



DISMINUCIÓN DE PASIVOS AMBIENTALES MINEROS PAM MEDIANTE LA OBTENCIÓN DE ESPUMA DE VIDRIO

W. Pardavé ^{1*}, W. García ², Y. Plata ²

1: Magister en Ingeniería, Grupo Ambiental de Investigación Aplicada, Facultad de Ingenierías, Universidad de Santander, Bucaramanga Colombia

2: Ingeniera Metalúrgica, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga Colombia

* wal.pardave@mail.udes.edu.co

PALABRAS CLAVE	RESUMEN
Espuma de vidrio, Pasivos Ambientales Mineros, Relaves.	Este trabajo propone como uno de sus objetivos la disminución de pasivos ambientales mineros PAM a través de la obtención, a nivel de laboratorio, de espumas de vidrio. Estas espumas se obtienen a partir de una mezcla de polvo de vidrio, carburo de silicio como agente espumante y residuos mineros almacenados a la intemperie que se presentan en zonas cercanas al municipio de Vetás, Santander. En este trabajo se realizó un muestreo pormenorizado de dichos residuos mineros y luego se procedió a realizar una caracterización química y mineralógica mediante SEM-EDS, FRX y DRX, física y granulométrica. Posteriormente los residuos con contenido alto de SiO ₂ , se mezclaron con el carburo de silicio y el vidrio reciclado el cual es tradicionalmente la principal materia prima para la elaboración de espumas de vidrio, dicha mezcla se sometió a pruebas de DSC y TGA para obtener las temperaturas adecuadas para llevar a cabo el tratamiento de sinterización. Las temperaturas empleadas para la sinterización fueron 750, 950 y 1000 °C, a una velocidad de calentamiento de 5 °C/min y un tiempo de sostenimiento de 30 minutos dentro de un horno tipo mufla, en una atmósfera en presencia de oxígeno y dejando enfriar dentro del horno. Obteniendo como resultado una espuma de vidrio a 950 °C con las siguientes propiedades: densidad aparente 0,292 g/cm ³ , porcentaje de porosidad 58% y resistencia a la compresión de 8,96 MPa. Finalmente se demostró la posibilidad de obtener espuma de vidrio a un bajo costo, empleando residuos mineros.

REDUCTION OF PAM MINING ENVIRONMENTAL LIABILITIES THROUGH THE OBTAINING OF GLASS FOAM

KEYWORDS	ABSTRACT
Foam glass, Mining Environmental Liabilities, Tailings	This work proposes as one of its objectives the reduction of PAM mining environmental liabilities through obtaining, at the laboratory level, glass foams. These foams are obtained mixing glass powder, silicon carbide as a foaming agent and mining tailings stored outdoors that occur in areas near the municipality of Vetás, Santander. In this work, a detailed sampling of said mining tailings was carried out and then, a chemical and mineralogical characterization was performed by SEM-EDS, XRF and XRD.



Additionally, physical and granulometric analyses were performed. Subsequently, the tailings with high SiO₂ content were mixed with silicon carbide powder, as well as with the recycled glass, which is traditionally the main raw material for the production of glass foams, said mixture was subjected to DSC and TGA tests to obtain the appropriate temperatures to carry out the sintering treatment. The temperatures used for sintering were 750, 950 and 1000 °C, at a heating rate of 5 °C/min and a holding time of 30 minutes in a muffle furnace with air atmosphere allowing to cool the samples inside the furnace after the heat treatment. A glass foam with an apparent density of 0.292 g/cm³, a percentage of porosity corresponding to 58% and a compressive strength of 8.96 MPa was obtained at 950 °C. Finally, the possibility of obtaining foam glass at a low cost, using mining tailings, was demonstrated.

1. INTRODUCCIÓN

Es importante mencionar que actualmente, la minería enfrenta costos elevados en el ámbito ambiental por adoptar procesos sin supervisión y sin controles basados en estándares ambientales. Esto trae como consecuencia la generación de grandes cantidades de pasivos ambientales mineros PAM [1].

