Obtención de concreto a partir del reuso de relaves de flotación de minerales polimetálicos de California Santander

Charlot Juliet Montes Fajardo, Bayron Jahir Rojas Rodriguez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Metalúrgico

Director

Walter Pardavé Livia

Magister en Ingeniería Metalúrgica

Codirector

Pedro Luis Delvasto Angarita

Doctor en Ciencia y Tecnología de Materiales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia De Materiales

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

A mi familia, porque todo lo que hago es por ellos, especialmente a mi madre Ester Maria Rodriguez Torres, que siempre me ha apoyado en todos mis proyectos, es mi motivación y me inspira cada día para lograr mis metas. A mi padre Alvaro Rojas Amaya y mis hermanos Johan Sebastian Rojas y David Santiago Rojas, por todo su apoyo. A mi gran amigo Hector Fabio Bran Gómez, porque siempre me ha apoyado y ha aconsejado. A mis queridos amigos Paola Suarez Barrios, Silvia Patiño Pedraza, Gabriela Rodriguez Marin, Sergio Villota Quesada, Jeferson Gómez Padilla, Agustin Payares Morales, Camila Villamizar Fontecha, Keissy Lopez Doria y Camila Amado Barbosa, porque en mi en mi etapa universitaria fueron grandes compañeros y hoy en día son amigos con los cuales puedo contar en mi vida, y especialmente a mi gran amigo Diego Fernando Garcia Rico por todo su apoyo, ingenieros, podemos lograr todo lo que soñamos.

Bayron Jahir Rojas Rodriguez

Dedico este proyecto primeramente a Dios, por darme la fuerza necesaria para culminar esta meta. A mi familia Montes Fajardo por todo su amor, apoyo y motivación para seguir hacia adelante. También, va dedicado a todas las personas que me apoyaron en este camino que hoy marca la transición a una nueva etapa de mi vida profesional y, finalmente, a los que no creyeron en mí, con su actitud lograron que tomará más impulso.

Charlot Juliet Montes Fajardo

Agradecimientos

A la Universidad Industrial de Santander por permitirnos formar como profesionales y hacer parte de esta gran institución.

A nuestro director Msc. Walter Pardavé Livia y PhD Pedro Luis Delvasto Angarita, por su apoyo, confianza y constancia para la ejecución de este proyecto.

A todo el personal docente y profesionales de laboratorio de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, que fueron de gran ayuda en nuestra formación profesional.

Charlot y Bayron

A mi director Walter Pardavé mi mayor gratitud por su apoyo. A Jose Fernando Irreño, María Teresa Muñoz y Luis Alejandro Reatiga por enseñarme con el lenguaje de amor el significado de una verdadera amistad.

Charlot Montes

Tabla de Contenido

Pág.

Introducción 13

1. Objetivos 14

1.1 Objetivo General 14

1.2 Objetivos Específicos 14

2. Fundamentación Teórica 15

2.1 Relaves de flotación de minerales polimetálicos 16

2.1.1 Generación de relaves 16

2.1.2 Pasivos ambientales 18

2.1.3 Regulación de los residuos mineros 18

2.2 Economía circular 19

2.2.1 Producto de construcción obtenido a partir de recursos mineros - Bloque de concreto 19

2.3 Ensayos mecánicos 20

3. Metodología 21

3.1 Revisión bibliográfica y estudio de antecedentes 22

3.2 Muestreo 23

3.3 Caracterización 23

3.3.1 Caracterización química 24

3.3.1.1 Difracción de rayos X. 24

3.3.1.2 Fluorescencia de rayos X. 24

3.3.1.3 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM). 24

3.3.2 Caracterización física 24

3.3.3 Caracterización mineralógica 25

3.3.4 Granulometría 25

3.3.5 Microscopía 26

3.3.6 Selección y preparación de la mezcla 26

3.3.6.1 Selección. 26

3.3.6.2 Preparación de la mezcla. 26

3.3.7Obtención de concreto 27

3.4 Ensayos mecánicos y pruebas 27

3.4.1 Ensayo de Resistencia a la compresión 27

3.4.2 Prueba de Hidratación 28

3.5 Prueba ABA y calidad ambiental 28

4. Resultados y discusiones 29

4.1 Caracterización 29

4.1.1 Caracterización Química 29

4.1.1.1 Fluorescencia de Rayos X. 29

4.1.1.2 Microscopía Electrónica de Barrido. 31

4.1.2 Caracterización Física 33

4.1.3 Caracterización Mineralógica 34

4.1.4 Granulométrico 35

4.1.5 Microscópica 38

4.2 Selección de mezcla 39

4.3 Ensayos mecánicos y pruebas 43

4.3.1 Prueba de hidratación 43

4.3.2 Ensayos Resistencia a la Compresión 45

4.4 Calidad ambiental 47

4.4.1 Prueba ABA 47

4.4.2 Prueba de concreto en un medio 47

5. Conclusiones 49

6. Recomendaciones 50

Referencias Bibliográficas 51

Apéndices 53

Lista de Tablas

Pág.

Tabla 1. Resultados análisis elemental cuantitativo de la muestra 30

Tabla 2. Densidad aparente de la muestra de relaves mineros 33

Tabla 3. Distribución granulométrica de la muestra de relaves 36

Tabla 4. Reemplazo de relaves en el cemento 40

Tabla 5. Reemplazo de relaves en la arena fina 42

Tabla 6. Requisitos de absorción de agua según NTC 4076 45

Tabla 7. Análisis de metales pesados 48

Lista de Figuras

Pág.

Figura 1. Tipos de contaminación por relaves mineros en fuentes hídricas, el suelo y el aire por material particulado 16

Figura 2. Esquema del procesamiento del oro mediante flotación de minerales 17

Figura 3. Tipos de bloques de concreto 20

Figura 4. Esquema de metodología del trabajo realizado 22

Figura 5. Muestra de relaves mineros 23

Figura 6. Imagen de SEM de la muestra de relaves a 100 μm y Espectro de Difracción del Punto 1 31

Figura 7. Imagen de SEM de la muestra de relaves a un zoom de 100 μm y Espectro de Difracción del Punto 2 32

Figura 8. Imagen de SEM de la muestra de relaves a un zoom de 100 μm y Espectro de Difracción del Punto 3 33

Figura 9. Composición mineralógica de la muestra de relaves 35

Figura 10. Tamaño de partículas pasantes D80 y D50 36

Figura 11. Modelos de distribución granulométrica: a) Modelo de Gaudin – Schuhmman, b) Modelo Rossin - Rammler 37

Figura 12. Micrografía retenido de 325 mesh 38

Figura 13. Micrografía pasante de 140 mesh 39

Figura 14. Resistencia a la compresión de las diferentes mezclas 41

Figura 15. Resistencia a la compresión de las diferentes mezclas 43

Figura 16. Pesos promedio de los bloques durante las diferentes etapas de la prueba de hidratación..... 44

Figura 17. Ensayos de Resistencia a la Compresión de los bloques fabricados con la composición de la mezcla 2..... 46

Lista de Apéndices

Pág.

Apéndice A. Selección y preparación de la mezcla 53

Apéndice B. Informe FRX 56

Apéndice C. Análisis elemental en tres puntos de la muestra 58

Apéndice D. Distribución granulométrica 60

Apéndice E. Porcentaje de materia prima para cada mezcla 61

Apéndice F. Ensayo de compresión mezcla 2 63

Apéndice G. Prueba de Hidratación 65

Apéndice H. Prueba de calidad ambiental 66

Resumen

Título: Obtención de concreto a partir del reuso de relaves de flotación de minerales polimetálicos de California, Santander[*]

Autor: Charlot Juliet Montes Fajardo, Bayron Jahir Rojas Rodriguez[**]

Palabras Clave: Relaves, polimetálicos, economía circular, flotación, impacto ambiental, concreto

Descripción:

En el presente trabajo se realizó la obtención de concreto a partir del reuso de relaves de Flotación de minerales polimetálicos provenientes del municipio de California Santander, con una selección de mezcla adecuada mediante la variación de la composición de la materia prima (cemento y relaves). Inicialmente, se realizó la caracterización química de los relaves mineros mediante fluorescencia de rayos x (FRX) y SEM, además, la caracterización física, mineralógica, granulométrica y microscópica. Posteriormente, se llevó a cabo la preparación de las mezclas reemplazando la composición del relave en la arena fina y del relave en el cemento con 90%, 50% y 10% respectivamente. Para el proceso de obtención del concreto, se realizó un lavado con agua a 60°C del relave; luego se peletizó y mezcló con las demás materias primas; Para posteriormente hacer el proceso de moldeo y obtención del producto. Finalmente, se realizaron los ensayos mecánicos de compresión, las pruebas de hidratación y las pruebas ABA (Acid-Base Accountig) para cada bloque de concreto. Se evidenció en los resultados obtenidos que la mezcla M2 con el 50% del relave en la arena fina es la más adecuada para obtener concreto, además, los bloques fabricados cumplen con las especificaciones de la resistencia a la compresión y de hidratación de la norma NTC 4026, la prueba ABA da como resultado un alto potencial de acidez de los relaves y la prueba de control ambiental expuestos a un medio de agua lluvia, cumplen los parámetros establecidos en la resolución 631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

[*] Trabajo de Grado

[**] Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniera Metalúrgica y Ciencia de los materiales. Ingeniería Metalúrgica. Director: Walter Pardavé Livia. Magister en Ingeniería Metalúrgica. Codirector: Pedro Luis Delvasto Angarita. Doctor en Ciencia y Tecnología de Materiales.

Abstract

Title: Obtaining concrete from the reuse of flotation tailings of polymetallic minerals from California, Santander*

Author(s): Charlot Juliet Montes Fajardo, Bayron Jahir Rojas Rodriguez**

Key Words: Tailings, polymetallics, circular economy, flotation, environmental impact, concrete

Description:

In the present work, I obtained concrete from reusing polymetallic mineral flotation tailings from the Municipality of California Santander. I did this with a fine mix selection by varying the raw material composition (cement and tailings). Initially, the chemical characterization of the mining tailings was carried out using X-ray fluorescence (XRF) and SEM, as well as physical, mineralogical, granulometric, and microscopic characterization. Subsequently, I prepared the mixes, replacing the tinned fn of fine the and the tailings in the cement with 90%, 50%, and 10%, respectively.prprewashedncrete, the tail, as they then watered at 60°C; t en, mixed was pelletized, and mixed with her raw materials; to later carry out the molding process and obtain the product. Finally, I performed mechanical compression tests, hydration tests, and ABA (Acid-Base Account) on each concrete block. The results showed that the M2 mixture with 50% of tailings in fine sand is suitable for creating concrete. In addition, the manufactured blocks meet the specifications of compressive strength and hydration of the NTC 4026 standard, the ABA test results in a high acidity potential of the tailings and the environmental control test exposed to a rainwater medium meets the parameters established in Resolution 631 of 2015 of the Ministry of Environment and Sustainable Development.

* Degree Work

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Metallurgical Engineering. Director: Walter Pardave Livia. Master's Degree in Metallurgical Engineering. Co-director: Pedro Luis Delvasto Angarita. Doctor in Materials Science and Technology.

