de plomo, con frecuencia se producen casos de intoxicación por plomo [5].

5.1.3 ESCORIA

Es un subproducto de la industria de acero que surge al final del proceso de fabricación del acero. Se forma debido a las reacciones químicas que se presentan en la formación de los metales. Principalmente está formado por hierro, óxidos, silicato de magnesio y calcio [20] [7] [8].

CLASIFICACIÓN

Según el horno en el cual se realizó el proceso de obtención del acero se encuentran diversos tipos de escoria.

Horno de arco eléctrico: en el proceso de fabricación del acero por horno de arco eléctrico la materia prima es la chatarra, por lo tanto se debe realizar una etapa de afino para limpieza final del acero, en éste proceso se pueden obtener dos tipos de escoria, que se originan en dos etapas diferentes [21] [22] [23] [8]. La primera es la etapa de fusión en la cual se funden las materias primas, en este proceso se

encuentran fases como la desfosforación, oxidación para eliminar magnesio y silicio, y donde se agrupan todas las impurezas resultantes. Como consecuencia de ésta etapa surge la escoria negra, de tonos oscuros, aspecto poroso y forma irregular. La segunda es la etapa de afino, la cual empieza en el horno eléctrico y termina en el horno cuchara, en ésta se encuentran fases de reducción del líquido fundido y eliminación de la mayor parte del azufre. La desoxidación definitiva se produce con la adición de ferroaleaciones de silicio y manganeso. Así se consigue formar en el baño metálico partículas líquidas, de óxido de manganeso (MnO) y luego de sílice (SiO₂) que posteriormente tienden a cohesionarse entre sí dando lugar a partículas de escoria blanca. Antes de colar el líquido fundido se quita la escoria blanca del acero, característica de color claro, y reducido tamaño de sus partículas [21] [22] [23] [8].

Escoria negra: su composición química depende del tipo de chatarra utilizada como materia prima del proceso de fabricación del acero. La siguiente tabla muestra los porcentajes de los compuestos de la escoria negra [22] [8].

Tabla 7. Composición química típica de escoria negra [23].

Compuesto	Porcentaje en masa (%)
CaO	22 - 60
Fe ₂ O ₃	38
SiO ₂	11 - 37
MgO	4 - 12
Al ₂ O ₃	2 - 8
Cr ₂ O ₃	1 - 8
MnO	1 - 4
FeO	0,5 - 4
TiO ₂	0,6 - 2
P ₂ O ₆	0 – 0,02

Posteriormente la escoria negra, se somete a una etapa de enfriamiento, que puede ser de diversas formas:

Escoria enfriada en suelo: se vierte directamente en el suelo y se enfría con agua, tiene un aspecto muy poroso, de tamaño pequeño y en estado vítreo [22].

Escoria enfriada en fosa: se pone en un cono de fundición y se acomoda debajo de la picadera del horno, después de iniciar a enfriarse se vierte en una fosa donde termina su proceso de enfriamiento. Tiene un aspecto menos poroso que la del medio del suelo y más cristalina [22].

Escoria enfriada en cono: se vierte en el cono de fundición hasta enfriarse completamente. Al sacarla del cono su aspecto es compacta, dura, cristalina y con pocos poros [22].

Para darle un uso y valor agregado a las escorias negras se han introducido en diferentes campos, como en la industria cementera para la fabricación del Clinker, en capas de rodadura con pavimento, para bases y sub-bases de carreteras y como sustituto de la arena en el hormigón [22] [20].

Escoria blanca: son las provenientes de la fase de afino y se caracterizan por contener metales pesados inferior al 1% en su composición químicas, y el tamaño reducido de sus partículas. La siguiente tabla muestra los porcentajes de los compuestos de la escoria blanca [22] [23].

Tabla 8. Composición química de escoria blanca [22].

Compuesto	Porcentaje en masa %
SiO ₂	17,4 – 19,3
Fe ₂ O ₃	1,1 – 3,6
FeO	0,0 – 0,95
Al ₂ O ₃	3,2 – 10,4
CaO	45,3 – 62,1
MgO	4,5 – 17,2
MnO	0,0 – 1,2
S	1,45 – 1,65
C	0,0 – 0,03
Fluoruro	1,4
Zinc (ppm)	596
Plomo (ppm)	84
Cobre (ppm)	200
Cromo (ppm)	150
Níquel (ppm)	80

Las escorias blancas se usan en la industria cementera y en la construcción, por sus similitudes fisicoquímicas con el cemento. Además, puede utilizarse como cementos tipo portland y morteros [20] [22] [23] [8].

Horno alto: en este proceso de fabricación del acero se introducen en la parte inferior un gas reductor a presión, como el CO y en la parte superior del horno alto los minerales de hierro, coque y fundentes, los cuales se separan, para que por un lado se vaya el hierro y por el otro las impurezas de los fundentes [24]. Estas impurezas evolucionan hasta llegar al crisol que se encuentra en la parte baja del

horno, como resultado está el arrabio y la escoria en un líquido fundido, luego se dirigen hasta picadero donde se retira la escoria por diferencia de densidad. De acuerdo al tipo de enfriamiento al que se somete ésta escoria, puede ser [24]:

Tabla 9. Composición química de escorias de alto horno [24].

Compuesto	Porcentaje en masa %
CaO	38 – 42
SiO ₂	32 – 37
MgO	7 – 9
Al ₂ O ₃	10 – 14
S	<1
FeO	0,4 – 0,8
MnO	0,2 – 0,6
TiO ₂	0,3 – 0,5

Escoria granulada: Se obtiene por medio de un enfriamiento brusco, donde se toma la escoria en estado líquido se deja caer sobre un potente chorro de agua fría. En este proceso la escoria se descompone en pequeñas partículas de aristas cortantes. Se utiliza en hormigón compactado, aditivos de cemento y agricultura [24].

Escoria cristalizada: Se obtiene por medio de un enfriamiento lento, en el cual se coloca la escoria en estado líquido en grandes fosos hasta que se enfríe. La escoria se cristaliza formando diversos componentes [24]. Tiene forma redondeada, textura lisa y con poca porosidad. Se utiliza en árido para hormigón, agricultura, cementos y aglomerado asfáltico [24].

Escoria expandida: Se obtiene añadiendo una pequeña cantidad de agua a la escoria fundida. El vapor producido por el contacto del agua con la escoria, produce una espuma plástica, la cual después de estar enfriada y llevarla a un proceso de machaqueo, proporciona un árido ligero [24]. Los granos de escoria expandida machacados son angulares, más rugosos y porosos, y menos densos que los de escoria cristalizada [24]. Se utiliza en hormigón, aislamiento y cementos [24].

5.1.4 POLÍMEROS ATENUADORES

Estudios científicos a nivel internacional muestran diferentes materiales compuestos de polímeros para aplicaciones en atenuación radiológica, como lo son los siguientes artículos.

V. Harish y sus compañeros de investigación en su artículo “Preparation and characterization of Lead Monoxide filled unsaturated polyester based polymer composites for Gamma radiation shielding applications” desarrollaron un material compuesto de resina poliéster con monóxido de plomo. En esta investigación encontraron que a mayor cantidad de monóxido de plomo en el material, mayor es su capacidad de atenuación en rayos gamma, por el peso y densidad del monóxido contenido en la resina y el coeficiente de atenuación de los materiales compuestos son lo suficientemente altos para reemplazar los metales en éstas aplicaciones [3].

En otro artículo de V. Harish, “Lead oxides filled isophthalic resin polymer composites for Gamma radiation shielding applications” desarrollan un material compuesto de resina isoftálica con 3 tipos de óxidos de plomo en diversas concentraciones. Los cuales mostraron que en energías muy altas de rayos Gamma funcionan satisfactoriamente y son muy comparables con el acero y el hormigón [25].

Según Turgay Korkut , Osman Gencil y compañía en su artículo “X-Ray, Gamma, and Neutron Radiation Tests on Epoxy-Ferrochromium Slag Composites by Experiments and Monte Carlo Simulations”, realizan la simulación de resina epóxica con escoria en polvo para desarrollar un nuevo material capaz atenuar radiaciones electromagnéticas. En esta investigación encontraron que la cantidad de escoria en el material es proporcional a la cantidad de dosis que logra absorber y puede ser viable para utilizar este material en aplicaciones como salones para radioterapia, industria nuclear y fuentes de radiación [6].

