

Diseño de planta piloto para fabricación de ladrillos y material agregado de vías a partir de residuos de flotación de minerales polimetálicos del municipio de California, Santander

Lisbeth Tatiana Prada Carvajal, Ferney Gerardo Castro Rodríguez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Metalúrgico

Director

Walter Pardavé Livia

Ingeniero Metalúrgico Msc

Codirector

Pedro Luis Delvasto Angarita

Doctor en Ciencia y Tecnología de Materiales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales

Bucaramanga

2022

Dedicatoria

Dedico este proyecto de grado principalmente a mis padres por darme la vida y entregarme siempre su cariño y amor. A mi abuela Clemencia por hacerme ver que soy capaz con lo que me proponga, por creer siempre en mí y por forjar en mí la mujer que soy. A mi tía Milena que, a pesar de la distancia siempre me ha brindado su apoyo incondicional. También va dedicado a mis hermanos y especialmente Andrea por ser mi refugio en las buenas y en las malas. A toda mi familia, a mis compañeros de trabajo, amigos que encontré en la carrera y toda aquella persona que me aportaron algo durante mi paso en la universidad. A mi compañero Ferney por soportarme y hacer posible este proyecto.

A todas estas personas, gracias por haberme apoyado en este proceso de transición hacia una nueva etapa de mi vida.

Tatiana Prada

Dedico este proyecto primeramente a Dios por su infinito amor, y todas las bendiciones que me brinda día a día, por brindarme la fortaleza y sabiduría necesaria para vivir y terminar esta importante etapa de mi vida.

A mis padres, Carlos Castro y Zoila Rodríguez, por su amor incondicional, su comprensión, su apoyo, consejos y por nunca dejarme solo en los momentos difíciles, porque gracias a ellos he llegado hasta acá, sus múltiples enseñanzas y correcciones han ayudado a forjar el hombre que soy hoy. Ellos fueron mi mayor motivación durante todo este proceso y sin ellos nada de esto sería posible.

A mi abuela María Delfina, por su amor, por estar siempre pendiente de mí y tenerme presente en sus oraciones.

A mi familia, mis compañeros y grandes amigos que encontré durante esta etapa y que de una forma u otra aportaron su grano de arena durante todo este proceso.

A mi colega y amiga, Tatiana Prada, por hacer posible este proyecto, por medio de su sabiduría y malgenio.

A cada una de las personas que me brindaron su apoyo y fueron parte de esta importante etapa de mi vida, mil gracias.

Ferney Castro

Agradecimientos

Expresamos nuestro agradecimiento a:

La Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, a todo el personal docente y los técnicos que contribuyeron enormemente en nuestra formación como profesionales y personas. A nuestro director, Msc Walter Pardavé Livia por su gran apoyo y asesoría para la realización de este proyecto. A nuestros compañeros y amigos de carrera que contribuyeron en nuestra formación a lo largo de este camino, a Cesar Pardo, Martha Sánchez y Rafael Uribe por su apoyo constante. A la empresa minera por financiar y aportar los materiales del proyecto presente.

A todos ellos, gracias por brindarnos su apoyo y hacer que este proyecto sea posible.

Ferney y Tatiana

Contenido

	Pág.
Introducción	12
1. Marco Teórico.....	13
1.1 Pasivos Ambientales Mineros (PAM)	13
1.2 Relaves o Residuos Mineros	14
1.3 Residuos o Relaves del Proceso de Flotación de Minerales.....	14
1.4 Aprovechamiento de Relaves o Residuos Mineros.....	15
2. Objetivos	16
2.1 Objetivo General	16
2.2 Objetivos Específicos.....	16
3. Metodología Experimental.....	17
3.1 Revisión Bibliográfica.....	17
3.2 Caracterización del Relave Polimetálico	17
3.2.1 Caracterización Química.....	17
3.2.2 Caracterización Física	18
3.2.2.1 Ensayo Frasco de Le Chatelier. 2.....	18
3.2.3 Caracterización Granulométrica.....	18
3.2.4 Caracterización Mineralógica	19
3.2.5 Caracterización Microscópica.....	19
3.3 Tratamiento del Relave Minero.....	20