Introducción

A través de los años se ha realizado la actividad minera como fuente de obtención de minerales y metales, la cual comprende diferentes operaciones que se llevan a cabo para la obtención selectiva de minerales de una mina o yacimiento de la corteza terrestre. Lo cual, también, implica la extracción de grandes cantidades de rocas para obtener pequeñas cantidades del mineral deseado. Dentro de los procesos unitarios en minería se encuentra la flotación de minerales, que se basa en principios fisicoquímicos para obtener concentrados de minerales valiosos, para ello, se usa la hidrofobicidad e hidrofilicidad de las partículas de minerales por el agua. La flotación genera unas relaves o colas que son el producto que se rechaza luego del proceso. En Colombia en el año 2020 se alcanzó una producción de 47,6 toneladas de oro (ANM, 2020), en una mina convencional del país se explota aproximadamente 1 Tonelada de rocas para la extracción del mineral de oro, plata, entre otros. Los depósitos que generan estas explotaciones son de aproximadamente 900 Kilogramos siendo esto el 90% del material removido, almacenándose como depósitos de relaves del material a recuperar. Los relaves generan un impacto ambiental en el aire, agua y suelo, por tal motivo, debe estar regulado y controlado el manejo de estos, para aprovecharlos de manera sostenible y así incentivar una economía circular. Con el fin de almacenar y reutilizar los depósitos de relaves, el presente trabajo tiene como propósito hallar la selección de la mezcla adecuada mediante la variación de la composición de la materia prima (cemento y relaves) para la obtención de concreto a partir del reuso de relaves de Flotación de minerales polimetálicos provenientes del municipio de California Santander.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Obtener concreto a partir de mezclas que incluyen relaves del proceso de flotación de minerales polimetálicos provenientes del municipio de California Santander.

1.2 Objetivos Específicos

Caracterizar los relaves de flotación de minerales auríferos de California Santander mediante análisis, químico, físico, mineralógico, granulométrico y microscópico.

Establecer la selección de mezcla adecuada del concreto de construcción con relaves mineros y materiales convencionales.

Evaluar las propiedades mecánicas y la calidad ambiental del concreto obtenido a partir de mezclas que incluyen el relave de flotación de minerales polimetálicos.

2. Fundamentación Teórica

Los pasivos ambientales representan los impactos negativos causados por la contaminación producto de la actividad minera, actualmente se han venido presentando inconvenientes con los relaves de flotación de minerales convencionales en Colombia, lo cual ha llamado la atención en los últimos años en el sector minero, debido a que los relaves son un desecho derivado del beneficio de los minerales polimetálicos. Estos desechos al no ser tratados y almacenados adecuadamente producen contaminación ambiental, que genera un impacto social y económico en las comunidades aledañas. La problemática de los depósitos de relaves surge por el constante crecimiento y la manera como se almacenan en forma de escombros en espacios abiertos sin ninguna protección, generando problemas como la erosión en los suelos, la contaminación del aire por el material particulado, la liberación de gases, y la permeabilidad que facilita que los desechos como sustancias lixiviantes y metales pesados vayan dirigidos como drenajes ácidos hacia las fuentes hídricas. Todo esto conlleva a riesgos como la deforestación y deslizamientos en la zona, afectación de la salud de las personas y fauna, además, aspectos económicos para el tratamiento de aguas contaminadas. Por estas razones, se deben plantear alternativas sostenibles de reutilización de los depósitos de relaves que mitiguen el impacto ambiental (figura 1), y contribuyan socialmente en beneficio de las comunidades cercanas.

Figura 1.

Tipos de contaminación por relaves mineros en fuentes hídricas, el suelo y el aire por material particulado

Nota. Tomado de Cárdenas Ticlavilca, F. J: (2019). Propuesta de uso de relaves de mina polimetálica en la fabricación de unidades de albañilería - caso ex unidad minera Mercedes 3 (p. 5, 6)

2.1 Relaves de flotación de minerales polimetálicos

Los relaves son un conjunto de desechos tóxicos submilimétricos de procesos mineros y concentración de minerales comúnmente constituido por tierra, minerales, agua y rocas. Por lo general contienen altas concentraciones de químicos y elementos que afectan el medio ambiente, por lo que su transporte y disposición final debe ser estable tanto física, hidrológica y químicamente en el transcurso del tiempo (Cárdenas, 2019, p.14).

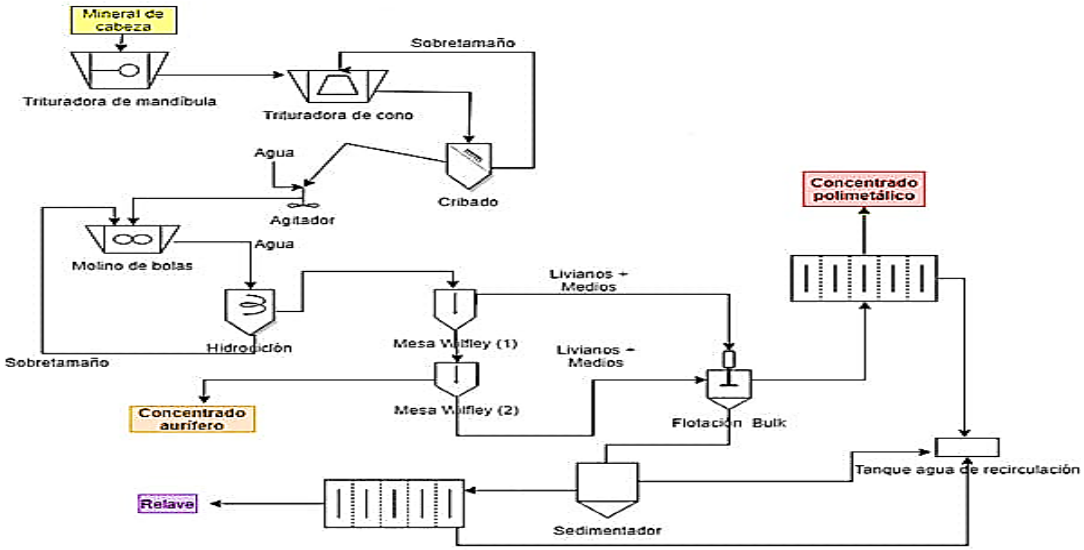
2.1.1 Generación de relaves

Como bien se sabe el proceso de flotación genera unos relaves o colas que son el producto que se rechaza luego del beneficio del mineral, siendo este una etapa que se produce en la minería

superficial y subterránea. Entonces, la generación de estos relaves es provenientes de las mazas de rocas extraídas de la mina que pasan por el proceso previamente de la trituración, molienda y clasificación de tamaños para finalmente pasar a las celdas de flotación (figura 2) donde se extrae ya el mineral valioso de la mena.

Figura 2.

Esquema del procesamiento del oro mediante flotación de minerales



Nota. Tomado de Reyes, C.A.R.; Livia W. P.; & Galvis, C. S. (2020) Estudio geometalúrgico del beneficio del oro en un depósito mineral en la Cordillera Oriental de los Andes Colombianos, por, *Revista Científica GeoLatitud*, 3(2), 2-12.

Es en esta etapa donde se adicionan aditivos químicos que facilitan la separación de los metales entre sí por medio de su gravimetría haciendo que por sus diferencias de densidades floten los minerales menos densos y se sedimenten los más densos en es este caso los relaves. Hay que resaltar que en estas plantas mineras normalmente hacen tratamientos para la recuperación del

agua utilizada con el fin de reutilizarla nuevamente el proceso de beneficio de la planta (Cárdenas, 2019, p.15).

2.1.2 Pasivos ambientales

Se puede tener como definición de Pasivo ambiental: “Es el impacto ambiental negativo, susceptible de ser medido, ubicado delimitado geográficamente, que se identifica con posterioridad a la finalización de la actividad, obra o proyecto que lo provocó, que genera un nivel de riesgo no aceptable a la salud humana o al ambiente; de acuerdo con lo establecido por las autoridades ambientales, y para cuyo control no hay un instrumento ambiental vigente” (Cabrera & Ordoñez, 2022, p. 6).

Los pasivos ambientales mineros implican los socavones o labores mineras, también, los botaderos y los relaves de minas que dejaron de operar, siendo los relaves mineros abandonados, en forma específica, los que generan alteraciones en el medio ambiente como contaminación de aguas superficiales y subterráneas; contaminación de suelos de la zona de influencia de estos depósitos; impacto visual negativo; riesgo continuo de daños al ecosistema frente a los desastres naturales; presencia de metales pesados en el medio físico (Romero & Flores, 2010, p.76).

2.1.3 Regulación de los residuos mineros

En la actualidad en Colombia no existe una normativa que regule el manejo y control de los residuos mineros, sin embargo, se han llevado a cabo consultorías con el fin de proponer lineamientos técnicos de políticas de buenas prácticas para estandarizar los procesos de presas de

residuos mineros, dentro del documento elaborado bajo el Contrato de Consultoría GGC-468-2020, se presentan distintos análisis sobre la información técnica y metodologías de manejos de presas de residuos, que abarcan la concepción, planificación y diseño de las presas de residuos y las diferentes etapas a través de las cuales se llevan a cabo unas líneas estratégicas (Geológicas, 2020). En el ámbito internacional países como Chile tienen una normativa para el manejo de los relaves, que está regida a través del Decreto Supremo N.º 248 (Reglamento para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relaves), esto surge como necesidad de proteger la salud y seguridad de las personas, el medio ambiente, la utilización de los recursos, además, de la diversidad de sistemas de depósitos de relaves (Decreto Supremo N.º 248, 2007).

2.2 Economía circular

La economía circular es un modelo de producción y consumo sostenible, en donde las materias primas se mantienen en ciclos productivos donde se pueden aprovechar al máximo, promoviendo la optimización de recursos dándole un nuevo uso a los residuos de las materias.

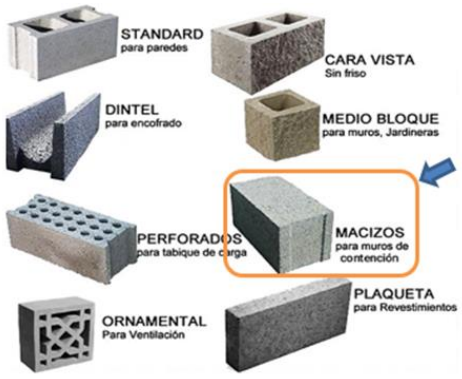
2.2.1 Producto de construcción obtenido a partir de recursos mineros - Bloque de concreto

Los bloques de concreto son elementos prefabricados y diseñados para la albañilería utilizados en la construcción, comúnmente su materia prima contiene cemento, arena, agua, piedras y demás aditivos, dependiendo del tipo de bloque que se desea fabricar (figura 3), si es

perforado, dintel, ornamental, macizo, entre otros y su uso, varían las composiciones de dichas materias primas en su respectiva mezcla.

Figura 3.

Tipos de bloques de concreto



Nota. Adaptado de: Ceramipego, (2018). Tipos de bloques de concreto

2.3 Ensayos mecánicos

Prueba de hidratación - ASTM C140/C140M − 22b Standard Test Methods for Sampling and Testing Concrete Masonry Units and Related Units, en su ítem 8 establece los requerimientos para llevar a cabo la prueba de hidratación y establecer esta característica del concreto. Este ensayo tiene como objetivo determinar a cantidad de agua que absorbe la muestra, luego de su saturación en agua durante 24 horas (ASTM C140/C140M, 2022). La capacidad de hidratación de un ladrillo concreto está definida por el cociente entre el peso de agua que absorbe y su propio peso cuando se encuentra seco.

Resistencia a la compression - ASTM C170/C170M-17 Standard Test Method for Compressive Strength of Dimension Stone. Durante las pruebas de compresión se somete el

material o pieza a una carga de aplastamiento hasta que llegue a la falla o se fracture. La norma técnica ASTM C170/C170M establece el procedimiento para realizar el ensayo de resistencia a la compresión en distintos materiales, entre ellos el concreto. Señala las condiciones requeridas para realizar un ensayo de compresión uniaxial en condición seca y saturada con carga perpendicular y paralela a la veta (ASTM C170/C170M-17, 2017*)*.

2.4 Pruebas de calidad ambiental

Prueba ABA (Acid-Base Accounting) - Consiste en establecer el potencial de generación de ácido (PA) y el potencial de neutralización (PN) de una determinada muestra para finalmente, en función de ambos, PA y PN, determinar el potencial neto de neutralización (NNP) y el ratio PN/PA (Borie, 2015).