6. DISEÑO METODOLÓGICO

La metodología que se utilizó en este proyecto se basó en los siguientes pasos:

1. Obtención de poliuretanos compuestos de escoria.
2. Caracterización química de la escoria de acero
3. Caracterización físicoquímica de los poliuretanos compuestos de escoria.
4. Caracterización fisicomecánica de los poliuretanos compuestos de escoria.
5. Caracterización de atenuación de los poliuretanos compuestos de escoria.

6.1. Diseño de experimentos

Se busca analizar las propiedades físico-químicas, propiedades físico-mecánicas y propiedades de atenuación del material compuesto de acuerdo a la cantidad de escoria adicionada en el poliuretano. En la siguiente tabla se muestran los experimentos a realizar para encontrar los resultados de sus propiedades. La caracterización físico-química la determina la técnica SEM y la técnica EDS. La caracterización mecánica la determina el ensayo de compresión y la caracterización de atenuación del material la determina la cuantificación de intensidad de radiación que pasa a través del material compuesto. En la siguiente se encuentran los experimentos necesarios para la caracterización.

Tabla 10. Experimentos para caracterización

Caracterización	Porcentaje en masa de escoria en las probetas (%)					
	0%	10%	20%	30%	40%	70%
Físico-química	X1,1	X1,2	X1,3	X1,4	X1,5	X1,6
Atenuación	X2,1	X2,2	X2,3	X2,4	X2,5	X2,6
Mecánicas	X3,1	X3,2	X3,3	X3,4	X3,5	X3,6

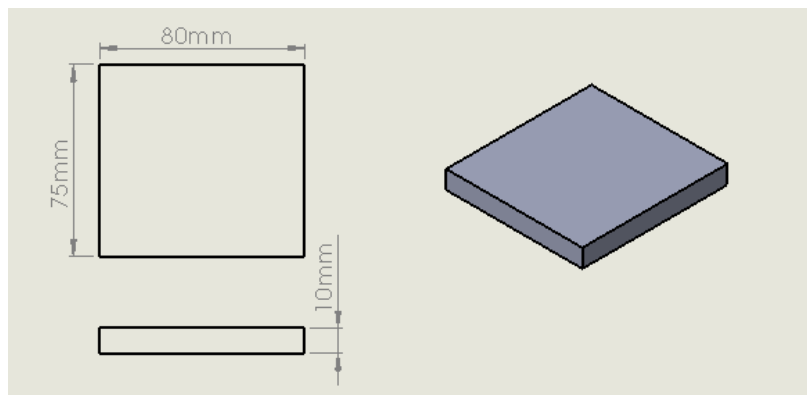
6.2. Elaboración de las probetas

Para la preparación de los poliuretanos compuestos de escoria, se utilizó Polioli e Isocianato comerciales de la empresa Química Mercurio en una relación de Polioli e Isocianato 1:1 en volumen. La escoria utilizada proviene de un acero SAE 1045 de la empresa CIA general de Aceros, con características de escoria negra granular.

Se varió la cantidad de escoria en diferentes proporciones (0%, 10%, 20%, 30% 40% y 70%) del peso total del poliuretano.

Para la preparación de todas las probetas se utilizó la técnica one shot (un solo paso), en el cual se mezclan todos los componentes (poliol, isocianato y escoria) al mismo tiempo de manera manual. El proceso de mezclado se realiza de 2 a 3 minutos a temperatura ambiente, luego se vierten en un molde rectangular de madera. Después de 4 horas de curado se retiran las probetas. Las medidas de las probetas son 80mm x 75mm x 10mm, como se muestra en la figura 2.

Figura 2. Medidas probetas rectangulares



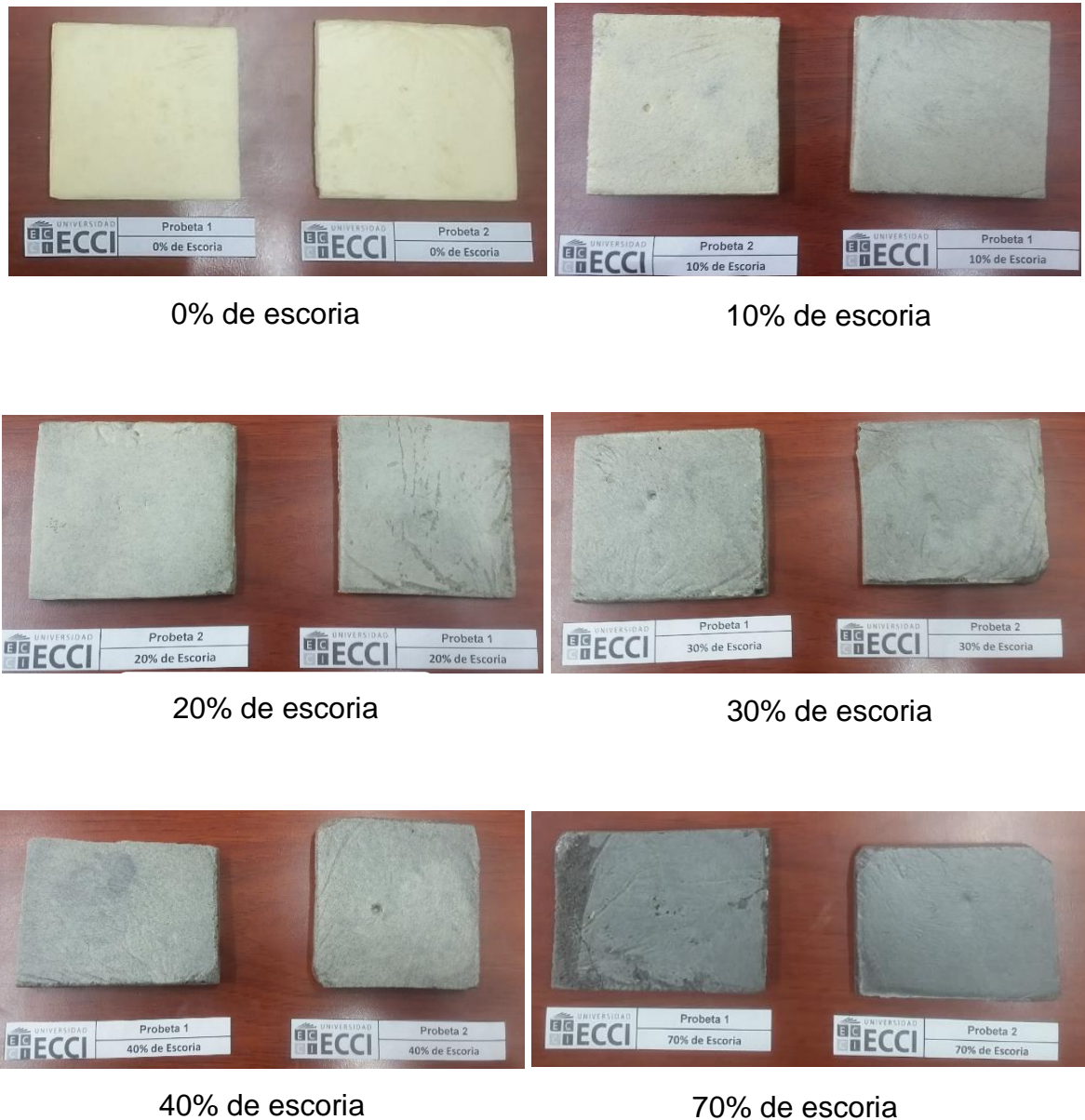
Para incorporar la escoria al poliuretano, fue necesario molerla y tamizarla en un tamiz de ensayo estándar americano ASTM E-11 a 120 micras. En la figura 3. Se muestra la escoria antes y después de pasar por el proceso de molienda y de pasar por el tamiz. La preparación de todas las probetas se realizó en los laboratorios de química de la Universidad ECCI.

Figura 3. Escoria proveniente de acero SAE 1045 con y sin molienda



En la figura 4. Se puede ver la posible influencia del polvo de escoria en el poliuretano respecto a su color original (amarillo).

Figura 4. Influencia del polvo de escoria en la tonalidad del poliuretano



6.3. Caracterización química de la escoria Espectrometría de Emisión Atómica (OES-Optical emission)

Es una técnica analítica utilizada para determinar la composición elemental de una amplia gama de metales, así como un extenso intervalo de trabajo en la curva de calibración [26] [27].