DISEÑO DE PLANTA PARA FABRICAR LADRILLOS DESDE RELAVES	5
3.3.1 Lavado del Relave Minero y Filtrado	20
3.3.2 Peletización y Encapsulado.....	20
3.4 Fabricación de probetas y ensayos mecánicos con mezcla de cemento, agua, arena fina y relaves mineros seleccionados.....	21
3.4.1 Diseño de mezclas para Fabricación de Ladrillos.	21
3.4.2 Diseño de Mezclas para Material Agregado de Vías.	22
3.4.3 Fabricación de Probetas Para ensayos de Compresión	23
3.5 Ensayo de Absorción de Agua.....	24
3.6 Dimensionamiento de equipos y Diseño de la planta piloto 3D	24
4. Resultados y discusiones.....	25
4.1 Ensayo de Compresión.....	25
4.1.1 Ensayo de Compresión para Ladrillos.....	25
4.1.2 Ensayo de compresión para material agregado de vías.....	25
4.2 Flujograma, Balance de Materiales y Análisis de Costos de Materiales	26
4.2.1 Flujograma y Balance de Materiales para Fabricación de Ladrillos	27
4.2.2 Costos de Ladrillo Macizo obtenido y Relación con Ladrillos del Mercado	28
4.3 Dimensionamiento y Costos de Equipos.....	30
4.3.1 Monto de Inversión y Costos de la Planta.....	31
4.4 Análisis Económico	32
4.5 Plano General y Diseño 3D de la Planta Piloto.....	33
4.5.1 Plano General Planta Piloto de la Ladrillera a partir de Mezcla que Incluye el Relave Minero	34
4.5.2 Vistas 3D de la Planta Piloto para la Fabricación de Ladrillos Macizos a partir de la	

DISEÑO DE PLANTA PARA FABRICAR LADRILLOS DESDE RELAVES	6
Mezcla que incluye el Relave Minero.	34
5. Conclusiones	36
6. Recomendaciones	37
Referencias Bibliográficas	38
Apéndices.....	41

Lista de Tablas**Pág.**

Tabla 1. <i>Porcentajes de dosificación para ladrillos reemplazando arena fina por relave en un 10-50- 90%.....</i>	21
Tabla 2. <i>Porcentajes de dosificación para ladrillos reemplazando cemento por relave en un 10-50-90%.....</i>	22
Tabla 3. <i>Porcentajes de dosificación para material agregado de vías reemplazando arena fina por relave en un 10-50-90%.</i>	22
Tabla 4. <i>Porcentajes de Dosificación para Material Agregado de Vías Reemplazando Cemento por Relave en un 10-50-90%.</i>	23
Tabla 5. <i>Resultados de resistencia a la compresión para ladrillos.</i>	25
Tabla 6. <i>Resultados de resistencia a la compresión para material agregado de vías.</i>	25
Tabla 7. <i>Dimensiones y costo de unidad de ladrillo fabricado a través de relaves.....</i>	28
Tabla 8. <i>Equipos principales del circuito de obtención de ladrillos. Apéndice N.</i>	30
Tabla 9. <i>Equipos auxiliares del circuito de obtención de ladrillos. Apéndice O.</i>	30
Tabla 10. <i>Infraestructura requerida.</i>	31
Tabla 11. <i>Inversiones Fijas.....</i>	31
Tabla 12. <i>Capital de trabajo.....</i>	32
Tabla 13. <i>Información para el Análisis Económico.</i>	33

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Clasificación de los Residuos Mineros</i>	15
Figura 2. <i>Ensayo Frasco de Le Chatelier</i>	18
Figura 3. <i>Especies Minerales en Relaves Mineros</i>	19
Figura 4. <i>Resistencia a la Compresión y Absorción de Agua para Ladrillos. Norma NTC 4026.</i>	24
Figura 5. <i>Flujograma y balance de materia para 10 toneladas</i>	27
Figura 6. <i>Molde y ladrillos obtenidos con la mezcla seleccionada</i>	28
Figura 7. <i>Precio de ladrillo macizo en HOMECENTER</i>	29
Figura 8. <i>Plano General</i>	34
Figura 9. <i>Vista Panorámica</i>	34
Figura 10. <i>Vista Superior</i>	35
Figura 11. <i>Vista Lateral</i>	35