3. Metodología

Con el fin de cumplir los objetivos propuestos, a continuación, la *Figura 4* muestra un flujograma general y se detallan las actividades desarrolladas:

Figura 4.

Esquema de metodología del trabajo realizado

3.1 Revisión bibliográfica y estudio de antecedentes

Durante el desarrollo del proyecto se consultó bibliografía acerca del tema en diferentes fuentes de literatura, como proyectos de investigación, artículos científicos, libros especializados, normas técnicas y en la base de datos de la Universidad Industrial de Santander con los temas de interés.

3.2 Muestreo

Como materia prima se utilizaron 115 kg de relaves de flotación de minerales polimetálicos, obtenidos de minas del municipio de California, Santander. Esta materia prima se recolectó de forma manual y aleatoria correspondiente a seis puntos de 20 kg cada uno.

Figura 5.

Muestra de relaves mineros

3.3 Caracterización

En esta etapa se caracterizaron las muestras de los relaves mineros, donde se realizó un proceso de caracterización química para identificar y cuantificar la composición elemental, a través, de las técnicas de difracción de rayos X, fluorescencia de rayos X y microscopia electrónica de barrido; en el proceso de caracterización física se determinó la densidad real de la muestra. También, se llevaron a cabo otros tipos de caracterización como mineralógica, granulométrica y microscópica.

3.3.1 Caracterización química

La muestra fue homogenizada en un mortero de ágata y llevado a un tamaño de partícula menor a 38 micras (400 mesh). Posteriormente, la muestra seleccionada fue montada en porta muestras de polimetilmetacrilato (PMMA) mediante la técnica de llenado frontal.

3.3.1.1 Difracción de rayos X. Los análisis cuantitativos de las fases encontradas se realizaron mediante el ajuste entre los perfiles observados y los perfiles de difracción reportados en la base de datos utilizando el Método de Rietveld.

3.3.1.2 Fluorescencia de rayos X. Se realizó el análisis elemental Cuantitativo de la muestra de minerales.

3.3.1.3 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM). Usando este tipo de microscopio se obtuvieron imágenes de alta resolución de la superficie utilizando las interacciones electrón-materia.

3.3.2 Caracterización física

Se determinó la densidad aparente de la muestra, por medio del método del picnómetro, registrando el peso inicial (p_i) de una muestra de 3 g, posterior a esto se registró el peso del picnómetro más la muestra (p_1), seguidamente, se adicionó agua destilada y se anotó el peso del

picnómetro (p_2), con la diferencia de estos pesos se halla el volumen, para finalmente determinar densidad (ρ), por medio de la ecuación 1.

$$\boldsymbol{\rho = \frac{pi}{p1 - p2}} \quad (1)$$

3.3.3 Caracterización mineralógica

Se identificaron las especies de minerales y su porcentaje en peso presente en la muestra de relaves producidos en el proceso de flotación.

3.3.4 Granulometría

Se realizó la distribución granulométrica con una muestra de 124.2 g, utilizando tamices con número de malla 100, 140, 200, 270 y 325. Posteriormente, se analizaron los datos de distribución de tamaños usando los modelos de *Gaudin – Schuhmman* y *Rossin – Rammler*. A continuación, se muestran las ecuaciones de cada modelo:

Gaudin – Schuhmman

$$\boldsymbol{Y = 100\left(\frac{X}{K}\right)^{a}} \quad (2)$$

Y= % Acumulado pasante para cierta abertura de tamix (x)

X= Abertura de tamiz, μm

K= Parámetro de tamaño (constante), representa el tamaño máximo en la distribución

a= Parámetro de distribución (constante), entre mayor es su valor más uniforme es la distribución

Rossin – Rammler

$$\boldsymbol{R = 100e^{-\left(\frac{X}{x'}\right)^{a}}} \quad (3)$$

Y= % Acumulado pasante para cierta abertura de tamix (x)

X= Abertura de tamiz, μm

x°= Parámetro de tamaño (constante)

a= Parámetro de distribución (constante)

3.3.5 Microscopía

Utilizando el estereoscopio Olympus SZ61 se tomaron micrografías de la muestra del retenido de 325 mesh, también, micrografías donde se contiene aproximadamente el 15% de la muestra que fue el retenido de 140 mesh.

3.3.6 Selección y preparación de la mezcla

La dosificación adecuada en las mezclas de concreto indica que la composición de la arena fina es 75% y el cemento es 25%, para obtener un concreto de calidad.

3.3.6.1 Selección. En esta etapa se realizaron los respectivos cálculos para la variación del porcentaje de 90%, 50% y 10% de relave en el cemento (M1, M2, M3) y de relave en la arena fina (M4, M5, M6), se obtuvieron seis diferentes composiciones de mezclas.

3.3.6.2 Preparación de la mezcla. Se realizó la preparación de la materia prima lavando con agua a 60°C el relave, luego se llevó a la maquina peletizadora para obtener los pellets, y

posteriormente, se agregó junto con cemento y agua mezclando hasta lograr una contextura homogénea, como se observa en el Apéndice A.

3.3.7Obtención de concreto

Con la mezcla preparada, se realizó el proceso de moldeo en el cual se vierte uniformemente en los moldes de bloques o cilindros la mezcla, luego por un tiempo de 28 días se llevó a cabo el proceso de curado y se obtuvo el producto final.

3.4 Ensayos mecánicos y pruebas

Finalmente, se les realizaron a los bloques de concreto obtenidos las pruebas de hidratación, prueba ABA y ensayo de resistencia a la compresión, para determinar si cumplen con los requisitos establecidos según las normas técnicas.

3.4.1 Ensayo de Resistencia a la compresión

Durante los ensayos de compresión se sometieron las probetas de concreto a una carga uniaxial hasta su falla. Estos ensayos se realizaron bajo la *NTC 673:2010*, en el equipo *Prensa Hidráulica CS112298* del Laboratorio de Estructuras y Materiales de la Universidad Industrial de Santander, con los siguientes parámetros: velocidad de ensayo 0.10 mm/s; capacidad del equipo 1500 KN; temperatura 23°C; humedad 60%.

3.4.2 Prueba de Hidratación

La norma NTC 4017, establece para este ensayo que los bloques no deben pesar menos de 250 g, por tal razón, se registró el peso inicial de los bloques antes de la inmersión, cuyo promedio es 459,24 g siendo aptos para la prueba, luego durante 24 horas se realizó el proceso de secado en una estufa a ± 110 a 115°C y posteriormente se registró el peso. Al trascurrir 2 horas de haber secado se anotó nuevamente el peso, y la diferencia de peso cumple con la norma que establece que esta diferencia de peso no debe ser mayor a 0.2%. Por último, se sumergieron los bloques en agua durante 24 horas, pasado el tiempo de la prueba, se retiró el exceso de agua con un paño previamente humedecido y se registró el peso final.

3.5 Prueba ABA y calidad ambiental

La prueba Acid-Base Account (ABA), se basó en un balance entre los componentes de la muestra potencialmente generadores de ácido (Potencial de Acidificación, PA) y los componentes neutralizantes de ácidos (Potencial de Neutralización, PN). Por consiguiente, se determinó el Potencial de Acidificación a la muestra del relave pulverizado, mediante técnica de fluorescencia de Rayos X, basándose en el análisis químico del contenido de azufre. Seguidamente, se determinó el Potencial de Neutralización, a través, de la digestión ácida de una porción de muestra durante 24 horas, a una temperatura controlada y posterior titulación. Teniendo ambos potenciales se halló el Potencial Neto de Neutralización, de la siguiente forma:

$$\mathbf{PNN = PN - PA} \quad (4)$$

PNN= Potencial Neto de Neutralización

PN= Potencial de Neutralización

PA= Potencial de Acidificación

También, se realizó una prueba de control ambiental a trozos de bloques de concreto para evaluar la presencia de metales pesados y el pH, cuando se exponen a un medio de agua lluvia.

4. Resultados y discusiones

4.1 Caracterización

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de las pruebas de caracterización química, física, granulométrica y microscópica.

4.1.1 Caracterización Química

Los resultados de la caracterización química se obtuvieron a través de Fluorescencia de Rayos X, Difracción de Rayos X y Microscopia Electrónica de Barrido SEM-EDS.

4.1.1.1 Fluorescencia de Rayos X. Los resultados obtenidos en la *Tabla 1* presentan la concentración elemental y de los compuestos que conforman la muestra de relaves, estos se encuentran ordenados según su composición elemental. Los resultados muestran al Silicio como

el elemento que se encuentra en mayor proporción en la muestra con un 30.54%, seguido por el Aluminio con 8.83%, los demás elementos se encuentran en cantidades por debajo de 3.32%, También, se identificaron los elementos Germanio y Molibdeno, pero no son cuantificables. Asimismo, el SiO2 es el compuesto de mayor presencia en los relaves con un 65.34%.

Tabla 1.

Resultados análisis elemental cuantitativo de la muestra

Muestra				**Relave Sin Tratamiento ***			
Porcentaje cuantitativo en óxidos y elemental (FRX)							
Elemento	**Concentración**	**Compuesto**	**Concentración**	**Elemento**	**Concentración**	**Compuesto**	**Concentración**
Si	30.54%	**SiO_2**	65.34%	**Na**	0.17%	**Na_2O**	0.23%
Al	8.83%	**Al_2O_3**	16.68%	**Pb**	0.15%	**PbO**	0.17%
K	3.32%	**K_2O**	3.99%	**Ba**	0.09%	**BaO**	0.10%
Fe	1.61%	**Fe_2O_3**	2.31%	**Sr**	0.05%	**SrO**	0.06%
Ca	0.93%	**CaO**	1.31%	**Mn**	0.03%	**MnO**	0.03%
S	0.43%	**SO_3**	1.08%	**Cu**	0.02%	**CuO**	0.03%
Mg	0.41%	**MgO**	0.68%	**Zr**	0.02%	**ZrO_2**	0.03%
Ti	0.30%	**TiO_2**	0.50%	**W**	0.02%	**WO_3**	0.02%
P	0.24%	**P_2O_5**	0.54%	**Rb**	0.01%	**Rb_2O**	0.01%

Elementos minoritarios			
Elemento	**Concentración**	**Compuesto**	**Concentración**
Zn	95 PPM	**ZnO**	0.01%
Cr	60 PPM	**Cr_2O_3**	87 PPM
Ni	26 PPM	**NiO**	33 PPM
		%LOI	6.85%

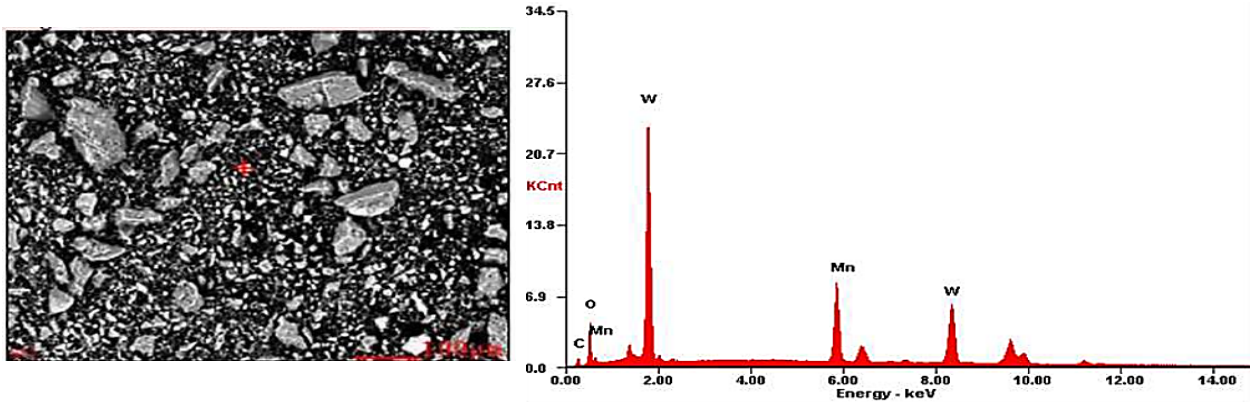
Nota. La prueba de Espectroscopia de Fluorescencia de Rayos X, fue tomada en el equipo *Espectrofotómetro de Absorción Atómica AGILENT SPECTRA 240 S* del *Laboratorio de Servicios Químicos Minero Metalúrgicos y Ambientales GIMBA de la Universidad Industrial de Santander,* cuyo informe se encuentra en el *Apéndice B.*

4.1.1.2 Microscopía Electrónica de Barrido. Con la finalidad de evidenciar la presencia de partículas de metales libres dentro de la muestra se tomaron imágenes en tres diferentes puntos a una escala de zoom de 100 µm.