La parte del espectro electromagnético que utiliza para determinar la composición elemental son las longitudes de onda de 13nm hasta alrededor de 800nm, los cuales corresponden a las áreas de la luz visible y parte de los rayos ultravioleta [27].

Para desarrollar la técnica, el equipo debe tener tres componentes principales, el primero es una fuente eléctrica para excitar átomos dentro de una muestra metálica para que emitan líneas características de luz, u emisión óptica. El segundo componente es un sistema óptico. En el cual las múltiples líneas de emisión óptica pasan al espectrómetro. Una clasificación de difracción en el espectrómetro separa la luz entrante en longitudes de onda específicas del elemento y un detector correspondiente mide la intensidad de la luz para cada longitud de onda. La intensidad medida es proporcional al elemento de desplazamiento de la concentración en la muestra. Y el tercer componente es un sistema informático. El sistema informático adquiere las intensidades medidas y procesa estos datos a través de una calibración predefinida para producir concentraciones elementales. La interfaz de usuario garantiza una intervención mínima del operador con resultados claramente visualizados que se pueden imprimir o almacenar para referencia futura [27].

Equipo utilizado

Para conocer la composición elemental de la escoria, se utilizó el equipo PMI MASTER PRO de la marca Oxford Instruments de la Compañía general de aceros, el cual aplica la técnica de caracterización OES.

6.4. Caracterización físicoquímica (Microscopía electrónica de barrido y Espectrometría de dispersión de rayos X)

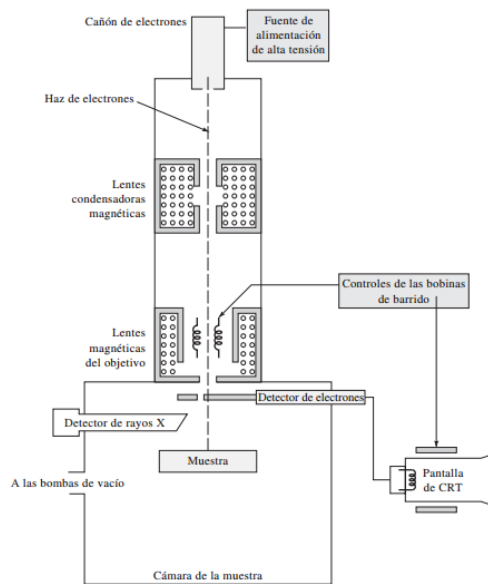
Microscopía electrónica de barrido (SEM-Scanning Electron Microscopy) y Espectrometría por dispersión de rayos X (EDS- Energy Dispersive Spectroscopy)

Es una de las técnicas usadas para el análisis de características microestructurales de sólidos, la cual brinda información de la morfología, topografía superficial y de la composición química de la muestra, debido a su alta resolución [28] [29] [30].

Para obtener una imagen de la muestra por medio de la microscopía de barrido, se enfoca una haz de electrones sobre la superficie de la muestra mediante dos pares de bobinas electromagnéticas ubicadas en el lente del objetivo, un par desvía los electrones en dirección x y el otro en dirección de y, cada uno se desplaza de manera lineal, y después vuelve a su estado inicial. Al terminar el barrido, el proceso se repite hasta que halla abarcado toda la muestra [29] [31] [32]. En la figura 5 se muestra los componentes de un microscopio electrónico de barrido.

La espectrometría por dispersión de energía se utiliza para hacer un análisis cualitativo y cuantitativo de los elementos que se encuentran en la muestra, debido a que brinda información importante acerca de la naturaleza físico y química de superficie [31] [29].

Figura 5. Componentes de un Microscopio electrónico de Barrido [31]



Equipos utilizados

Para conocer la morfología de las muestras de poliuretano compuesto de escoria se utilizó la técnica de microscopía electrónica de barrido (SEM) usando un Microscopio de barrido marca Phenom ProX, uno de los últimos en el desarrollo de Phenom-World, que permite observar imágenes en tres dimensiones de estructuras microscópicas y cuenta con su detector EDS integrado para identificación de los diferentes elementos de una muestra. Cuenta con un rango de magnificación de 20 a 10.000x y una resolución menor a 17nm. El laboratorio de Investigación de la Universidad ECCI en el cual se encuentra el microscopio Phenom ProX, cuenta con un controlador de temperatura que va desde -25°C s 50°C.

Figura 6. Microscopio electrónico de barrido Phenom ProX de la Universidad ECCI



6.5. Caracterización Mecánica

La resistencia es una propiedad mecánica de los materiales que está ligada a su capacidad para soportar cargas sin sufrir grandes deformaciones o sin llegar al punto de falla. Entre las pruebas más importantes para determinar la resistencia de un material se encuentra el ensayo de compresión [33].

Este ensayo consiste en aplicar un esfuerzo creciente en magnitud y en sentido perpendicular a la superficie de la muestra con el fin de producir sobre esta aplastamiento o rotura final, la aplicación gradual de la fuerza creciente, viene acompañada de un ensanchamiento del área transversal de la muestra, figura

Este ensayo permite determinar algunas propiedades mecánicas importantes del material como lo son el módulo de elasticidad a compresión, resistencia a la fluencia, ductilidad, máxima resistencia a compresión [33].

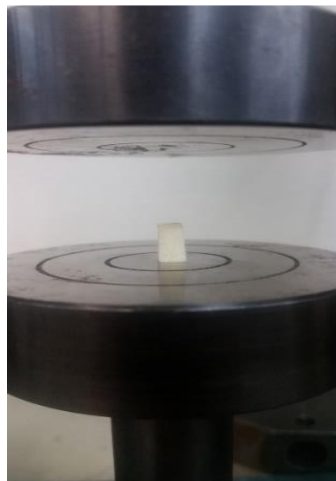
Debido a la capacidad de la máquina Universal de ensayos que se utilizó, fue necesario modificar las probetas para el ensayo a compresión. Para realizar el ensayo a compresión se siguió la norma ASTM D 695 – 02a [34]. Y las probetas elegidas fueron las cuadradas y se realizaron como se indica en la norma guardando la relación de longitudes en el largo, ancho y alto de cada probeta.

Las medidas de las probetas de compresión utilizadas en este proyecto fueron de 5mm x 5mm x 10mm, conservando la relación 1:1:2 de longitudes. Y la velocidad de ensayo a compresión fue de 1,3 mm/min. En la figura 7 se puede apreciar algunas de las probetas a compresión antes y después de realizar el ensayo y en la figura 8 se puede visualizar el montaje del ensayo de compresión realizado.

Figura 7. Probetas para ensayo de compresión



Figura 8. Ensayo de compresión



Equipos utilizados

Para conocer el esfuerzo máximo a compresión y la deformación del material compuesto se utilizó la Máquina Universal de ensayos Tinius Olsen con una capacidad de 10kN, la cual permite realizar ensayos de tensión, compresión y flexión. Este equipo pertenece al laboratorio de materiales de la Universidad ECCI y se muestra en la figura 8.

Figura 9. Máquina Universal de ensayos de la Universidad ECCI



6.6. Caracterización de Atenuación

Para conocer los coeficientes de atenuación lineal del poliuretano compuesto de escoria, relevantes para conocer la viabilidad del material, se realiza la irradiación de rayos X a las probetas obtenidas del material compuesto. El procedimiento para la conocer los coeficientes de atenuación lineal se basa en medir la intensidad de la radiación incidente y compararla con la intensidad de la radiación transmitida a través del poliuretano compuesto de escoria. La caracterización de atenuación se realizó en el Instituto nacional de Cancerología.

Equipos utilizados

Para la irradiación de rayos X sobre las muestras del material compuesto se utilizó un tubo de rayos X portátil marca General electric modelo AMX Collimator, con una distancia de 85 cm de altura del tubo de rayos X al sensor.

Y para la medir la intensidad de la radiación incidente con la intensidad de la radiación transmitida a través del material compuesto, se utilizó el sensor R/F del analizador de rayos X marca RaySafe modelo X2.