En general, estos PAM se refieren a los impactos generados por las operaciones mineras abandonadas con o sin dueño, o donde no se haya realizado un cierre de minas regulado y certificado por la autoridad correspondiente.

Con el ánimo de contribuir a mitigar estos PAM, esta investigación tiene como propósito encontrar un posible aprovechamiento de los pasivos ambientales generados por la planta de procesamiento de minerales auroargentíferos de la empresa minera Reina de Oro, ubicada en el municipio de Vetas, Santander, mediante la obtención de espuma de vidrio. Estas espumas son materiales porosos aislantes del calor e insonorizadores. Se caracterizan por tener excelentes propiedades como baja densidad, baja conductividad térmica e incombustibilidad.

Dadas estas propiedades, han atraído un gran interés y se han empleado en áreas como la construcción, la química y los campos de defensa militar [2].

El aprovechamiento de estos Pasivos Ambientales Mineros permitiría contribuir de un modo significativo no solo a la solución de problemáticas ambientales, sino a la creación de nuevas fuentes de empleo en pro del crecimiento comunitario.

Por otra parte, los agentes espumantes empleados para la obtención de espuma de vidrio pueden actuar mediante descomposición térmica o redox [3]. Los que actúan mediante descomposición redox contienen carbono, entre ellos el carburo de silicio (SiC), carbón y compuestos orgánicos, que actúan a través de una reacción oxidante del agente espumante. Los agentes espumantes redox se utilizan para producir productos aislantes térmicos debido a la presencia de poros. El carburo de silicio (SiC) permite la formación de tamaños de poros controlados y precisos y por ello es tan empleado para la formación de este tipo de espumas [3].

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Para elaborar la espuma de vidrio fue



necesario realizar una serie de actividades y procesos que se describirán a continuación:

2.1 Toma de muestra

Con el objetivo de obtener una muestra representativa a lo largo y ancho de la pila donde se depositan los residuos s mineros, se tomaron 10 muestras de 0,5 Kg a 2 metros de profundidad y en intervalos de 3 metros, con el fin de obtener una muestra homogénea y representativa teniendo en cuenta que sus componentes pueden variar debido a que fueron depositados en diferentes épocas [3].

2.2 Caracterización de los relaves

La caracterización de estos residuos mineros se realizó a través de varias técnicas de análisis químico y de fases, así como granulométrico que se explicaran a continuación.

2.2.1 Caracterización química y de fases

Se realizó un análisis micro elemental SEM-EDS, utilizando un microscopio electrónico de barrido FEG QUANTA FEG 650, que analiza los Rayos X generados como producto de la interacción del haz de electrones generado por un microscopio electrónico de barrido con el material sometido a análisis para la identificación y cuantificación de rayos X característicos de elementos desde el berilio hasta el americio. Estos resultados fueron complementados con los del análisis mediante fluorescencia de rayos X realizado en un espectrómetro de fluorescencia de rayos X de longitud de onda S8 Tiger.

Con el objetivo de realizar un análisis cuantitativo mineralógico de las fases

cristalinas presentes en los relaves (Método Rietveld), se llevó a cabo una prueba de DRX. Para ello, se tomó una muestra representativa a través de cuarteo utilizando un muestreador tipo rifle de marca Humboldt y se llevó a un molino mortero Restch Rem 200 hasta obtener un tamaño menor de 38 μm .

El espécimen seleccionado de la muestra fue molido y homogenizado en un mortero de ágata. Posteriormente, el espécimen seleccionado fue montado en un porta muestras de Polimetilmetacrilato (PMMA) mediante la técnica de llenado frontal. El registro de datos se realizó en un difractor de polvo marca BRUKER modelo D8 ADVANCE con geometría de θ bajo las siguientes condiciones: voltaje (kV):40, corriente (mA):40 y registro de datos en el rango de 2° (2θ) a 70° (2θ), tiempo por paso de 0,6 s, paso de $0,02035^\circ$ (2θ) (Tiempo de duración de cada medida aproximadamente de 34 minutos y 52 segundos).