Un primer análisis a 100 µm, en un *Punto 1* de la muestra, indica la presencia de Wolframio (62.46%) así como de oxígeno (15.36%), conformados por la formación cristalina de trióxido de Wolframio (WO_3), esto se puede corroborar en los resultados del análisis de FRX (*Tabla 1*) donde se encuentra este tipo de compuesto en la muestra. Se observa la presencia de Manganeso (17.44%), conformado por la presencia del óxido del metal. Igualmente se evidencian este tipo de compuesto en la muestra con altos porcentajes de abundancia, como se evidencia en el difractograma de la *Figura 6* y el *Apéndice C*.

Figura 6.

Imagen de SEM de la muestra de relaves a 100 µm y Espectro de Difracción del Punto 1



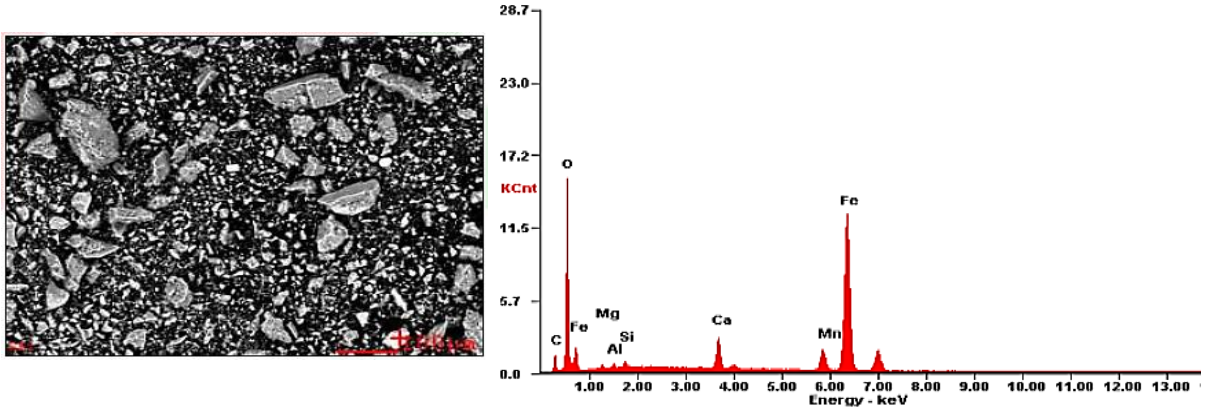
Nota. Los resultados fueron tomadas por el método SEM-EDS en el *Laboratorio de Servicios Químicos Minero Metalúrgicos y Ambientales GIMBA de la Universidad Industrial de Santander.*

En la segunda imagen tomada por el método SEM-EDS, se tomó un *Punto 2* específico se evidencia la presencia de partículas de Fe (35,97%) asociado a una alta presencia de oxigeno

observados a un zoom de 100 µm, esto esta relacionado a la composición del óxido de hierro como se puede observar en la *Figura 7* y el *Apéndice C.*

Figura 7.

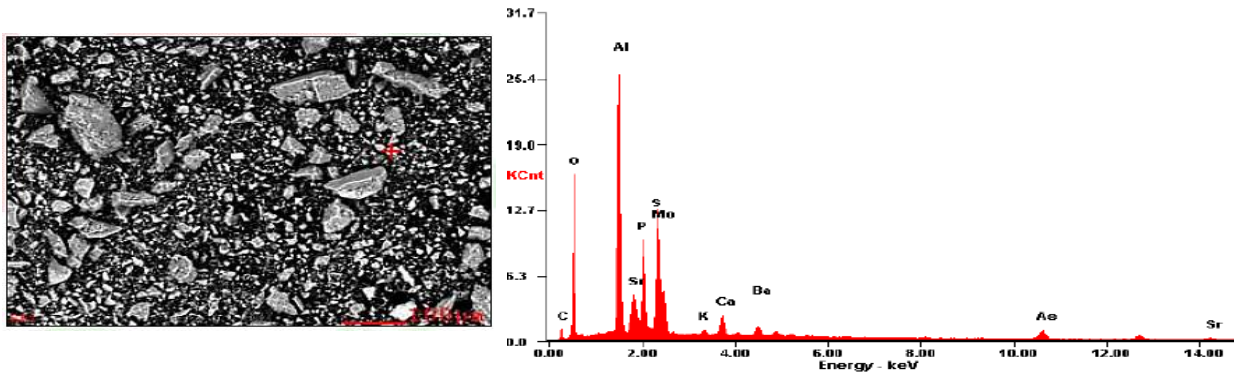
Imagen de SEM de la muestra de relaves a un zoom de 100 µm y Espectro de Difracción del Punto 2



En el *Punto 3*, según los resultados de la *Figura 8* se puede evidenciar la presencia de varios metales el Aluminio (19.70%) con mayor abundancia en este punto de la muestra, y otros con menor proporción como el Molibdeno (11.69%), Estroncio (3.44%), Bario (2.65%), Calcio (1.58%), Potasio (0.36%) registrados en el *Apéndice C*, que al estar asociado con un alto porcentaje de abundancia de Oxigeno (38%) y Azufre (4.48%), están asociados a la formación de Alunita, Caolinita, Sulfato de calcio, los cuales son confirmados por los porcentajes de abundancia obtenidos del análisis de FRX.

Figura 8.

Imagen de SEM de la muestra de relaves a un zoom de 100 µm y Espectro de Difracción del Punto 3



4.1.2 Caracterización Física

Con los resultados obtenidos de las pruebas del picnómetro como se observa en la *Tabla 5*, se determinó la densidad aparente de la muestra de relaves con un valor de 2.5 g/mL, siendo este un valor típico de densidad aparente de arenas según Viera, Morillo & Parion, 2022.

Tabla 2.

Densidad aparente de la muestra de relaves mineros

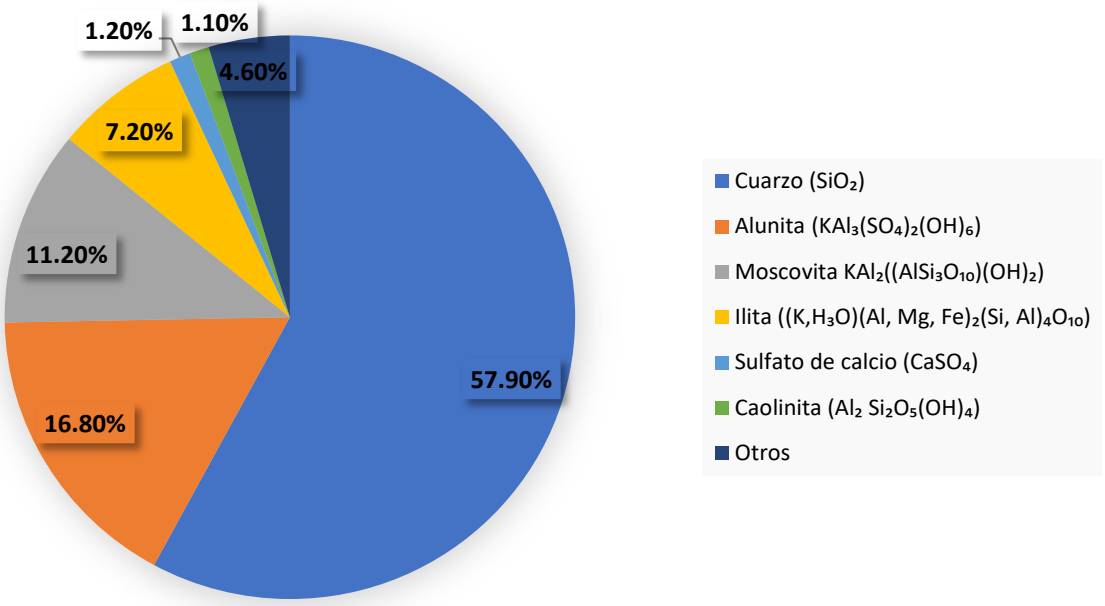
No. Prueba	Masa relave (g)	W Picnómetro + Masa relave(g)	Picnómetro + mezcla (g)	Volumen-real (mL)	Densidad aparente
1	3	87.3	86.1	1.2	2.5
2	3	86.5	85.3	1.2	2.5
3	3	87.3	86.1	1.2	2.5

4.1.3 Caracterización Mineralógica

Luego de realizar el Análisis Cuantitativo por Difracción de Rayos X (Na-U) de fases cristalinas no arcillosas en muestra de minerales, se identificaron las especies de minerales y su porcentaje en peso que corresponde a la relación entre las fases policristalinas cuantificadas sin considerar el porcentaje de material amorfo. En la *figura 9* se presentan los resultados de la caracterización mineralógica, se puede evidenciar que el *Cuarzo (SiO_2)* es el mineral con mayor presencia en la muestra con un 57.90%, seguidamente, la *Alunita ($KAl_3(SO_4)_2(OH)_6$)* con 16.80% es el segundo mineral más abundante en los relaves, se encontraron presentes en la muestra minerales de naturaleza rara y otros como Enstatita férrica, Broquita, Diópsido férrico y Pirita, que representan el 4.6%.

Figura 9.

Composición mineralógica de la muestra de relaves



Nota. La prueba fue realizada en el equipo *Difractómetro de polvo marca BRUKER modelo D8 ADVANCE con Geometría DaVinci Tigger S8 Bruker* del *Laboratorio de Servicios Químicos Minero Metalúrgicos y Ambientales GIMBA de la Universidad Industrial de Santander.* En el *Apéndice B* se encuentra el respectivo informe.

4.1.4 Granulométrico

Los resultados del análisis granulométrico se evidencian en la *Tabla 3*, donde se observa que la malla #200 retuvo la mayor cantidad de la muestra con un peso de 56.8 g representando un 45.733% del porcentaje de peso retenido, además, en la *Figura 10* se muestran los resultados del tamaño de partículas que representa D50 y D80, 50% y 80% pasante respectivamente, el tamaño de partícula del D80 corresponde 105.11 µm y el D50 a 84.769 µm.

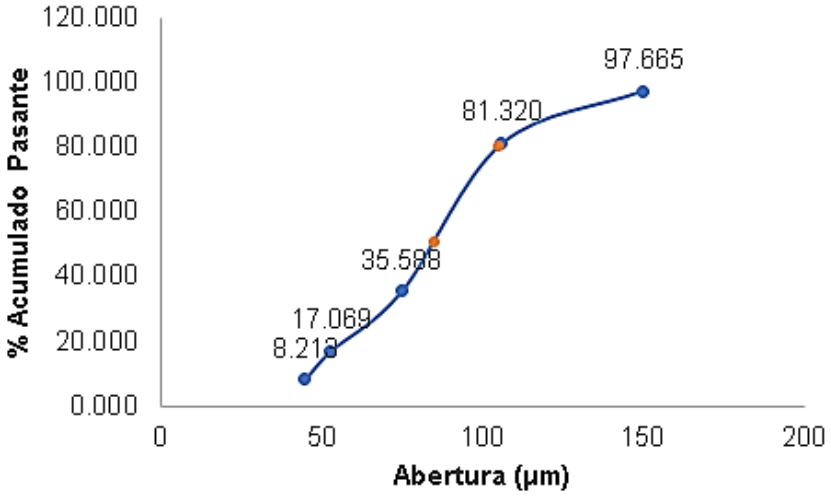
Tabla 3.