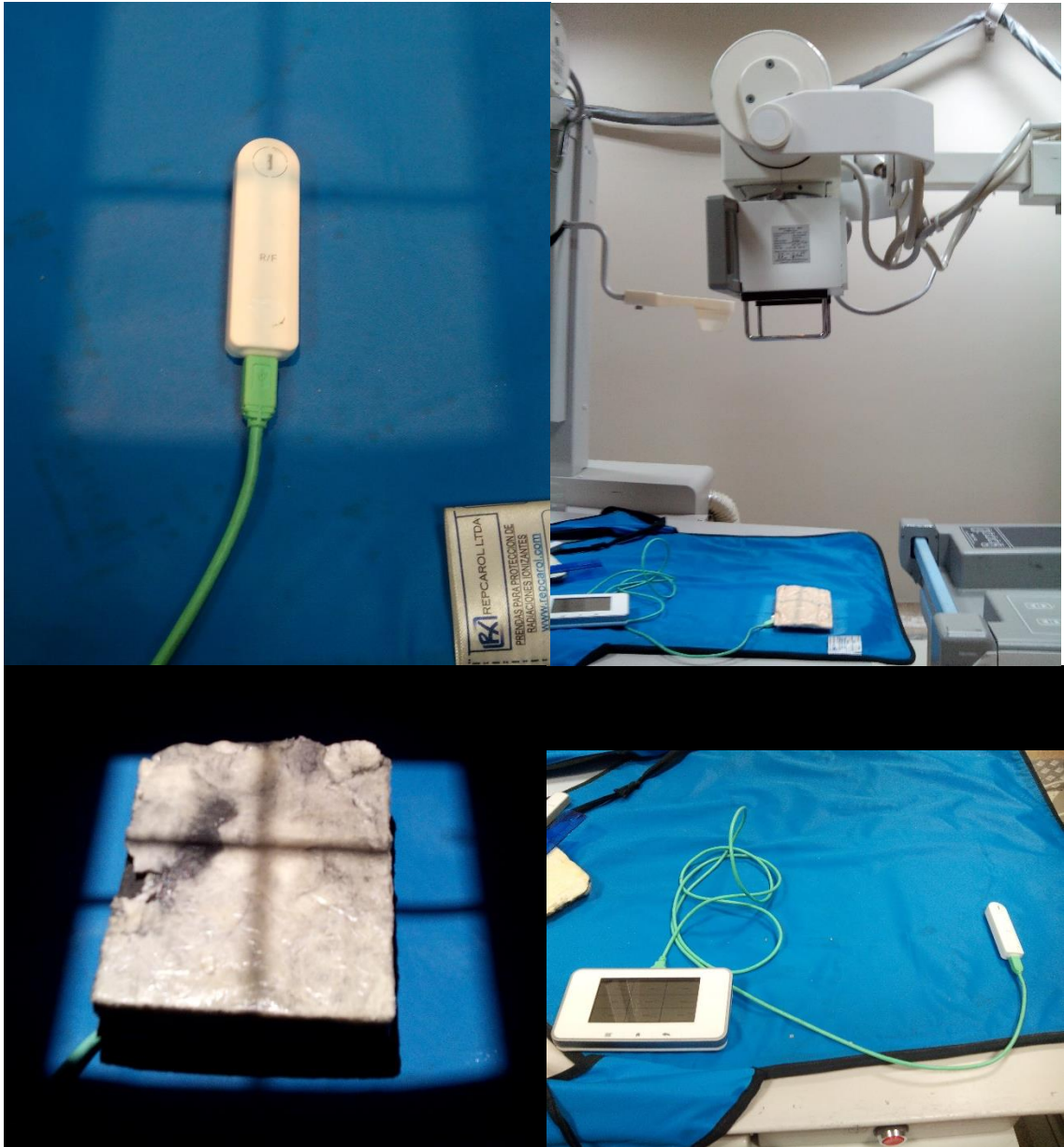
Figura 10. Analizador de rayos X marca RaySafe X2 con sensor R/F



Figura 11. Tubo de rayos X marca General Electric



Figura 12. Caracterización de atenuación



En la figura 12 se puede visualizar el montaje para la caracterización de atenuación del material compuesto.

7. RESULTADOS

7.1. Caracterización química de la escoria

En la siguiente tabla se encuentra la composición química de la escoria incorporada en los poliuretanos compuesto, caracterizada por la técnica OES en la Compañía general de aceros, proveniente de un acero 1045.

Tabla 11. Resultados de la composición química de escoria proveniente de acero SAE 1045

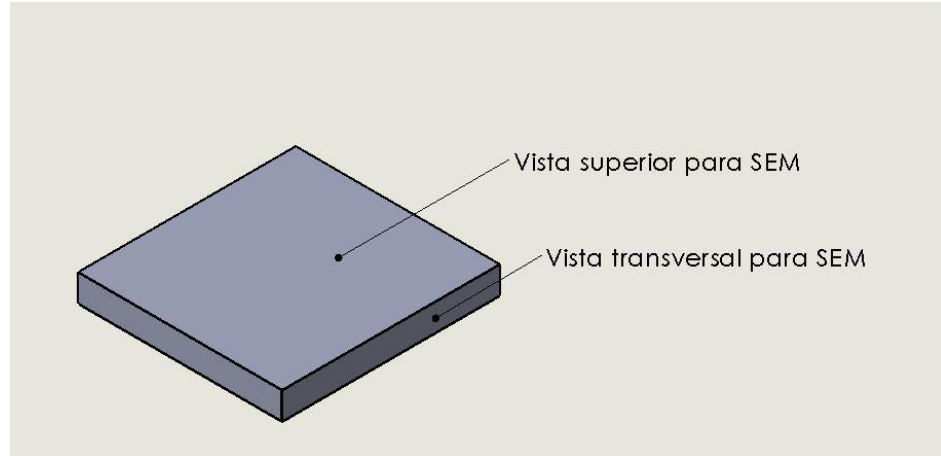
Composición elemental de la escoria en porcentajes de masa (%)								
	Fe	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Al
1	97,3	0,980	0,363	0,586	0,0560	0,0853	0,0377	0,0225
2	97,6	0,406	0,297	0,570	0,0795	0,111	0,0654	0,0245
3	97,3	0,440	0,394	0,659	0,0772	0,101	0,0590	0,0300
Ave	97,4	0,609	0,351	0,605	0,0709	0,0996	0,0540	0,0257
	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb	Zr
1	0,0481	0,0389	0,0645	0,0195	0,0270	0,210	0,0548	0,0145
2	0,0781	0,0567	0,104	0,0275	0,0407	0,319	0,0886	0,0277
3	0,0694	0,0628	0,0956	0,0310	0,0379	0,470	0,114	0,0241
Ave	0,0652	0,0528	0,0883	0,0260	0,0352	0,336	0,0860	0,0221

7.2. Caracterización morfológica: Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Mediante esta técnica se tomaron las imágenes de todas las probetas de poliuretano compuesto con sus diferentes porcentajes de escoria, con el fin de analizar la morfología del material, y la dispersión del polvo de escoria en el compuesto.