2.2.2 Caracterización granulométrica

El análisis granulométrico se realizó con el objeto de determinar cuantitativamente la distribución de tamaño de partículas de los componentes de la mezcla los cuales son; polvo de vidrio reciclado, residuo minero y como agente espumante carburo de silicio. Con ello se determinó si los componentes de la mezcla junto con el agente espumante (carburo de silicio) se podían usar como agregado para la elaboración de espuma de vidrio.

El análisis granulométrico se llevó a cabo haciendo pasar una muestra de 64 g de residuos minero, polvo de vidrio reciclado y agente espumante (carburo de silicio) a través de 6 tamices basados en la norma ASTM E11 con las siguientes mallas 30, 50,



70, 100, 140 y 200. Las muestras fueron secadas previamente en una estufa marca Memmert por 5 horas a una temperatura promedio de 110 °C con el objetivo de retirar la humedad y evitar que en el ensayo se presentara aglomeración [3].

2.3 Preparación de la espuma de vidrio.

Para la fabricación de las espumas, se preparó una mezcla (p/p) de 74,5% de polvo de vidrio reciclado, 24% de relave y 1,5% de carburo de silicio, este carburo de silicio se empleó como agente espumante. Luego dicha mezcla fue compactada axialmente bajo una carga de 6500 Psi para elaborar botones o pastillas de 15 g y con un diámetro de 2,9 cm y un espesor de 1,3 cm. A las mezclas se le adicionaron polivinil alcohol, esto para garantizar la compactabilidad de la mezcla, luego las mezclas, constituidas como botones, fueron secadas al aire por un tiempo de 8 días para después ser calentadas a 120 °C durante 24 h.

Para determinar la temperatura de tratamiento de sinterización, a las mezclas realizadas se les llevó a cabo pruebas de análisis termogravimétrico (TGA) y de análisis calorimétrico diferencial (DSC) utilizando una velocidad de calentamiento de 5 °C/min en presencia de O₂ y N₂ respectivamente, para lo cual se utilizó una balanza termogravimétrica TGA 2050 de la marca TA Instruments.

Finalmente, basado en condiciones de trabajo de otros investigadores [3,4, 5], se realizaron: una prueba de compresión a una velocidad de avance de 0,5 mm/min, la determinación de la densidad aparente a partir de la masa y las dimensiones de las muestras, y la porosidad. Para esta última propiedad se utilizó la siguiente ecuación y

con las condiciones operativas de anteriores investigaciones [3, 6,7].

$$\text{Porosidad} = \frac{1 - \text{densidad aparente}}{\text{densidad de la mezcla}} \times 100$$

2.4 Cianuro total

Debido a que el residuo minero procede de un proceso de cianuración de minerales auríferos, se realizó una prueba de cianuro total, tanto a una muestra de residuo minero como a la espuma de vidrio finalmente obtenida. Todo esto con la finalidad de conocer la traza de cianuro antes y después del proceso de sinterización, que permita evaluar la toxicidad de estos materiales. Esta prueba se llevó a cabo en el centro de investigación GIMBA en el parque tecnológico Guatigüará. Para ello, la muestra fue sometida a una destilación ácida a reflujo, durante 3 horas y, finalmente se analizó por titulación volumétrica con AgNO₃ [8].

3. RESULTADOS Y ANALISIS

A continuación, se expondrán los resultados obtenidos en el presente trabajo. El aspecto visual de la materia prima necesaria para obtener las espumas de vidrio, que en este caso son el residuo minero, el carburo de silicio (SiC) y el polvo de vidrio reciclado, se ven en la Figura 1.