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. <i>Resultados Caracterización Química.</i>	41
Apéndice B. <i>Modelos de Rosin Rammler y Gates-Gaudin-Schumann.</i>	42
Apéndice C. <i>Imágenes de Estereoscopia para Determinar Liberación de Partículas.</i>	43
Apéndice D. <i>Lavado del Relave.</i>	44
Apéndice E. <i>Filtrado y Secado del Relave.</i>	45
Apéndice F. <i>Peletización y Encapsulado.</i>	46
Apéndice G. <i>Mezclas con Sustitución de Arena Fina para Fabricación de Ladrillos.</i>	47
Apéndice H. <i>Mezclas con Sustitución de Arena Fina para Fabricación de Material Agregado de Vías.</i>	48
Apéndice I. <i>Datos Prueba de Absorción de Agua.</i>	49
Apéndice J. <i>Certificado de Prueba de Compresión para Material Agregado de Vías.</i>	50
Apéndice K. <i>Certificado Ensayo de Compresión para Probetas de Ladrillos con Reemplazo del 50% de Arena Fina.</i>	51
Apéndice L. <i>Análisis de Tres Diferentes Dimensiones de Ladrillos y su Peso.</i>	52
Apéndice M. <i>Costos de Fabricación de Ladrillos a Través de Relaves.</i>	53
Apéndice N. <i>Catálogo para los Equipos Principales.</i>	54
Apéndice O. <i>Catálogo para los Equipos Auxiliares.</i>	56

Resumen

Título: Diseño de planta piloto para fabricación de ladrillos y material agregado de vías, a partir de residuos de flotación de minerales polimetálicos del municipio de California, Santander*

Autor: Lisbeth Tatiana Prada Carvajal y Ferney Gerardo Castro Rodríguez**

Palabras Clave: Relave minero, ladrillos de construcción, Diseño 3D, flotación de minerales, planta piloto.

Descripción: En este proyecto se realizó el diseño de una planta piloto de 10 ton/día para fabricar ladrillos y material agregado de vías, a partir de residuos de flotación provenientes del municipio de California, Santander, estableciendo un flujograma y un balance de materiales de todo el proceso. El relave minero se caracterizó mediante Microscopía Electrónica de Barrido SEM, Florescencia de Rayos X y Difracción de Rayos X, para conocer los elementos que estaban presentes en las muestras. En las superficies de las muestras se encontraron rastros de Metil isobutil carbinol (aceite de pino), Xantato amílico de potasio (PAX), Sulfhidrato de sodio (NASH), los cuales son ampliamente usados en el proceso de flotación y, por consiguiente, fueron eliminados mediante un lavado, filtrado y secado. Luego, se llevó a cabo el proceso de peletización y se realizaron las respectivas mezclas de cemento, agua, arena fina y relaves mineros. Estas mezclas contienen también cal y cemento y son llevadas al moldeado durante 2 días. Las probetas se dejan en curado por 28 días según la norma NTC 4017. Además, se dimensionaron los equipos que hacen parte de cada etapa del proceso según las características del residuo minero que se trabajó.

Establecido el flujograma y el balance de materiales, se diseñó la planta para la fabricación de ladrillos y material agregado de vías en 3D con el software llamado AutoCAD Plant 3D 2020, donde se muestra la organización de la planta y los equipos usados en cada etapa de la fabricación.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los materiales. Ingeniería Metalúrgica. Director: Walter Pardavé Livia. Ingeniero Metalúrgico Msc. Codirector: Pedro Luis Delvasto Angarita. Doctor en Ciencia y Tecnología de Materiales

Abstract

Title: Design of a pilot plant for the manufacture of bricks and aggregate material for roads, from the flotation residues of polymetallic minerals in the municipality of California, Santander*

Author(s): Lisbeth Tatiana Prada Carvajal and Ferney Gerardo Castro Rodríguez**

Key Words: Mining tailings, building bricks, 3D design, mineral flotation, pilot plant.

Description: In this project, a 10 ton/day pilot plant was designed to manufacture bricks and aggregate track material out of flotation residues from California town, Santander, establishing a flow chart and a material balance of the entire process. The mining tailings were characterized by Scanning Electron Microscopy SEM, X-Ray Fluorescence and X-Ray Diffraction, to determine their present elements. On the sample's surface were found traces of methyl isobutyl carbinol (pine oil), potassium amyl xanthate (PAX), sodium sulfhydrylate (NASH), which are widely used in flotation process, so, consequently, were removed by washing, filtering, and drying. Then, the pelletizing process was carried out and the respective mixtures of cement, water, fine sand and mine tailings were performed. These mixtures, also contain lime and cement, are taken to the mold for 2 days. The specimens are left to cure for 28 days according to the NTC 4017 standard. In addition, the equipment that is part of each stage of the process was sized matching to the characteristics of the mining waste worked.