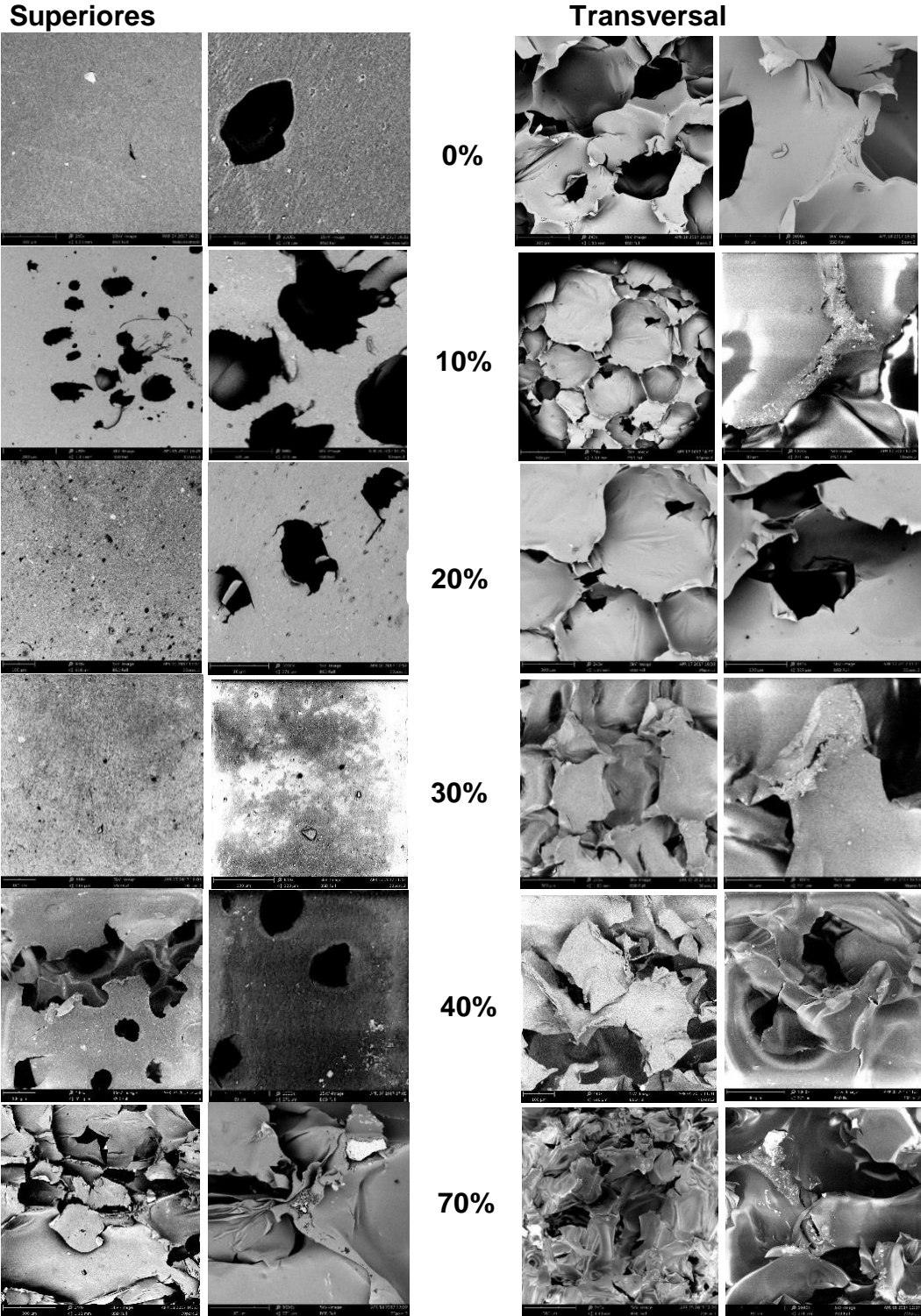
De cada probeta se tomaron cortes de 10mm x 10mm x 3mm para el análisis del SEM. Una análisis se tomó en la parte superior de las probetas y otro análisis se tomó en el área del espesor como se muestra a continuación en la siguiente imagen.

Figura 13. Muestras para SEM provenientes de probetas originales



Las imágenes SEM están organizadas de la siguiente manera: Las parejas del lado izquierdo se encuentran las imágenes desde la vista superior y en el lado derecho las imágenes desde la vista transversal. Las dos se encuentran de manera ascendente al porcentaje del contenido de escoria en el poliuretano. Las imágenes del costado izquierdo de cada pareja se encuentra a 240X y las del costado derecho se realizaron a 1000X.

Figura 14. Resultados imágenes SEM tomadas en 240x y 1000x

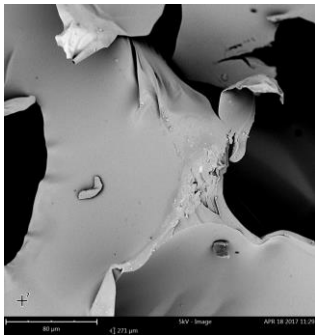


Análisis imágenes SEM: se logra visualizar que al aumentar la cantidad de escoria en el poliuretano, aumenta la erosión y rugosidad del poliuretano compuesto, con esto se crean más poros y las celdas son menos homogéneas. También se observa que se logró dispersar la escoria en el polímero y ésta afecta la superficie del material. Se puede ver que las partículas de escoria están embebidas en el poliuretano, lo cual podría evidenciar la existencia de una adherencia entre escoria y poliuretano.

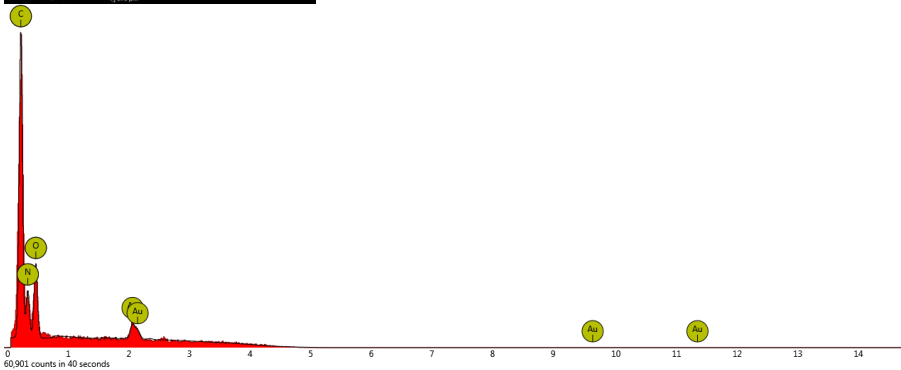
7.3. Caracterización Físico-química: Espectrometría de dispersión de rayos X (EDS)

Para cada probeta con su respectivo porcentaje de escoria se tomaron cortes como muestras de 10mm x 10mm x 3mm, las mismas usadas en la técnica SEM. Una muestra se tomó en la parte superior de las probetas y la otra muestra se tomó en el área del espesor. Sin embargo se tomaron las caracterizaciones más relevantes y comparativas, las cuales son las siguientes:

0% Transversal

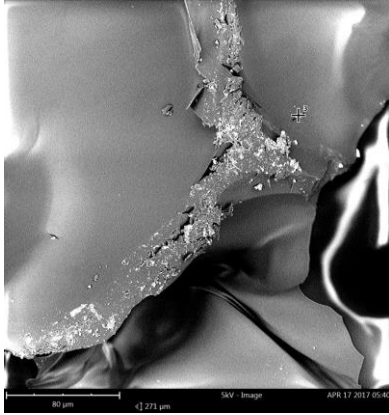


Element Number	Element Symbol	Element Name	Element Weight Concentration	Error
6	C	Carbon	12.2	0.6
8	O	Oxygen	36.3	0.1
7	N	Nitrogen	11.5	0.7
79	Au	Gold	39.9	0.3

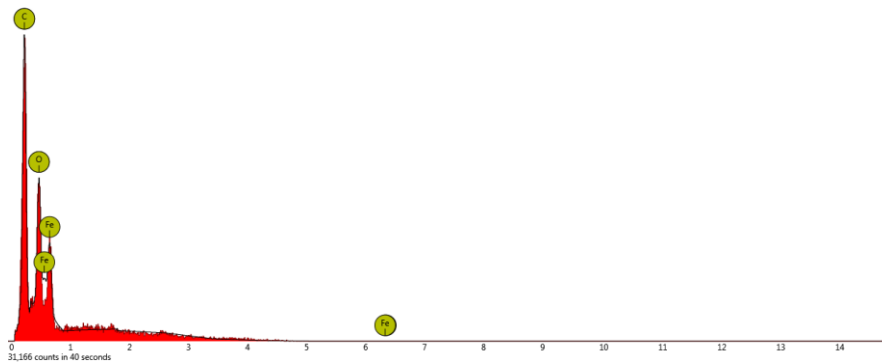


En este resultado se pueden ver los elementos que corresponden al poliuretano sin escoria, los cuales son Carbono, Oxígeno, y Nitrógeno. El contenido de oro en la muestra se debe a un recubrimiento realizado a la muestra polimérica, debido a que el poliuretano no conduce energía, y es necesario que la muestra sea conductora para la caracterización por SEM.