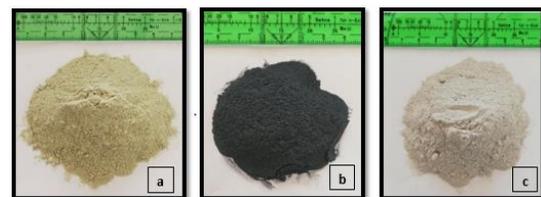


Figura 1. Muestra de materia prima empleada para elaborar espumas, a) residuo de mina de oro, b) agente espumante (SiC) y c) polvo de vidrio reciclado.

En la misma, se aprecia que son materiales con coloración verdosa para el relave, blanca para el polvo de vidrio reciclado y negra para el carburo de silicio el cual actúa como agente espumante, adicionalmente, se evidencia que la materia prima utilizada es de tamaño muy fino (polvos).

3.1 Caracterización fisicoquímica y de fases cristalinas del residuo minero

Con respecto a la prueba de granulometría, para elaborar las espumas de vidrio se recomienda un tamaño de partícula inferior a 400 μm para todos los elementos que componen la mezcla [9]. Es decir, tanto para el polvo de vidrio reciclado, el residuo minero y el agente espumante en este caso carburo de silicio, lo cual permite garantizar el proceso de formación de las espumas. Adicionalmente, el tamaño de partícula del agente espumante también influye en la característica estructural, es decir, en el tamaño de poro de las espumas de vidrio [9].

En la Figura 2, se observa que la materia prima a utilizar tiene un diámetro de partícula inferior a 400 μm . El relave ($D_{50}=136,0 \mu\text{m}$), el polvo de vidrio ($D_{50}=40,7 \mu\text{m}$), y el SiC tiene un tamaño de partícula pasante malla 200 (inferior a 74 μm).

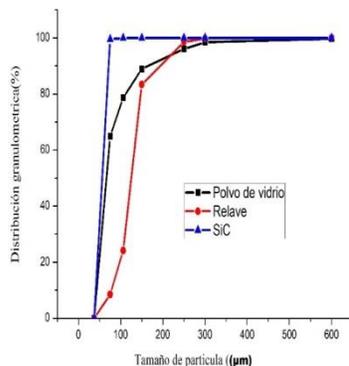


Figura 2. Resultado del análisis granulométrico del residuo minero, polvo de vidrio reciclado y agente espumante (SiC).

El D_{50} se determinó según modelo Rosin-Rammler [10]. Por lo anterior se confirma que se pueden utilizar estos materiales como material de partida para elaborar espumas de vidrio ya que su distribución de tamaño de partículas es adecuada [9].

A través de la técnica de energía dispersiva (ED), se analizaron 2 puntos aleatorios de la muestra de residuos mineros, identificados con la ayuda del microscopio electrónico de barrido, los cuales arrojaron valores semicuantitativos de los elementos químicos que se muestran en la Tabla 1. Se aprecia que, efectivamente presentan silicio y oxígeno en gran cantidad.

Tabla 1. Resultados del análisis químico elemental semicuantitativo realizado al residuo minero usando espectroscopía de energía dispersiva de rayos-X (EDS).

Elemento	Punto A		Punto B	
	% p/p	At%	% p/p	At%
C	10,81	17,06	9,48	20,99
O	45,29	53,69	26,75	44,48
Al	1,26	0,88	2,96	2,92
Si	40,92	27,63	19,58	18,54
S	0,35	0,21	-	-
K	0,44	0,21	1,44	0,98
Fe	0,94	0,32	1,01	0,48
Mg	-	-	0,37	0,4
Zr	-	-	38,41	11,2

A través del ensayo de fluorescencia de rayos X se cuantificaron los elementos químicos presentes en el residuo minero; estos resultados son mostrados en la Tabla 2. Ahí se expone un porcentaje de 36,81% (p/p) de silicio, encontrado en la muestra de residuo minero.