Once the flow chart and material balance are established, the plant for the manufacture of bricks and aggregate track material is designed in 3D using the software called "AutoCAD Plant 3D 2020", which shows how the plant is organized and the equipment used in each stage of the manufacturing process.

* Degree Work

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

Introducción

La actividad minera por sí misma afecta áreas relativamente pequeñas, pero pueden tener gran impacto sobre el ambiente, puesto que la liberación de metales de los lugares mineros ocurre principalmente, a través de drenaje ácido de mina y erosión de desechos en pilas y depósitos de relaves mineros (Morales y Hantke, 2020). Cuando estos depósitos contienen sulfuros (pirita) y hay acceso de oxígeno, se obtienen resultados de Drenaje ácido de mina (DAM). Dependiendo de la naturaleza de los desechos de rocas y depósitos de relaves, este DAM contendrá elevados niveles de metales pesados (Ministerio de Minas y Energía Dirección de Minería Empresarial Asesorías Técnicas Geológicas ATG Ltda., 2021).

En la actualidad estos pasivos ambientales en la mayoría de los casos no son controlados de manera adecuada debido al propio desinterés por parte de organismos reguladores y debido a la falta de conocimiento, experiencia y manejo de tecnologías que hagan reaprovecharles dichos pasivos. Es en ese sentido, que se produce la contaminación del medio físico, tal como: la contaminación del agua y del suelo. Se plantea una propuesta de investigación, el uso de relave minero como insumo para elaborar mortero de albañilería, usando como alternativa el relave minero en reemplazo de porcentaje de fracción de cemento, que nos permita minimizar el uso del cemento en las construcciones rurales y urbanas. Los problemas que se generan con los relaves mineros son:

- Contaminación de la fauna y la flora
- Contamina el medio ambiente
- Contamina cuerpos de agua superficiales y subterráneas

Por ello se pretende diseñar una planta piloto de fabricación de ladrillos a partir de residuos orelaves mineros procedentes del proceso de flotación de minerales polimetálicos.

1. Marco Teórico

1.1 Pasivos Ambientales Mineros (PAM)

La minería es una actividad extractiva donde se ubican los yacimientos ricos en minerales valiosos para posteriormente extraerlos y llevarlos a su lugar de uso o industrialización. Este proceso genera cambios en la superficie terrestre (socavones), provocando daños ambientales irreversibles. Los pasivos ambientales mineros se definen como los yacimientos mineros abandonados o inactivos sin un cierre reglamentario, los restos o depósitos de residuos (relaves) producidos por minería que generan riesgos para el ecosistema, la salud pública y la calidad de vida.

Entre los impactos ambientales más frecuentes debido a los PAM están: paisajes físicamente alterados, pilas de desechos, contaminación del agua, plantas abandonadas, pérdida de vegetación, daño a la fauna, entre otros. Además, se generan filtraciones de ácido, lavado de metales, aumentos en sedimentos y contaminación por hidrocarburos que afectan las aguas superficiales y subterráneas. Los PAM no solo generan impactos ambientales negativos, también generan impactos socioeconómicos directamente relacionados con los ambientales (Infante, 2011). Por ejemplo, el suelo perdido debido a la contaminación generada durante la actividad extractiva podría haber sido aprovechado para el sector agrícola.

1.2 Relaves o Residuos Mineros

Los procesos de la minería (extracción de los recursos naturales del subsuelo), como beneficio y refinado, es decir, incluyendo procesos metalúrgicos, aportan beneficios económicos y un avance al nivel de vida de la comunidad. Pero a pesar de esto, los residuos que se obtienen de estos procesos son una amenaza para el medio ambiente y el ecosistema (Rodríguez, García; 2006).

El deterioro de las aguas y el suelo, son dos de los impactos más graves que generan dichos procesos en el medio ambiente. Las operaciones de extracción de mineral, beneficio y transporte del mineral afectan diferentes zonas agrícolas, comunidades, bosques, zonas rurales, entre otras; incluso pueden tener carácter terminal, es decir, zonas difíciles de recuperar mediante técnicas de restauración. Algunos límites de dichos daños son los siguientes:

- Residuos de las propias explotaciones mineras
- Residuos de las plantas metalúrgicas de extracción y refinado
- Mala gestión y almacenamiento inapropiado de los residuos durante las etapas de producción

1.3 Residuos o Relaves del Proceso de Flotación de Minerales

Los relaves o residuos que están compuestos por suspensión fina de sólidos, es decir, una mezcla de sólidos y agua, se le denomina relave. Estos relaves son provenientes de los procesos de flotación y están constituidos por el material que se extrae del yacimiento, donde se ha extraído la parte valiosa de mineral.