Distribución granulométrica de la muestra de relaves

Malla	x (µm)	Peso (g)	% Peso retenido	%Peso retenido acumulado	%Peso pasante acumulado
100	150	2.900	2.335	2.335	97.665
140	106	20.300	16.345	18.680	81.320
200	75	56.800	45.733	64.412	35.588
270	53	23.000	18.519	82.931	17.069
325	45	11.000	8.857	91.787	8.213
Fondo		10.200	8.213	100.000	0.000
Total		124.2			

Figura 10.

Tamaño de partículas pasantes D80 y D50



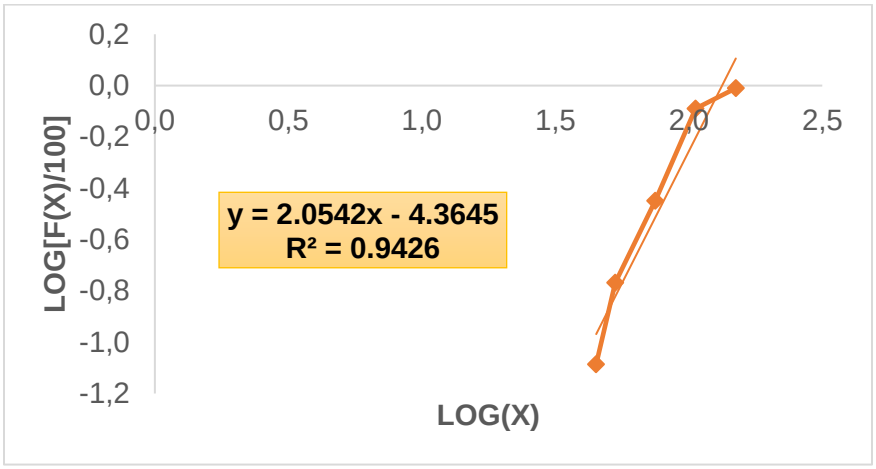
Se analizaron los datos de distribución de tamaños usando los modelos de Gaudin – Schuhmman y Rossin – Rammler, los respectivos cálculos se encuentran en el Apéndice D. Para determinar el modelo que más se ajusta a los datos reales se analiza el coeficiente de correlación (R^2) de las regresiones lineales de la *Figura 11*, el modelo de Gaudin – Schuhmman presenta un

valor de R^2 de 0.9426, mientras que, la distribución granulométrica del modelo Rossin – Rammler indica un R^2 de 0.9912, siendo este el modelo que más se ajusta a los datos reales.

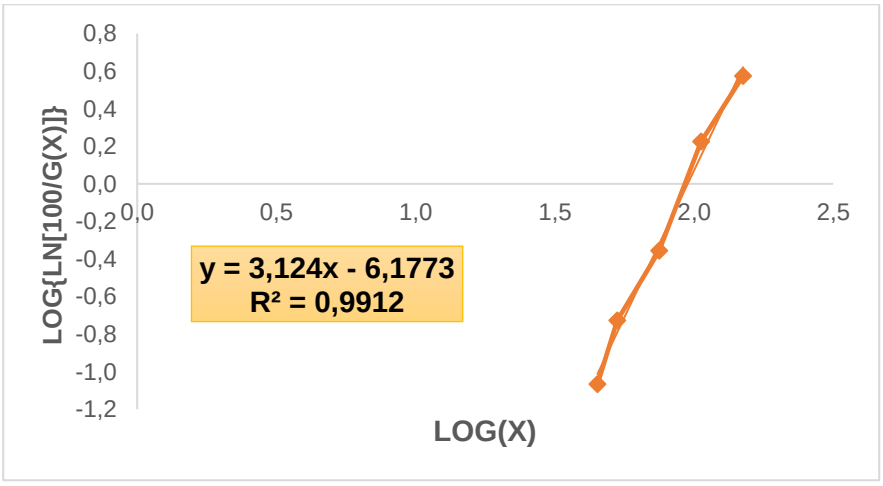
Figura 11.

Modelos de distribución granulométrica: a) Modelo de Gaudin – Schuhmman, b) Modelo Rossin - Rammler

1.



b)

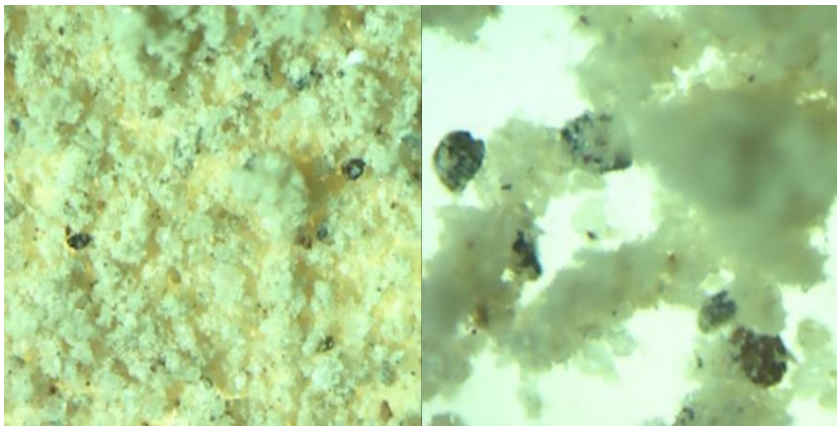


4.1.5 Microscópica

Se muestra en la *Figura 12* las micrografías de la muestra del retenido 140 mesh que fueron tomadas con el estereoscopio SZ71, se observan los distintos granos de los minerales presentes en la muestra y se diferencian algunos por su color.

Figura 12.

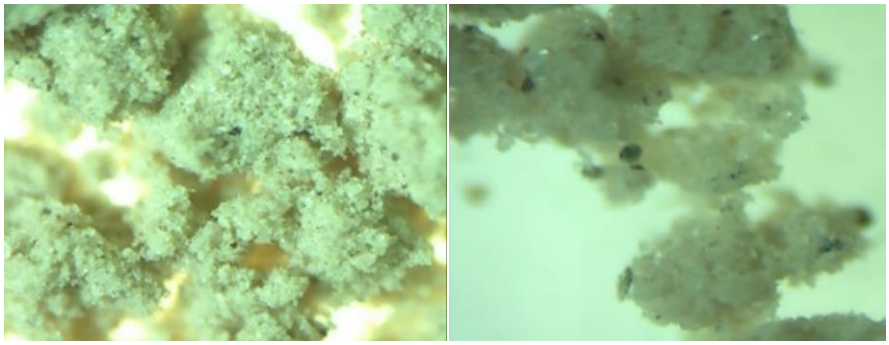
Micrografía retenido de 325 mesh



En la *Figura 13* se presentan las micrografías del retenido 325 mesh de la muestra, donde se observan granos de los minerales presentes y la diferencia de su apariencia mediante sus colores.

Figura 13.

Micrografía pasante de 140 mesh



4.2 Selección de mezcla

En la fabricación de concreto en la industria se suele utilizar una dosificación de sólidos en la mezcla donde la composición de la arena fina es 75% y de cemento es 25%, con estos porcentajes se trabajaron las dos etapas de los ensayos realizados para seleccionar la composición adecuada de la mezcla. En ambas etapas se variaron los porcentajes de 90%, 50% y 10% de relaves en la arena fina y de relaves en el cemento, se obtuvieron seis diferentes composiciones de mezclas que se pueden evidenciar en el Apéndice E respectivamente.

Posteriormente, con los pesos de cada material en las mezclas, se realizaron los bloques de concreto, mediante ensayos de compresión se evaluó la composición de mezcla adecuada, con el fin de seleccionar las que cumplen con los requerimientos de resistencia a la compresión de la norma NTC 4026.

Durante la primera etapa se realizaron los ensayos de compresión a las mezclas 1, 2 y 3 como se muestra en la *Tabla 4*, donde se varió la cantidad de cemento por relaves, la mezcla 3 no se sometió al ensayo debido a que el bloque no tuvo la suficiente consistencia luego del proceso

de fabricación y se fracturó, los resultados muestran que la mezcla 1 presenta una resistencia a la compresión de 6.93 MPa y la mezcla 2 un valor de 1.55 MPa, evaluando los datos obtenidos con la norma NTC 4076, ninguno de los bloques cumplen los criterios de resistencia a la compresión. El material cementante al reaccionar con el agua es fundamental para dar resistencia al concreto, los datos obtenidos de los ensayos evidencian que la cantidad de cemento en la mezcla no deben variarse con los relaves obtenidos del proceso de flotación.

Tabla 4.

Reemplazo de relaves en el cemento

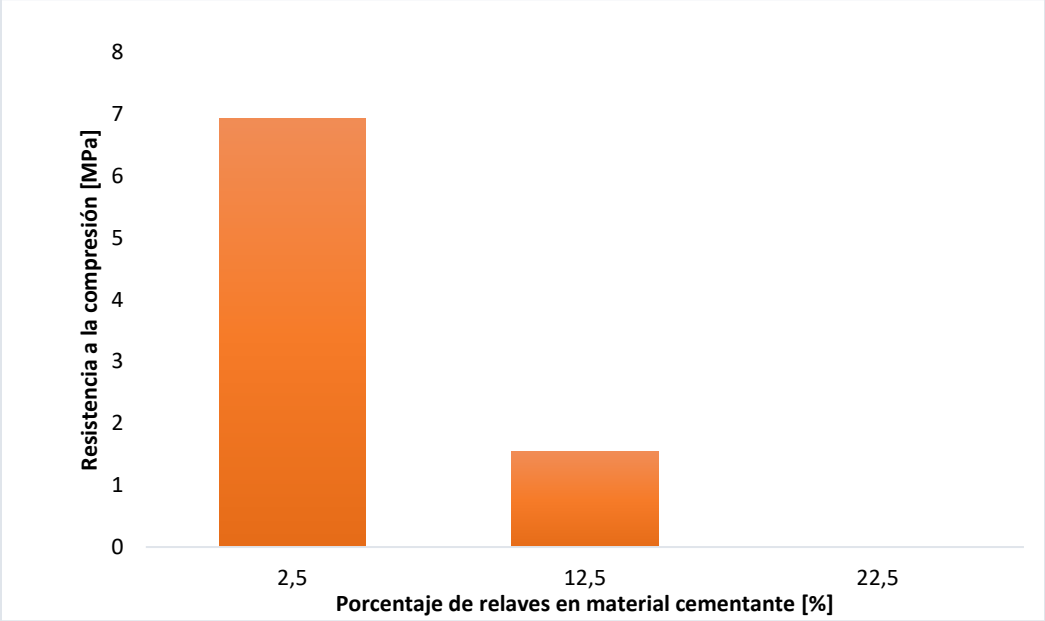
Mezcla	Peso del bloque de concreto [Kg]	Materia prima		Porcentaje de material	Resistencia a la compresión [MPa]
1	3214	Material cementante Finos	Relave Cemento Arena	2.5% 22.5% 75%	6.93
2	3103	Material cementante Finos	Relave Cemento Arena	12.5% 12.5% 75%	1.55
3	-	Material cementante Finos	Relave Cemento Arena	22.5% 2.5% 75%	-

Nota. En la tabla se muestra la variación de la cantidad de relaves en el material cementante, la mezcla 1 (10%), mezcla 2 (50%) y mezcla 3 (90%).

En la figura 14 se muestra la variación de la Resistencia a la Compresión según el porcentaje de relaves en material cementante de las mezclas 1, 2 y 3, se puede evidenciar que la resistencia a la compresión disminuye al aumentar el porcentaje de relaves en el material cementante, por ende, no es una opción viable reemplazar la cantidad de cementante en las diferentes mezclas de concreto.