El residuo minero proviene de un depósito almacenado a la intemperie resultante de un procesamiento gravimétrico e hidrometalúrgico convencional aplicado a un mineral aurífero. Tiene componentes de SiO_2 , $\text{KA}_{12}(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{HO})_2$, Fe_3S_2 , FeS y



NaAl₂Si₃O₁₀. Es característico en este tipo de relaves mineros que tengan cuarzo, carbonatos, sulfatos, plagioclasas, calcita y silicatos en general, los cuales están asociados al oro [11].

Tabla 2. Resultados del análisis químico elemental (p/p) realizado al residuo minero mediante la técnica de fluorescencia de rayos X (FRX).

Elemento	Número Atómico (Z)	Concentración [%]	Óxido	Concentración [%]
Si	14	36,81	SiO ₂	78,75
Al	13	5,32	Al ₂ O ₃	10,05
K	19	4,83	K ₂ O	5,82
Fe	26	1,24	Fe ₂ O ₃	1,78
Na	11	0,27	TiO ₂	0,36
Mg	12	22,00	MgO	0,36
Ti	22	0,22	Na ₂ O	0,36
Ba	56	0,15	BaO	0,17
Ca	20	0,04	P ₂ O ₅	0,07
P	15	0,03	CaO	0,06
Zr	40	0,02	SO ₃	0,05
Si	16	0,02	ZrO ₂	0,03
Cu	29	0,02	CuO	0,02
Sr	38	0,02	SrO	0,02
Mn	25	0,01	MnO	0,02
As	33	0,01	As ₂ O ₃	0,02
Rb	37	0,01	ZnO	0,02
Zn	30	0,01	Rb ₂ O	0,01

La caracterización del residuo minero mediante las pruebas fisicoquímicas ha permitido comprobar que el elemento principal presente en el relave es el silicio, seguido de aluminio y potasio, como se muestra en la Tabla 2.

Por otra parte, los resultados del análisis realizado mediante DRX indican que la fase cristalina presente es el cuarzo u óxido de silicio (SiO₂). Esto concuerda con lo reportado en la Tabla 2. Investigaciones que han trabajado en la elaboración de espuma de vidrio [4,12-14], han utilizado una materia prima con una caracterización muy similar al residuo minero a tratar.

3.2 Fabricación de espuma de vidrio

En las figuras 3 y 4 se muestran los resultados de los análisis DSC y TGA realizados a esta mezcla, con el objetivo de determinar la temperatura de transición vítrea y el inicio

de la formación de CO₂ a partir de la descomposición del agente espumante.

En la curva DSC de la Figura 3 se identifica un cambio de concavidad, el cual indica que la temperatura de transición vítrea es 750 °C, además se observan picos entre 950 °C y 1200 °C atribuidos a un cambio en la viscosidad [16]. Adicionalmente en la curva TGA en la Figura 4 se muestra una ganancia de peso a partir de 630 °C, debido a la reacción del carburo de silicio con el oxígeno del ambiente para formar CO₂ [9].

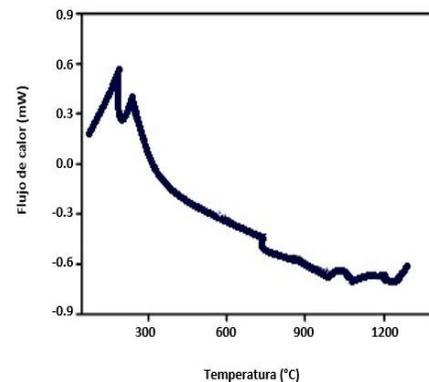


Figura 3. Curva DSC de la mezcla de polvo de vidrio reciclado, residuo minero y SiC.

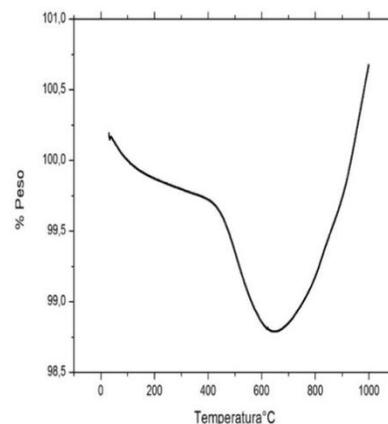


Figura 4. Curva TGA de la mezcla de polvo de vidrio reciclado, residuo minero y SiC.