10% Transversal

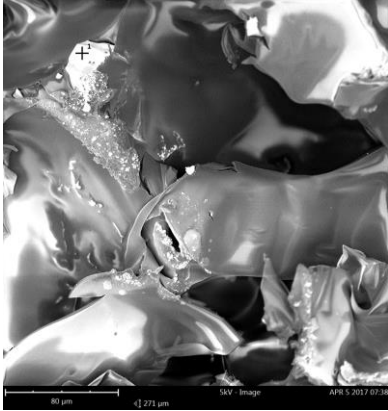


Element Number	Element Symbol	Element Name	Weight Concentration	Error
6	C	Carbon	4.5	0.5
8	O	Oxygen	15.2	0.0
26	Fe	Iron	80.4	0.3

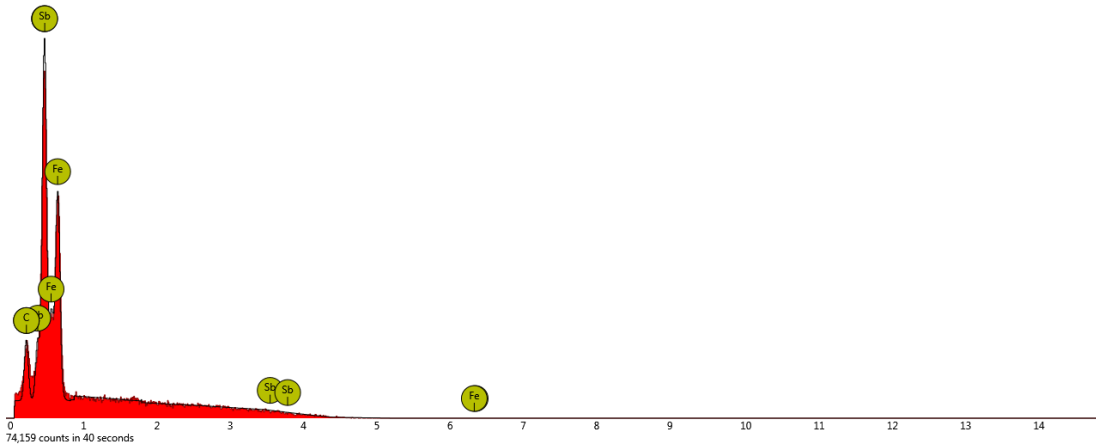


En este resultado se pueden ver los elementos que corresponden al poliuretano con escoria, los cuales son Carbono, Oxígeno, y el Hierro. Además se logra identificar la escoria dispersa en el poliuretano de tonos muy claros.

70% Transversal



Element Number	Element Symbol	Element Name	Weight Concentration	Error
8	O	Oxygen	13.2	0.1
26	Fe	Iron	79.4	0.0
51	Sb	Antimony	7.1	0.1
6	C	Carbon	0.3	0.8

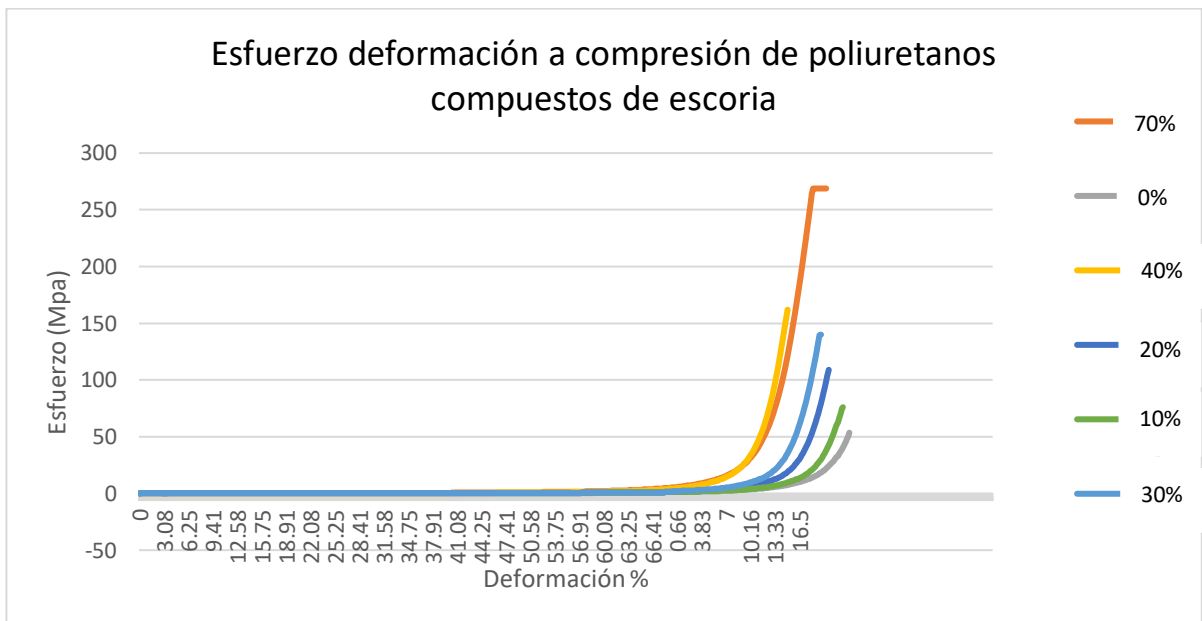


En este resultado se pueden ver los elementos que corresponden al poliuretano con escoria, en este caso con 70% de escoria. Estos elementos son Carbono, Oxígeno, y el Hierro. El antimonio que se encuentra en el análisis podría deberse a un error registrado por el equipo en el cual se realizó la técnica. También se logra identificar la escoria dispersa en el poliuretano de tonos muy claros.

7.4. Caracterización mecánica

En el ensayo de compresión se aplica una carga progresiva que aplasta la probeta cuadrada entre dos placas, al comprimirse la probeta reduce su altura y aumenta su área transversal hasta el punto de fractura del material. La carga aplicada se traduce a términos de esfuerzo y la reducción en la altura en términos de deformación, los cuales son necesarios para construir la curva esfuerzo-deformación que es la relación básica que describe las propiedades mecánicas de un material.

Figura 15. Curva esfuerzo deformación de las probetas con diferentes porcentajes de concentraciones en masa de escoria en el poliuretano



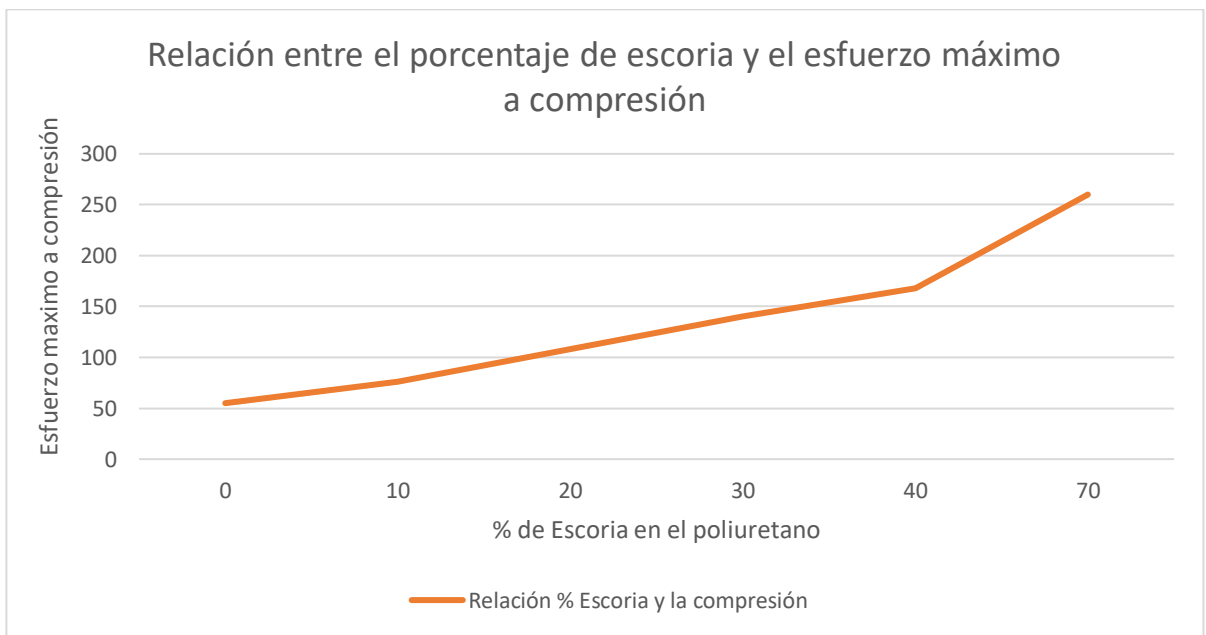
A partir de la Figura 15, se podría deducir que existe una relación directamente proporcional entre el contenido de escoria disperso en el poliuretano y la resistencia a la compresión. Esta relación también se puede visualizar en la Figura Es decir, a mayor cantidad de concentración, mayor es el esfuerzo máximo a compresión del material. Por lo tanto es probable que la escoria si cumple su función como refuerzo particulado a la matriz polimérica.

En la siguiente tabla se muestra el esfuerzo máximo a compresión de cada probeta según su porcentaje de escoria y su porcentaje de deformación a compresión.