Figura 14.

Resistencia a la compresión de las diferentes mezclas



Nota. En la figura se muestra la Resistencia a la Compresión de las mezclas vs Porcentajes de relaves en material cementante.

En la *Tabla 5* se presentan los resultados de la segunda etapa de los ensayos de compresión a los bloques donde se realizó la variación de cantidad de relaves en la arena fina, puede evidenciarse que la mezcla 4 presenta una resistencia a la compresión de 10.03 MPa cumple con una resistencia baja según la norma NTC 4076 que es de 7 MPa, la mezcla 5 con 14.97 MPa y la mezcla 6 de 12.92 MPa, cumplen con el requisito de la norma para una resistencia alta individual que debe ser en los bloques de 11 MPa.

Tabla 5.

Reemplazo de relaves en la arena fina

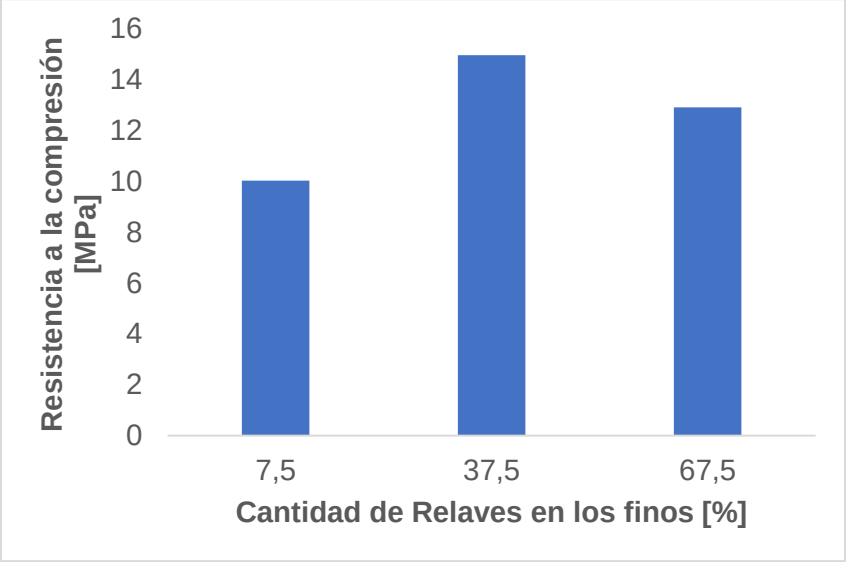
Mezcla	Peso del bloque de concreto [Kg]	Materia prima		Porcentaje de material	Resistencia a la compresión [MPa]
1	3.216	Finos	Relave	7.5%	10.03
			Arena	67.5%	
		Material cementante	Cemento	25%	
2	3.206	Finos	Relave	37.5%	14.97
			Arena	37.5%	
		Material cementante	Cemento	25%	
3	3.135	Finos	Relave	67.5%	12.92
			Arena	7.5%	
		Material cementante	Cemento	25%	

Nota. En la tabla se muestra la variación de la cantidad de relaves en los finos, la mezcla 1 (10%), mezcla 2 (50%) y mezcla 3 (90%).

En la figura 15 se muestra la variación de la Resistencia a la Compresión según el porcentaje de relaves en los finos de las mezclas 4, 5 y 6, con lo anterior se puede evidenciar que la mezcla 5 presenta mayor resistencia a la compresión en comparación de la mezcla 6, por esta razón, se selecciona como la más adecuada para la obtención de concreto.

Figura 15.

Resistencia a la compresión de las diferentes mezclas



Nota. En la figura se muestra la Resistencia a la Compresión de las mezclas vs Porcentajes de relaves en los finos.

4.3 Ensayos mecánicos y pruebas

A continuación, se presentan los resultados de la Prueba de Hidratación y los Ensayos de Resistencia a la Compresión de los bloques de concreto.

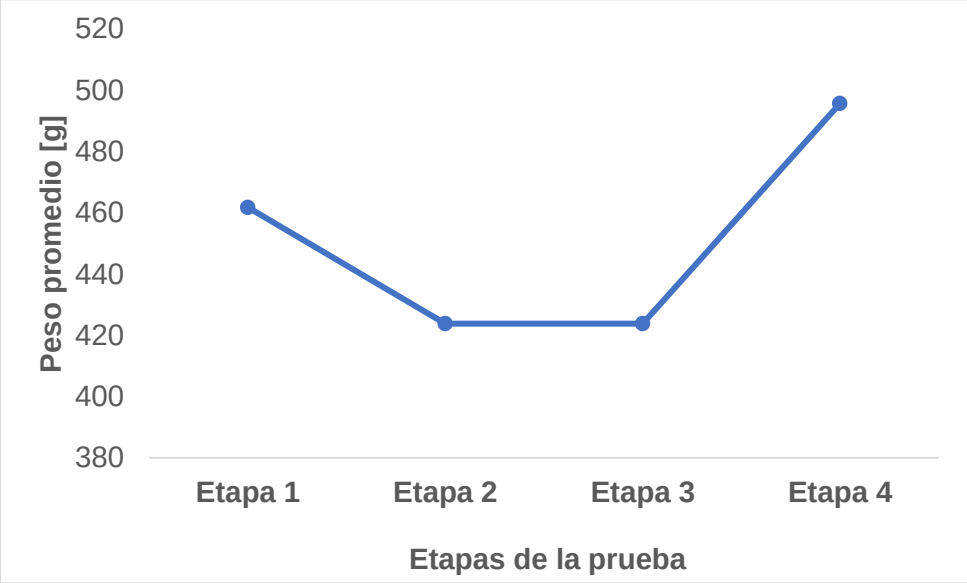
4.3.1 Prueba de hidratación

En el *Apéndice G* se observan los resultados promedio de la Prueba de Hidratación realizada a tres bloques de concreto, fabricados con la mezcla seleccionada. En la *Figura 16* se presenta el comportamiento de los pesos promedio de los bloques de concreto durante las cuatros etapas de la Prueba de Hidratación, se evidencia que en la Etapa 2 correspondiente al secado de

los bloques disminuye el peso de estos, debido a que, se elimina el agua enlazada físicamente a los bloques de concreto, también, en la etapa 4 se observa un aumento del peso de los bloques como resultado de la absorción de agua durante la Prueba de Hidratación. Los cálculos indican que el Porcentaje de Absorción de los ladrillos es de 16.97%, según la norma NTC 4026 estos bloques de peso liviano se clasifican como Clase Baja, ya que su porcentaje máximo de absorción es menor a 18% (*Apéndice G*).

Figura 16.

Pesos promedio de los bloques durante las diferentes etapas de la prueba de hidratación



Nota. Las etapas de la prueba de hidratación corresponden a: Etapa 1 – Antes de la inmersión; etapa 2 – después del secado; etapa 3 – 2 horas después del secado; etapa 4 – después de la inmersión.

Tabla 6.

Requisitos de absorción de agua según NTC 4076

Absorción de agua (Aa) % según el peso (densidad) del concreto secado en horno, kg/m^3 Promedio de 3 unidades, máximo, %	
Clase	**Peso liviano, menos de 1 680 kg/m^3**
Alta	15%
Baja	18%

Nota. La tabla 6 es una adaptación de la tabla de *Requisitos de resistencia a la compresión, absorción de agua y clasificación del peso* de la norma NTC 4076.

4.3.2 Ensayos Resistencia a la Compresión

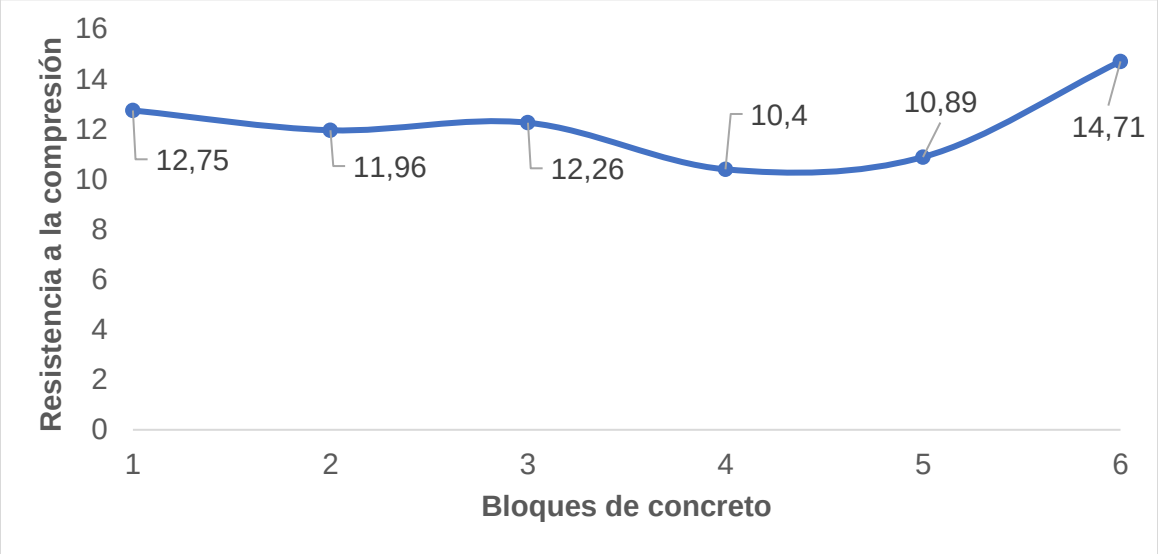
Para verificar la calidad de la mezcla seleccionada, se fabricaron seis bloques de concreto con esta composición y se evaluaron mediante ensayos de compresión. En la Tablas del *Apéndice F* se puede evidenciar que los bloques C1, C2, C3 tienen una resistencia a la compresión promedio de 12.32 MPa y a su vez, los bloques C4, C5, C6 de 12 MPa, los bloques de concreto cumplen con el criterio de Resistencia a la Compresión baja de la NTC 4076. Como se observa en la *Figura 17* los bloques C1, C2, C3, y C6, cumplen con el criterio de evaluación individual de Resistencia a la compresión alta según la NTC 4076, a su vez, los bloques C4 y C5, cumplen con el requisito de Resistencia baja a la Compresión de dicha norma.

Según la norma NTC 673:2010 en el numeral 7.6 se especifican los esquemas de fractura típicos (*Apéndice F*), el bloque de concreto C1 presenta una falla Tipo 2, los demás bloques presentan una falla Tipo 5, por esta razón, se puede observar que la mayoría de los bloques de concreto con este tipo de falla presentan fracturas en los lados de la parte superior o inferior. Se

puede evidenciar que los bloques fabricados con la composición de la Mezcla 2, cumplen con las Norma Técnica Colombiana NTC 4076 para unidades de mampostería de concreto. Los resultados de las pruebas indican que los bloques de concreto se pueden implementar de manera sostenible en construcción para el beneficio de las comunidades aledañas a las minas donde se encuentran los depósitos de relaves.

Figura 17.

Ensayos de Resistencia a la Compresión de los bloques fabricados con la composición de la mezcla 2



Nota. Los bloques de concreto del ensayo de resistencia a la compresión corresponden a: Bloque 1, Bloque 2, Bloque 3, Bloque 4, Bloque 5, Bloque 6.

4.4 Calidad ambiental

Se llevaron a cabo pruebas de control ambiental, a los relaves de flotación minera se les realizó la prueba ABA (Acid-Base Account) y los bloques de concreto se evaluaron a través de pruebas en diferentes medios, a continuación, se presentan los resultados de las pruebas realizadas.