Un factor importante en la formación de espuma de vidrio es la viscosidad de la muestra durante la sinterización. En este fenómeno la viscosidad está directamente



relacionada con la temperatura de sinterización de la espuma.

Esta viscosidad está encargada de controlar la máxima estabilidad de la espuma y a su vez, la forma, el tamaño y la homogeneidad de los poros. Cuando la temperatura de la espuma es relativamente alta, en este caso 1000 °C, la viscosidad se vuelve extremadamente baja [17,18], lo que dificulta que se dé la formación de una espuma de vidrio estable como se puede apreciar en la Figura 5.

Por el contrario, una temperatura baja (para este caso menor a 750 °C que es la temperatura que corresponde a la temperatura de transición vítrea [17,18] de acuerdo con los resultados de la prueba DSC que se puede apreciar en la Figura 3), es decir, cuando empieza el ablandamiento de la matriz, corresponde a una alta viscosidad, lo que hace que sea difícil lograr muestras con buena formación de poros en la matriz, tal como se visualiza en la Figura 5.

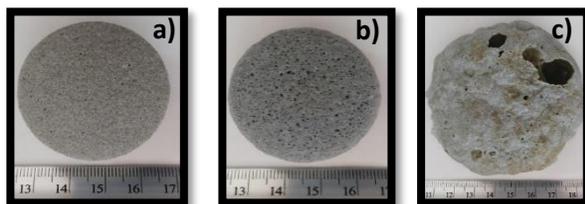


Figura 5. Fotografías de las muestras obtenidas al tratar la mezcla vidrio reciclado + residuos mineros + SiC a las temperaturas: a) 750 °C, b) 900 °C, c) 1000 °C.

Por tanto, durante el calentamiento, la matriz necesita una viscosidad adecuada, que permita que las muestras se expandan bajo la presión interna causada por la liberación del gas generado durante la reacción de oxidación del SiC, esa temperatura fue 950 °C, ya que a esa temperatura se logró espuma de vidrio con poros homogéneos tanto de manera externa e interna, como se

puede ver en la Figura 6. [4, 17,18].



Figura 6. Fotografía de densificación de la espuma de vidrio obtenida a una temperatura de 950°C.

Los resultados de la caracterización física y mecánica realizada a la muestra sinterizada indican que su densidad aparente es de 0,29 g/cm³, su porcentaje de porosidad es de 58% y su resistencia a la compresión es de 8,96 MPa, los cuales son comparables a los de las espumas de vidrio comerciales (ver Tabla 3). Aunque la porosidad de la muestra obtenida es inferior a la reportada en la literatura [9], esta se podría mejorar en posteriores pruebas y/o trabajos de investigación.

Tabla 3. Propiedades de productos comerciales de espuma de vidrio [9].

Propiedad	Rango
Densidad	0,1-0,3 g/cm ³
Porosidad	85-95%
Resistencia a la compresión	0,4-6 MPa

3.3 Cianuro total

El cianuro mediante soluciones diluidas de cianuro de sodio se utiliza en minería para extraer oro de minerales de baja ley que no pueden tratarse fácilmente mediante procesos físicos simples (liberación de minerales y métodos de concentración gravimétrica) [18]. Es por ello, que al tener como materia prima relaves generados por

cianuración de minerales auríferos de la industria del oro, se realizó un análisis de cianuro total, tanto al relave como en la espuma de vidrio sinterizada a 950 °C, encontrando solo cianuro total en el residuo minero como se observa en la Tabla 4.

Tabla 4. Concentración de cianuro total en residuo minero y en espuma de vidrio sinterizada a 950°C.