Tabla 12. Propiedades mecánicas a compresión

<i>Probeta</i>	<i>Esfuerzo máximo a compresión (Mpa)</i>	<i>Deformación a compresión (%)</i>
0% de escoria	55	
10% de escoria	76	
20% de escoria	108	18
30% de escoria	140	19
40% de escoria	168	
70% de escoria	260	26

Figura 16. Relación entre el porcentaje de escoria y el esfuerzo máximo a compresión



7.5. Caracterización de atenuación de los poliuretanos compuestos:

Tabla 13. Porcentajes de atenuación del poliuretano compuesto de escoria

Condiciones:	80 kvp	2,5 MAS	Radiación inicial: 151,7 mGy
Intensidad inicial	Probeta	Intensidad final	% Atenuación

151,7 mGy	70%	116,1	23,5
151,7 mGy	70% 2	116	23,5
151,7 mGy	40%	130,1	14,2
151,7 mGy	40% 2	129,5	14,5
151,7 mGy	30%	135,7	10,5
151,7 mGy	30% 2	137,1	9,6
151,7 mGy	20%	140,5	7,4
151,7 mGy	10%	145,5	4,1
151,7 mGy	0%	149,5	1,5

Al variar la condición del kilovoltaje máximo que se emite, el porcentaje de atenuación aumentó en un 5%.

Atenuación de poliuretanos compuestos de escoria con variable modificada

Tabla 14. Porcentaje de atenuación cambiando la variable de kilovoltaje máximo (kvp)

Condiciones:	60 kvp	2,5 MAS	Radiación inicial: 151,7 mGy
Intensidad inicial	Probeta	Intensidad final	% Atenuación
75,78 mGy	70%	54,19	28,5

Figura 17. Gráfica Atenuación vs % de escoria

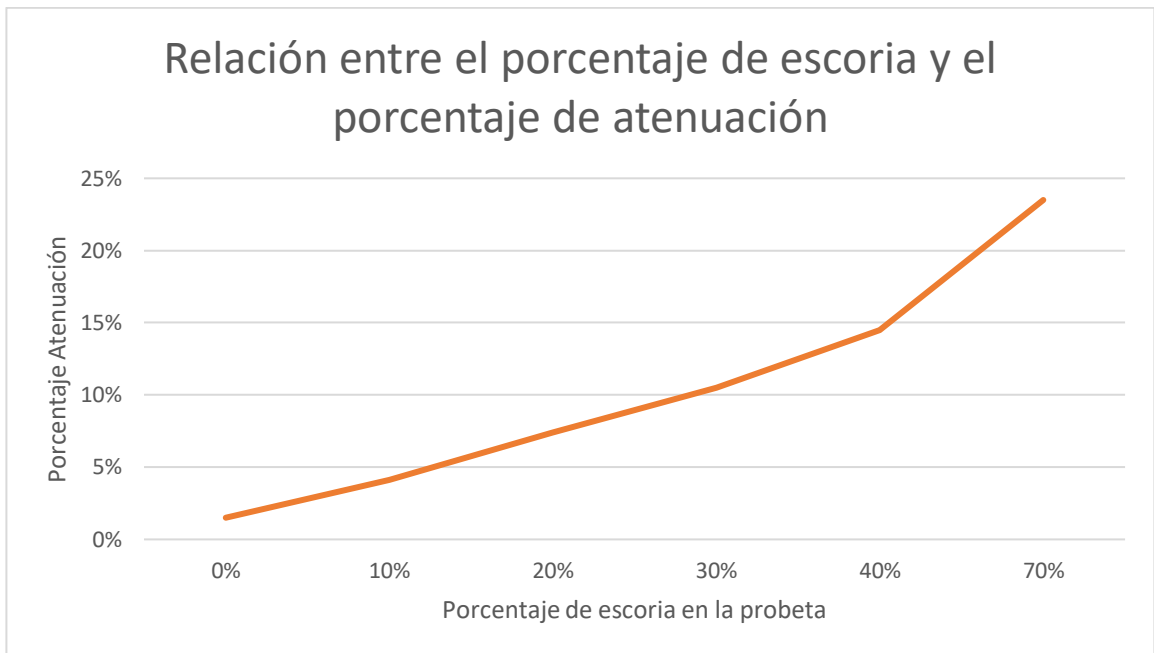


Tabla 15. Coeficientes de atenuación lineal

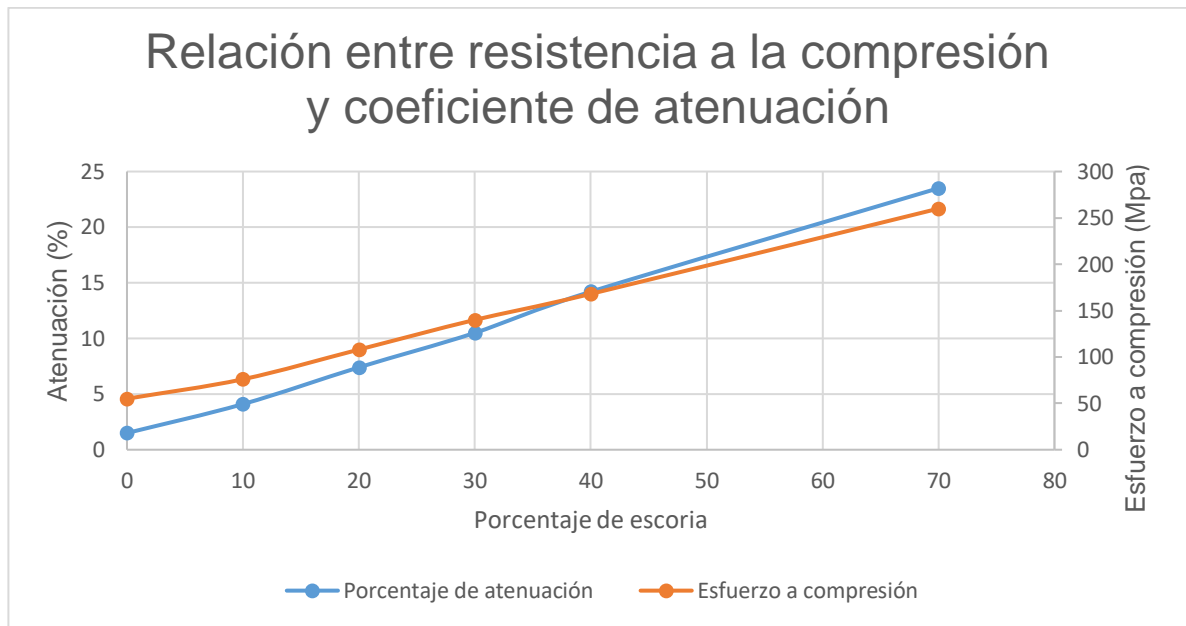
coeficiente de atenuación lineal		
$m = \ln(I_0/I)$	$I_0 =$	151,7 mGy
<i>Probeta</i>	<i>I (mGy)</i>	<i>Coefficiente A. lineal (cm-1)</i>
70%	116,1	0,267
40%	130,1	0,153
30%	135,7	0,111
20%	140,5	0,0766
10%	145,5	0,041
0%	149,5	0,0146

Tabla 16. Coeficientes de atenuación lineal variando el k_{xp}

coeficiente de atenuación lineal caso de variable modificada		
$m = \ln(I_0/I)$	$I_0 =$	75,78 mGy
<i>Probeta</i>	<i>I (mGy)</i>	<i>Coefficiente A. lineal (cm-1)</i>