4.4.1 Prueba ABA

Inicialmente se determinó el valor de Potencial de Acidez (PA), que corresponde al azufre total y como sulfato de la muestra de relaves, los porcentajes se tomaron de los resultados presentes en el *Apéndice B y C*, la sumatoria de estas cantidades es 8,19% como se observa en el *Apéndice H.* Posteriormente, se determinó el valor de Potencial de Neutralización (PN) mediante el procedimiento descrito en el *Apéndice H,* cuyo resultado es 0.7086 [mol/g]. Con los datos determinados de PA y PN, se encontró el Potencial Neto de Neutralización (PNN), a través, de la diferencia entre ellos cuyo valor es -7.481, también, se halló la relación entre PN/PA que tiene como valor 0.086. Con lo anterior, los resultados obtenidos se evalúan con los criterios de interpretación de la Prueba ABA, que establecen para PNN<0 y PN/PA<1 un Alto Potencial de Generación de Ácido.

4.4.2 Prueba de concreto en un medio

Para evaluar la calidad ambiental de los bloques de concreto se tomaron trozos como muestra, estos se expusieron a un medio de agua lluvia para determinar la presencia de metales

pesados y el pH de la muestra. Los resultados obtenidos evidencian que hay presencia de 0.598 [mg/L] de Al, 0.19 [mg/L] de Zn, 0.043 [mg/L] de Cr y no se detectó concentración de Cu en el lixiviado de la muestra. En la *Tabla 7* se observa que estas concentraciones se encuentran dentro de los límites permisibles según la Resolución 631 2015. La muestra de trozos de bloques de concreto expuesta a agua lluvia presenta un pH de 8.52 y se encuentra en el rango permitido, por tal motivo, los bloques de concreto son aptos para su uso sin riesgo de lixiviación de especies ácidas.

Tabla 7.

Análisis de metales pesados

Trozos de bloques de concreto					
Medio	**Metal**	**Concentración [mg/L]**	**Cantidad permisible Resolución 631 2015 [mg/L]**	**pH de la muestra luego de 72 horas**	**pH permisible Resolución 631 2015**
Agua lluvia	Aluminio	0.598	Análisis y reporte	8.52	Entre 6 y 9
	Zinc	0.19	3		
	Cobre	0	1		
	Cromo	0.043	0.5		

Nota. En la tabla se observan los resultados de pH y de concentración de algunos metales pesados presentes en la muestra de trozos de bloques de concreto expuestos a agua lluvia y sus valores permisibles según el Artículo 8o. Parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales domésticas, (ard) de las actividades industriales, comerciales o de servicios; y de las aguas residuales (ard y arnd) de los prestadores del servicio público de alcantarillado a cuerpos de aguas superficiales, de la *Resolución 631 2015*.

5. Conclusiones

La caracterización detallada de los relaves de flotación de minerales de California Santander permitió identificar por medio de FRX, DRX, SEM-EDS la presencia de metales pesados como el Al, Cr, Zn, Cr. Además, se determinó la densidad aparente del relave con 2.5 g/mL. El modelo de distribución granulométrica que más se ajusta a los datos reales es el Rossin – Rammler indicando un R^2 de 0.9912.

Se seleccionó la mezcla 5 como la composición más adecuada para la elaboración de concreto, las pruebas de Resistencia a la Compresión de los bloques fabricados con esta composición evidencian que presentan un mayor valor de resistencia.

Las pruebas de control ambiental realizadas a los bloques de concreto, demostraron que estos cumplen con los parámetros fisicoquímicos y se encuentran en los valores permisibles de pH y presencia de metales pesados de vertimientos de aguas residuales. Esto debido al encapsulamiento de los relaves mineros en su etapa de preparación y mezcla con las demás materias primas para la elaboración de concreto, por tal motivo, es viable la elaboración de concreto a partir de relaves mineros de flotación.

6. Recomendaciones

El diseño de la mezcla adecuada para elaborar concreto se puede calcular con modelos establecidos como el método ACI u otros que permitan determinar los valores adecuados de las materias primas.

Para evaluar más propiedades del concreto obtenido se sugiere implementar pruebas de flexión y fatiga, además, fabricar otros productos de construcción.

Realizar un estudio ingenieril con el fin de combinar otros tipos de residuos mineros para producir nuevos materiales y plantear alternativas sostenibles que beneficien las comunidades cercanas.

Referencias Bibliográficas

ASTM American Society for Testing and Materials (2017). *Standard Test Method for Compressive Strength of Dimension Stone ASTM C170/C170M-17.* https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CC0170_C0170M-17%7Cen-US

ASTM American Society for Testing and Materials (2022). *Standard Test Methods for Sampling and Testing Concrete Masonry Units and Related Units ASTM C140/C140M.* https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CC0140_C0140M-22B%7Cen-US

Borie, G. C. (2015) Test ABA (Acid-Base Accounting) – potencial de neutralización. *AGQ Mining & Bioenergy* http://www.agq.com.es/doc-es/test-aba-cual-por-que-potencial-neutralizacion

Cabrera Leal, M., & Ordóñez Potes, M. (2022). *Avances institucionales y normativos para la gestión integral de pasivos ambientales mineros en Colombia*.

Cárdenas Ticlavilca, F. J. (2019) Propuesta de uso de relaves de mina polimetálica en la fabricación de unidades de albañilería – caso ex unidad minera Mercedes 3, *Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), Lima, Perú*, Doi: https://doi.org/10.19083/tesis/625225

Decreto Supremo 248. (2007) Reglamento para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relaves. Publicado en el Diario Oficial

Geológicas, A. T. (2020). Propuesta de lineamientos técnicos de política de buenas prácticas para estandarizar los procesos de presas de relaves en minería.

Ministerio de Minas y Energía – ATG LTDA. (2020). Contrato de Consultoría GGC-468-2020. P*ropuesta de lineamientos técnicos de política de buenas prácticas para estandarizar los procesos de presas de relaves en minería*.

Reyes, C. A. R., Livia, W. P., & Galvis, C. S. (2020). Estudio geometalúrgico del beneficio del oro en un depósito mineral en la Cordillera Oriental de los Andes Colombianos. *Revista Científica GeoLatitud,* 3(2), 2-12.

Romero, A. A., & Flores, S. L. (2010). Reuso de relaves mineros como insumo para la elaboración de agregados de construcción para fabricar ladrillos y baldosas. *Industrial data*, 13(2), 75-82.

Sánchez Chinchay, M. D. (2014). *Encapsulamiento de metales pesados en matriz concreto con cemento tipo 5.*

Viera, P., Morillo, D., & Parion, J. (s.f.) Influencia de fibras naturales y sintéticas en la permeabilidad de morteros de cemento-arena, y cemento, cal y arena Influence of natural and synthetic fibers on the permeability of cement mortars-sand, and, cement, lime and sand.

Apéndices

Apéndice A. Selección y preparación de la mezcla

Relave lavado con agua a 60°C

Preparación de la mezcla para el proceso de pelletización

Pellets Obtenidos con relaves mineros y cemento

Preparación de las mezclas con la sustitución de arena fina por relave para la fabricación de ladrillos. a) Sustitución de 10% de cemento, b) Sustitución de 50% de cemento, c) Sustitución de 90% de cemento.

Bloques de concreto obtenidos

Apéndice B. Informe FRX

	INFORMES TÉCNICOS DE ENSAYO	CÓDIGO	FT-GL-01		
	LABORATORIO DE SERVICIOS QUÍMICOS MINERO METALÚRGICOS Y AMBIENTALES	VERSION	3		
		FECHA	2018	06	18
		PÁGINA	2	DE	7

INF-G-22- 142	INFORME TÉCNICO DE ENSAYO	FECHA	2022	05	17
			AA	MM	DD

"Acreditación por el IDEAM según la Resolución No. 0991 del 09 de septiembre de 2015, en los parámetros metales totales: Cadmio, Cobre, Hierro, Níquel, Plata, Zinc, Cromo, Bario y Manganeso en aguas. Cianuro Total en aguas, suelos y Residuos sólidos. Determinación de Toxicidad por metales en Residuos sólidos Peligros TCLP: Cadmio, Níquel, Plata, Cromo y Bario."

Tigger S8 Bruker
ESPECTROFOTÓMETRO DE ABSORCIÓN ATÓMICA AGILENT SPECTRAA 240 S
MUFLAS DE CALENTAMIENTO
BALANZA ANALITICA

RESULTADOS

Tabla N° 1

Muestra		RELAVE SIN TRATAMIENTO *	
Porcentaje cuantitativo en óxidos y elemental (FRX)			
Elemento	Concentración	Compuesto	Concentración
Si	30,54%	SiO2	65,34%
Al	8,83%	Al2O3	16,68%
K	3,32%	K2O	3,99%
Fe	1,61%	Fe2O3	2,31%
Ca	0,93%	CaO	1,31%
S	0,43%	SO3	1,08%
Mg	0,41%	MgO	0,68%
Ti	0,30%	TiO2	0,50%
P	0,24%	P2O5	0,54%
Na	0,17%	Na2O	0,23%
Pb	0,15%	PbO	0,17%
Ba	0,09%	BaO	0,10%
Sr	0,05%	SrO	0,06%
Mn	0,03%	MnO	0,03%
Cu	0,02%	CuO	0,03%
Zr	0,02%	ZrO2	0,03%
W	0,02%	WO3	0,02%
Rb	0,01%	Rb2O	0,01%
Elementos minoritarios			
Elemento	Concentración	Compuesto	Concentración
Zn	95 PPM	ZnO	0,01%
Cr	60 PPM	Cr2O3	87 PPM
Ni	26 PPM	NiO	33 PPM
		%LOI	6,85%

- Todos los compuestos están ordenados según su composición elemental
- Se identifica ge y Mo, pero no son cuantificables.
- LOI: Loss On Ignition (La muestra se lleva a calcinar en una mufla subiendo la temperatura paulatinamente desde temperatura ambiente hasta 1000 °C durante 5 horas y manteniendo esa temperatura durante 2 horas).

Tabla N° 2

Muestra	RELAVE SIN TRATAMIENTO *
Nombre	Cuantitativo
Cuarzo	57,9%
Alunita	16,8%
Moscovita	11,2%
Ilita	7,2%
Enstatita, férrica	2,0%
Goosecreekita	1,5%
Sulfato de calcio ($CaSO_4$)	1,2%
Caolinita	1,1%
Broquita	<1%
Diópsido, férrico	<1%
Pirita	<1%

- En el perfil de difracción experimental se observaron reflexiones que no pudieron ser asignadas a una fase conocida.