Material	Concentración de Cianuro total
Residuo minero	51,87 mg/kg
Espuma de vidrio obtenido a 950°C	0

Por otra parte, cabe aclarar que la concentración de cianuro presente en el residuo minero no genera un peligro para las personas que lo manipulan, ya que el grado de toxicidad del cianuro para los humanos depende del tipo de exposición.

Como el cuerpo humano reacciona de formas diversas a una misma dosis, se considera que la toxicidad de una sustancia está expresada como la concentración o dosis que resulta letal para el 50% de los individuos expuestos. (LC50 o LD50). La inhalación de una concentración letal de cianuro gaseoso (LC50) es de 100-300 partes por millón y en contacto con piel y ojos, el valor LD50 es de 100 mg/kg. Por lo anterior se puede decir que una concentración de 51,87 mg/kg no se encuentra entre los rangos letales para los seres humanos [8].

3.4 Análisis preliminar de costos

Cualquier proyecto que se quiera emplear por más amigable que sea con el medio ambiente, requiere que también sea económicamente viable para poderlo poner en marcha, es por ello que se realiza un análisis costo beneficio preliminar. Para ello se evaluó los precios de las materias primas

para la obtención de la espuma de vidrio, ver Tabla 5.

Tabla 5. Precio de materia prima utilizada para la fabricación de espumas de vidrio.

Descripción	Valor en el mercado
Polvo de vidrio reciclado	\$30.000/ton
Residuo minero	-----
Carburo de silicio	\$40.000/Kg
Polivinil alcohol	\$ 27.000/Lb

Teniendo en cuenta solo los precios de las materias primas y cabe aclarar que no se incluyen costos relacionados con el consumo de la energía consumida durante el proceso, se estima el costo para la producción de espuma de vidrio, el cuál para la producción de un ladrillo de espuma de vidrio de 50 g es de \$1,95 (aproximadamente 2 dólares). Este valor es inferior a los valores de mercado (Según Alibaba.com 150 dólares/m³). Por ello se sugiere que podría ser viable para desarrollar ladrillos de espuma de vidrio.

3. CONCLUSIONES

Se logró caracterizar el residuo minero mediante los ensayos de SEM-EDS y fluorescencia de rayos X, hallando la siguiente composición (p/p) de 78,75% SiO₂, 10,05% Al₂O₃, 1,78% Fe₂O₃ y 5,82% K₂O, la cual es similar con la composición del vidrio, que es la materia prima que generalmente se emplea para la fabricación de espuma de vidrio, lo que permite el uso de este tipo de residuos mineros en la mezcla utilizada para obtener espuma de vidrio.

Así mismo la caracterización granulométrica indicó que la mezcla utilizada para sinterizar y lograr como producto final espuma de vidrio fue inferior a 400 µm y cumple con el tamaño de partícula establecido para la obtención de espuma de vidrio.



Se demostró la posibilidad de obtener espumas de vidrio comercial partiendo de una mezcla que contiene polvo de vidrio, residuo minero y carburo de silicio, para ello se establecieron las variables granulometría y temperatura de sinterización con los siguientes valores: Tamaño de partícula de todos los componentes de la mezcla inferior a 400 μm y la temperatura de sinterización más idónea fue de 950 $^{\circ}\text{C}$, con un sostenimiento de 30 minutos, logrando espuma de vidrio con una densidad y resistencia a la compresión similares a las espumas de vidrio comercial, y contenidos de cianuro en concentraciones no riesgosos y a un bajo costo, así como un % de porosidad que podría ser mejorado por otros trabajos posteriores.