70%	54,19	0,3353
-----	-------	--------

Material	Density ρ [g/cm ³]	Linear attenuation coefficient μ [cm ⁻¹]		
		1 MeV	3 MeV	6 MeV
Air* (20 °C, 76 cm Hg pressure)	0.001205	0.0000765	0.0000431	0.0000304
Aluminum	2.7	0.166	0.0953	0.0718
Ammonia (liquid)	0.771	0.0612	0.0322	0.0221
Beryllium	1.85	0.104	0.0579	0.0392
Beryllium carbide	1.9	0.112	0.0627	0.0429
Beryllium oxide (hot-pressed blocks)	2.3	0.140	0.0789	0.0552
Bismuth	9.80	0.700	0.409	0.440
Boral	2.53	0.153	0.0865	0.0678
Boron (amorphous)	2.45	0.144	0.0791	0.0679
Boron carbide (hot pressed)	2.5	0.150	0.0825	0.0675
Barytes ^c	3.5	0.213	0.127	0.110
Barytes-boron frits ^c	3.25	0.199	0.119	0.101
Barytes-limonite ^c	3.25	0.200	0.119	0.0991
Barytes-lumnite-colemanite ^c	3.1	0.189	0.112	0.0939
Iron-Portland ^c	6.0	0.364	0.215	0.181
MO (ORNL mixture)	5.8	0.374	0.222	0.184
Portland ^d (1 cement: 2 sand: 4 gravel mixture)	2.2	0.141	0.0805	0.0592
Flesh ^e	2.4	0.154	0.0878	0.0646
Fuel oil (medium weight)	1.0	0.0699	0.0393	0.0274
Gasoline	0.89	0.0716	0.0350	0.0239
Glass	0.739	0.0537	0.0299	0.0203
Borosilicate	2.23	0.141	0.0805	0.0591
Lead (Hi-D)	6.4	0.439	0.257	0.257
Plate (avg)	2.4	0.152	0.0862	0.0629
Iron	7.86	0.470	0.282	0.240
Lead	11.34	0.797	0.468	0.505
Lithium hydride (pressed powder)	0.70	0.0444	0.0239	0.0172
Lucite (polymethyl methacrylate)	1.19	0.0816	0.0457	0.0317
Paraffin	0.89	0.0646	0.0360	0.0246
Rocks				
Granite	2.45	0.155	0.0887	0.0654
Limestone	2.91	0.187	0.109	0.0824
Sandstone	2.40	0.152	0.0871	0.0641
Rubber				
Butadiene copolymer	0.915	0.0662	0.0370	0.0254
Natural	0.92	0.0652	0.0364	0.0248
Neoprene	1.23	0.0813	0.0462	0.0333



8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Preparar poliuretanos compuestos de escorias provenientes de un acero SAE (Society of Automotive Engineers) 1045.
- Caracterizar poliuretanos compuestos de escorias mediante propiedades fisicoquímicas y físico-mecánicas.
- Determinar la viabilidad del uso de poliuretanos compuestos de escoria en atenuaciones radiológicas.
-

Recomendaciones:

- Mejorar la técnica de preparación del poliuretano, pues la velocidad de polimerización del poliuretano en este juega un papel muy importante la morfología final del compuesto.
- Obtener una granulometría más pequeña de la escoria, esto con el fin de que la escoria no se precipite en el poliuretano por su tamaño de granulometría.
- Mezclar por más tiempo el polioliol con la escoria, y a su vez agilizar el proceso de mezclado entre el tres componentes para mejores resultados.

9. REFERENCIAS (BIBLIOGRAFÍA)

- [1] «Organización mundial de la salud,» Abril 2016. [En línea]. Available: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs371/es/>.
- [2] «Radiation Safety Manual,» Veterans Affairs Palo Alto Health Care System, 2016.
- [3] V. Harish y N. Nagaiah, «Preparation and Characterization of Lead Monoxide,» *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 112, p. 1503, Mayo 2009.
- [4] S.-C. Kim, K.-R. Dong y W.-K. Chung, «Medical radiation shielding effect by composition of barium compounds,» *Annals of Nuclear Energy*, n° 47, p. 1, 2012.
- [5] G. Nordberg, «Metales: Propiedades químicas y toxicidad,» de *Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo*, Tercera ed., vol. I, p. 63.39.
- [6] O. G. E. K. Turgay Korkut, «X-Ray, Gamma, and Neutron Radiation Tests on Epoxy-Ferrocromium Slag Composites by Experiments and Monte Carlo simulation,» *International Journal of Polymer Analysis and Characteritation*, vol. III, n° 18, pp. 224-231, 2013.
- [7] J. C. T., «Efecto del desperdicio de una siderúrgica en bases y subbases granulares,» *Ciencia y tecnología Neogranadina*, n° 13, p. 25, 2003.
- [8] H. M. S. Abril, «Estado del arte sobre las escorias negras de horno de arco eléctrico y sus aplicaciones en pavimentos,» Tunja, 2014.
- [9] M. Szycher, *Handbook of Polyurethanes*, Segunda ed., Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2013, pp. 2, 19, 96, 3, 267, 3, 4, 2, 8, 186, 187, 8, 9, 258, 260, 262, 135, 267, 268, 192, 195, 295.
- [10] K. Ashida, *Polyurethane and Related Foams*, Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2007, pp. 74, 82.
- [11] H. R. Kricheldorf, *Handbook of polymer synthesis*, Segunda ed., New York: Marcel Dekker, 2005, p. 526.
- [12] M. d. M. B. Ortega, «Estudio de nanocompuestos de espumas de poliuretano reforzadas con nanocargas en base carbono,» Valencia, 2012.
- [13] M. Moreno Rueda y M. L. Valderrama Ríos, «Estudio para la sustitución del polioli comercial utilizado en la producción de poliuretanos empleando ácido láctico,» Bucaramanga, 2004.
- [14] «Radiation Safety Handbook,» Office for Research Safety, 2010.
- [15] «Radiation Safety Manual,» Veterans Affairs Palo Alto Health Care System, 2016.
- [16] W. R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, New York: Springer-Verlag, 1987, pp. 66, 73.

- [17 A. C. d. P. d. Concreto, Tecnología del concreto, Tercera ed., Bogotá: Nomos
] Impresores, 2010, p. 1.
- [18 H. E. Mustafa Çullu, «Determination of the effect of lead mine waste aggregate on
] some.» *Construction and Building Materials*, n° 125, p. 625, Construction and
Building Materials.
- [19 J. U. Limo, «Estudio sobre la presencia del plomo en el medio ambiente de Talara en
] el año 2003,» 2003.
- [20 M. B. Regueira, «Utilización de las escorias de acería,» *Ciencia & Futuro*, vol. I, n° 4,
] pp. 33, 35,37, 2011.
- [21 J. H. Puy, «Estudio de la estabilidad volumétrica, propiedades físicas y químicas de la
] escoria negra de acero de horno de arco eléctrico,» 2007.
- [22 «Centro de estudios y experimentos de obras públicas,» Diciembre 2011. [En línea].
] Available: <http://www.cedex.es/NR/rdonlyres/22980D5E-377B-4697-AEFE-CE897A68963D/119858/ESCORIASDEACERIADEHORNODEARCOELECTRICO.pdf>.
- [23 T. H. Vazquez, «Estudio del efecto de la hidratación de la escoria blanca de acería de
] HEA: Aplicación en pastas y morteros de cemento,» Bilbao, 2015.
- [24 «Centro de estudios y experimentos de obras públicas,» Diciembre 2011. [En línea].
] Available: <http://www.cedex.es/NR/rdonlyres/BFF81F23-BDB7-4B5B-85A5-A7ABD2974A42/119856/ESCORIASDEHORNOALTO.pdf>.
- [25 N. N. H. G. K. V. Harish, «Lead oxides filled isophthalic resin polymer composites
] for,» *Indian Journal of Pure & Applied Physics*, vol. 50, p. 847, 2012.
- [26 J. A. Hernández, Ensayos, Tuxtepec, 2010, p. 7.
]
- [27 O. Instruments, «Oxford Instruments,» [En línea]. Available: <http://www.the-experts.com/optical-emission-spectroscopy-oes-explained>.
- [28 J. I. Goldstein, Practical scanning electron microscopy, New York: Plenum Press,
] 1975.
- [29 M. V. Curia, «Estudio fisicoquímico y catalítico del sistema Mn-O-V,» 2010.
]
- [30 R. Weilie Zhou, «Fundamentals of Scanning».
]
- [31 D. A. Skoog, Principios de análisis instrumental, cengage learning, 2008, p. 609.
]
- [32 L. Reimer, Scanning Electron Microscopy, New York: Springer, 1998, pp. 1-2.
]
- [33 A. O. G. Posada, «SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE UN MATERIAL
] COMPUESTO A BASE DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD Y
MAGNETITA PULVERIZADA,» Bogota, 2015.
- [34 ASTM, «ASTM D 695 – 02a Standard Test Method for Compressive Properties of
] Rigid Plastics».

- [35 «Universidad Nacional Autónoma de México,» [En línea]. Available:
] <http://www.ing.unp.edu.ar/asignaturas/quimica/teoria/quimicaorganica.pdf>. [Último
acceso: 2016].
- [36 L. M. Jaramillo, «Universidad del Valle,» 2001. [En línea]. Available:
] http://objetos.univalle.edu.co/files/Clasificacion_y_nomenclatura_de_los_compuestos_organicos.pdf.