Apéndice C. Análisis elemental en tres puntos de la muestra

Análisis elemental en el punto 1 de la muestra de relaves

Elemento	Wt%	At%
CK	4.74	19.63
OK	15.36	47.71
MnK	17.44	15.78
WL	62.46	16.89
Matrix	Correction	ZAF

Análisis elemental en el punto 2 de la muestra de relaves

Elemento	Wt%	At%
CK	10.39	19.26
OK	43.77	60.91
MgK	0.85	0.78
AlK	0.59	0.49
SiK	0.84	0.67
CaK	3.16	1.76
MnK	4.42	1.79
FeK	35.97	14.34
Matrix	Correction	ZAF

Análisis elemental en el punto 3 de la muestra de relaves

Elemento	Wt%	At%
CK	6.43	12.43
OK	38	55.13
AlK	19.7	16.95
PK	7.53	5.64
MoK	11.69	2.83
SK	4.48	3.24
KK	0.36	0.21
CaK	1.58	0.91
BaL	2.65	0.45

Elemento	Wt%	At%
AsK	4.15	1.28
SrK	3.44	0.91
Matrix	Correction	ZAF

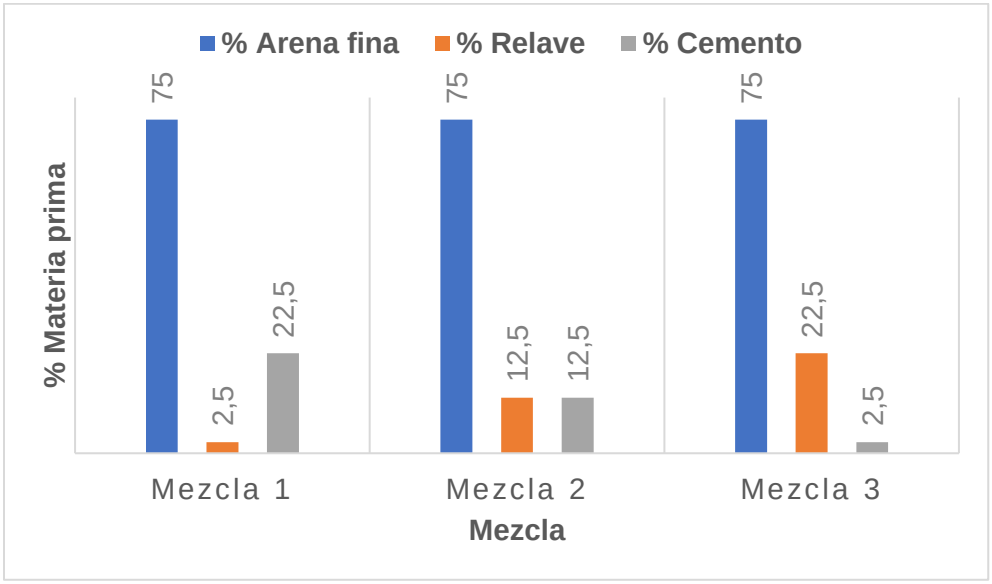
Apéndice D. Distribución granulométrica

Distribución granulométrica de los modelos Gudin Schuhmman y Rossin Rammler

Malla	***x (µm)***	***Peso (g)***	***% Peso retenido***	***G(x)***	***F(x)***	***Log (x)***	***Log [F(x)/100]***	***Log{Ln[100/G(x)]}***
100	150	2.900	2.335	2.335	97.665	2.176	-0.010	0.575
140	106	20.300	16.345	18.680	81.320	2.025	-0.090	0.225
200	75	56.800	45.733	64.412	35.588	1.875	-0.449	-0.357
270	53	23.000	18.519	82.931	17.069	1.724	-0.768	-0.728
325	45	11.000	8.857	91.787	8.213	1.653	-1.086	-1.067
Fondo		10.200	8.213	100.000	0.000			
Total		124.2						

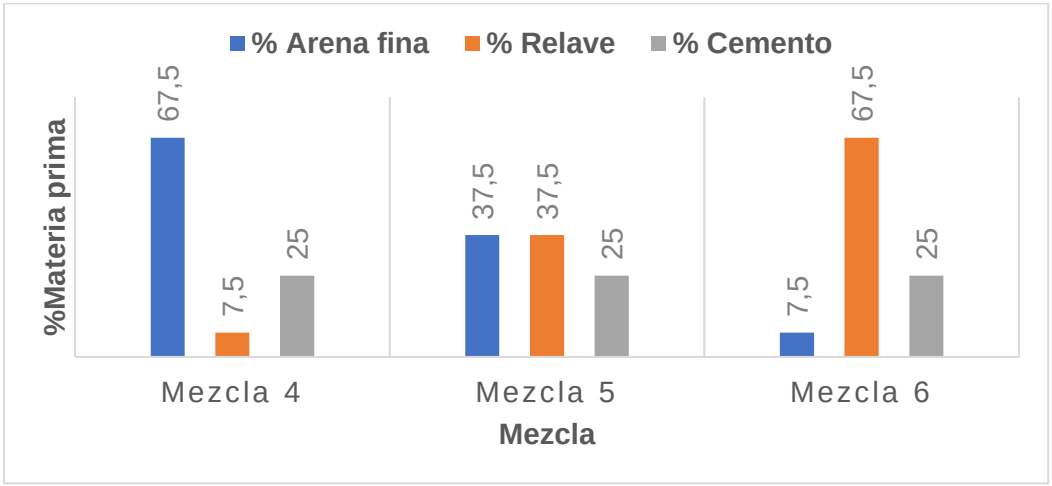
Apéndice E. Porcentaje de materia prima para cada mezcla

Reemplazo de relaves en el cemento



Nota. En la figura se muestra la variación de la cantidad de relaves en el material cementante, la mezcla 1 (10%), mezcla 2 (50%) y mezcla 3 (90%).

Reemplazo de relaves en arena fina



Nota. En la figura se muestra la variación de la cantidad de relaves en los finos, la mezcla 4 (10%), mezcla 5 (50%) y mezcla 6 (90%).

Bloques de concreto elaborados con las diferentes mezclas

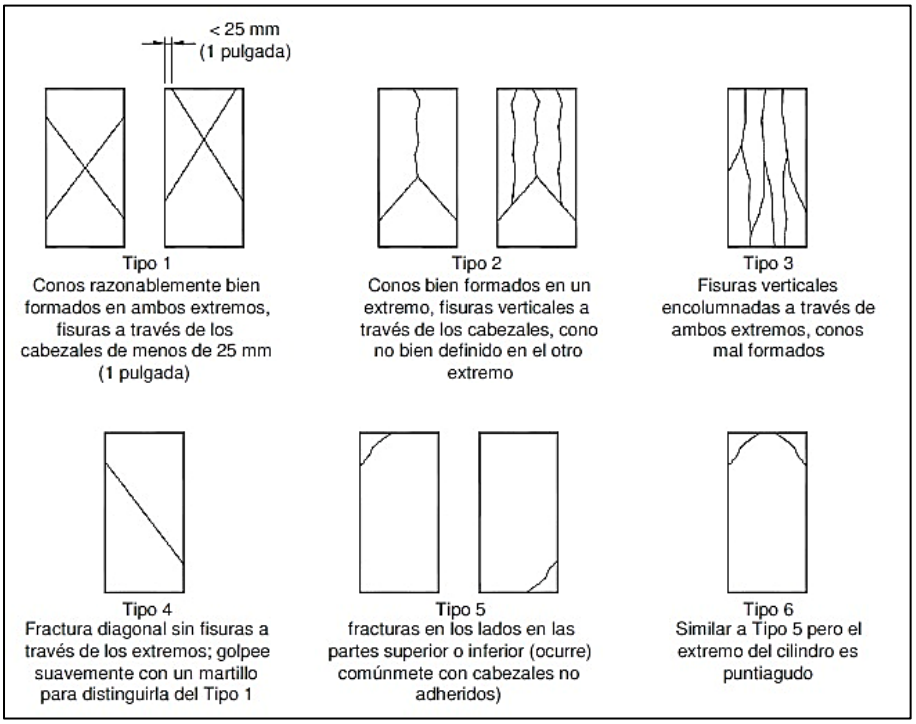
Apéndice F. Ensayo de compresión mezcla 2

Ensayos de compresión en la prensa hidráulica CS112298

Resultados de Resistencia a la compresión a los bloques de concreto

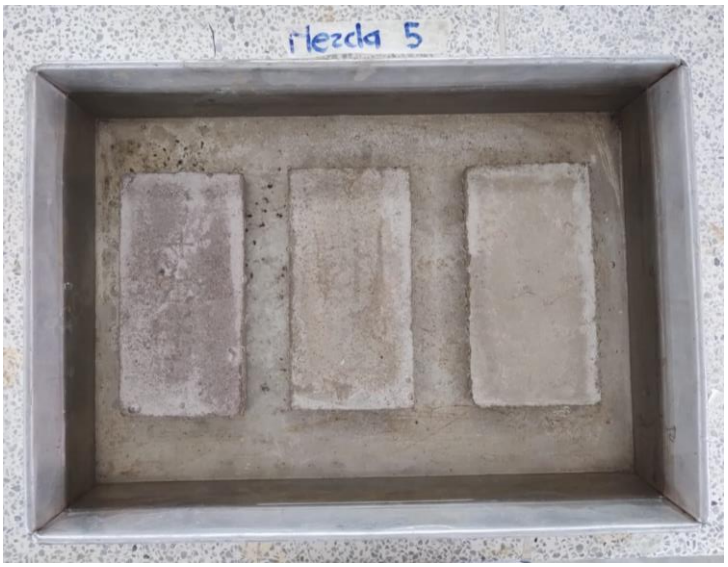
Bloque	Resistencia a la compresión [Mpa]	Promedio resistencia a la compresión
C1	12,75	12,32
C2	11,96	
C3	12,26	
C4	10,4	12
C5	10,89	
C6	14,71	

Esquema de fracturas típicas



Apéndice G. Prueba de Hidratación

Prueba de hidratación de los bloques de concreto con mezcla 5



Resultados promedio de la Prueba de Hidratación

Promedio Bloques (mezcla 2)	Peso promedio antes de inmersión [g]	Peso promedio después de secado [g]	Peso promedio después de 2 horas de haber secado [g]	Peso promedio después de inmersión [g]	% Absorción
	461.8	423.8	423.8	495.7	16.97

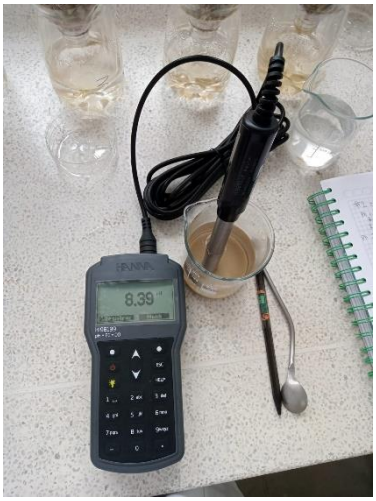
Apéndice H. Prueba de calidad ambiental

PRUEBA ABA

Reacción del relave con tratamiento luego de agregar HCl 25%

Muestra de relave en el agitador magnético

Medición de pH de la muestra



- Potencial de acidez - PA (corresponde a azufre total y azufre como sulfato):

(1,2% $CaSO_4$) + (1% Pirita) + (0,43% S - FRX) + (1,08% SO_3) + (4,48% S punto 3 SEM -EDS)

= **8,19%**

- Potencial de neutralización PN:

Procedimiento para obtener potencial de neutralización

Potencial de neutralización

Tiempo [h]	Cantidad HCl 1N [ml]	Concentración HCl	pH
0	2	1 N	-
2	3	1 N	-
22	40	1 N	11.46
24	0.6	37%	2.47

Nota. En el tiempo 22 h, se midió el pH de la pulpa y estaba en 11.46, para acidificar el pH se agregaron 40 ml de HCl 1N y luego 0.6 ml de HCl al 37%, llegando a un pH de 2.32. Para realizar la titulación se agregaron 14 ml de NaOH 0,1N llegando a un pH de **8,33**.

$$PN = \frac{(\text{N} * \text{Vol (ml) de HCl}) - (\text{N} * \text{Vol (ml) de NaOH}) \text{ x } 50}{\text{Peso de la muestra (g)}}$$

$$PN = \frac{(36{,}63\text{N/L} * 40.6\text{ ml} * 1\text{L}/1000\text{ml}) - (0{,}1\text{N/L} * 14\text{ml} * 1\text{L}/1000\text{ml}) * 50}{2\text{ (g)}}$$

PN = 0,7086 [mol/g]

a) Potencial Neto de Neutralización PNN:

PNN = PA – PN

PNN = 0,7086 - 8,19 = - 7,481

b) Relación PN/PA

PN / PA = 0,708589 / 8,19 = 0,086

Criterios de Prueba ABA

Potencial representado	Criterio de interpretación	
Bajo o Nulo Potencial de Generación de Ácido	PNN>20	PN/PA>3
Potencial Marginal de Generación de Ácido	PNN<20	1<PN/PA<3
Alto Potencial de Generación de Ácido	PNN<0	PN/PA<1

Kit de Medición del DR900 metales pesados

Sobres de celdas y reactivos de metales pesados