4. REFERENCIAS

- [1] M. Saade Hazin, *Buenas prácticas que favorezcan una minería sustentable*. Vol 157. CEPAL, 2014.
- [2] E. Bernardo, R. Castellan, S. Hreglich and I. Lancellotti, “Sintered sanidine glass ceramics from industrial wastes”, *J. Eur. Cer. Soc.*, vol. 26, no. 15, pp. 3335– 3341, 2006.
- [3] J. König, R. R. Petersen and Y. Yue, “Influence of the glass particle size on the foaming process and physical characteristics of foam glasses”, *J. Non. Cryst. Solids*, vol. 447, pp. 190–197, september 2016.
- [4] M. T. Souza, B. G. O. Maia, L. B. Teixeira, K. G. de Oliveira, A. H. B. Teixeira and A. P. Novaes de Oliveira, “Glass foams produced from glass bottles and eggshell wastes”. *Process Saf Environ Prot*, vol. 111, pp. 60–64, october 2017.
- [5] F. A. Da Silva Fernandes, S. Arcaro, E. F. Tochtrop Junior, J. C. Valdés Serra and C. P. Bergmann, “Glass foams produced from soda-lime glass waste and rice husk ash applied as partial substitutes for concrete aggregates”, *Process Saf Environ Prot*, vol. 128, pp. 77–84, august, 2019.
- [6] C. Rodriguez and A. Meléndez, “Hacia una economía circular en la fabricación de vidrio espumado y recubrimientos poliméricos a base de PVB a partir de desechos de la industria del vidrio y termoelectrica”, *Rev. Col. Mater.*, No 15, pp. 43-50, 2020.
- [7] C. Xi, F. Zheng, J. Xu, W. Yang, Y. Peng, Y. Li and J. L. Liu, “Preparation of glass ceramic foams using extracted titanium tailing and glass waste as raw materials”, *Constr Build Mater.*, vol. 190, 896–909, November, 2018.
- [8] B. F. Pérez, “Desarrollo de un nuevo Método”, Tesis Doctoral Universidad San Francisco de Quito, Ecuador, 2007.
- [9] M. Scheffer and P. Colombo, *Cellular Ceramics: Estructure, Manufacturing, Properties and Applications*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2005.
- [10] P. González Tello, F. Camacho, J. M. Vicaria and P. A. González, “A modified Nukiyama – Tanasawa distribution function and a Rosin – Rammler model for the particle-size-distribution analysis” *Powder Technol*, vol. 186, pp. 278–28, 2008.
- [11] J. L. Costafreda Mustelie, “Características generales del campo mineral aurífero aguas claras en el contexto geológico regional de la provincia Holguín, Cuba”, In IX Jornada Científico-Técnica de la Sociedad Cubana de Geología. Filial Holguín, Cuba. 24 de octubre de 1996, pp. 1–12.



[12] A. M. Marques and A. M. Bernardin, “Espumas cerámicas elaboradas a partir de residuos de vidrio sencillos”, In *Qualicer* 2008, Castellón España, 2008, pp. 91–95.

[13] H. R. Fernandes, , D. U. Tulyaganov and J. M. F. Ferreira, “Preparation and characterization of foams from sheet glass and fly ash using carbonates as foaming agents”, *Ceram. Int.*, vol. 35, no. 1, pp. 229–235, january 2009.

[14] C. Vancea and I. Lazău, “Glass foam from window panes and bottle glass wastes”, *Cent. Eur. J. Chem.*, vol. 12, no. 7, pp. 804–811, 2014.

[15] C. Arriagada, I. Navarrete and M. Lopez, “Understanding the effect of porosity on the mechanical and thermal performance of glass foam lightweight aggregates and the influence of production factors”, *Constr Build Mater*, vol. 228, 116746, 2019.

[16] M. E. Brown and P. K. Gallagher, *Handbook of thermal analysis and calorimetry: applications to inorganic and miscellaneous materials*. Vol 2. Elsevier, 2003.

[17] H. Yin, M. Ma, J. Bai, Y. Li, S. Zhang and F. Wang, “Fabrication of foam glass from iron tailings”, *Mater. Lett.*, vol. 185, pp. 511–513, september 2016.

[18] Z. Tang, M. Zhang, X. Zhang, J. He, X. Jia and L. Deng, “Effect of SiC content on viscosity and thermal properties of foam ceramic prepared from molybdenum tailings”, *J Non Cryst Solids*, vol. 513, pp. 15–23, march 2019.