En forma de pulpa se transportan los residuos hacia los depósitos, que depende de la densidad del relave y la forma de contener la deposición. Un tipo de depósito es el tranque de relave, que permite la decantación de los sólidos en suspensión y dependiendo el objetivo, se puede

recircular la fase líquida al mismo proceso o desechar, mediante evaporación, evapotranspiración, descarte a cursos de agua o infiltración (Acuerdo marco producción limpia sector gran minería, buenas prácticas y gestión ambiental; 2002).

En la figura 1, se mencionan los diferentes tipos de residuos mineros masivos o industriales:

Figura 1. *Clasificación de los Residuos Mineros.*



Nota: Acuerdo marco producción limpia sector gran minería buenas prácticas y gestión ambiental. Chile. Ministerio de Minas, 2002.

1.4 Aprovechamiento de Relaves o Residuos Mineros

Los principales residuos que se generan en la industria minera son los masivos (estériles, escorias y relaves). Estos residuos pueden ser reutilizados, ya sea dentro de la misma cadena de producción o en otro sitio. Los usos más comunes que se le dan a estos residuos son los siguientes:

- La roca estéril puede ser utilizada en jardinería, material de relleno o en la fabricación de cemento y concreto.
- El lodo proveniente del tratamiento de DAM es utilizado para la fabricación de pigmentos.
- La escoria proveniente de los procesos de fundición también suele ser utilizada en el cemento y hormigón para la construcción de calles.

- El agua residual de la minería es utilizada para la eliminación del polvo y el tratamiento de los minerales para usos industriales y agrícolas, también como refrigerante.

Otros residuos o relaves mineros se pueden utilizar para la fabricación de cemento, ladrillos, resina y vidrios para la agroforestería ("ICMM & bullet; Recuperar, reutilizar, reciclar", 2022).

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Diseñar una planta piloto de 10 Ton/día para fabricar ladrillos a partir de residuos mineros mediante herramientas de simulación 3D.

2.2 Objetivos Específicos

Establecer el flujograma y balance de materiales del proceso de obtención de ladrillos a partir de residuos o relaves de flotación de minerales.

Dimensionar los equipos que forman parte del proceso de obtención de ladrillos a partir de residuos de flotación de minerales.

Diseñar por medio de herramientas 3D la planta piloto del proceso de obtención de ladrillos a partir de relaves o residuos del proceso de flotación de minerales.

3. Metodología Experimental

3.1 Revisión Bibliográfica

Se utilizó un tiempo adecuado para llevar a cabo una revisión bibliográfica sobre todos los elementos concernientes a este proyecto. El uso del relave minero como insumo para la elaboración de agregados de construcción, la normativa de fabricación y control de calidad para la fabricación de ladrillos, los equipos necesarios para los diferentes procesos de tratamiento del mineral y para la fabricación de ladrillos y material agregado de vías.

3.2 Caracterización del Relave Polimetálico

Los relaves mineros para caracterizar fueron obtenidos a nivel de laboratorio en el municipio de California Santander, estos fueron mezclados mediante la obtención de un composito el cual se le realizaron las siguientes caracterizaciones con el fin de identificar: especies minerales, grado de liberación, presencia y cantidad de arcillas, tamaño de algunos metales y/o minerales y propiedades físicas.

3.2.1 Caracterización Química

Se realizó un análisis químico semicuantitativo del relave minero usando espectrometría de dispersión de energía de Rayos-X (EDS). Este análisis se realizó en dos puntos de la muestra donde se apreciaron cantidades significativas de metales como Aluminio (Al), Potasio (K), Hierro (Fe), Magnesio (Mg) y Circonio (Zr). (Apéndice A, Figura A1).

Para la técnica de fluorescencia de rayos X (FRX) se observaron diferentes óxidos: SiO₂ (78,75%), Al₂O₃ (10,05%), K₂O (5,82%), Fe₂O₃ (1,78%), TiO₂ (O, 36%), MgO (0,36%), entre otros con menor concentración. (Apéndice A, Figura A2)

3.2.2 Caracterización Física

3.2.2.1 Ensayo Frasco de Le Chatelier. Como parte de la caracterización física se determinó la aptitud del relave como agregado para concreto, por medio del ensayo de Le Chatelier, por el cual podemos conocer la densidad del relave. Este ensayo consiste en agregar aceite de almendras hasta una medida base en un frasco de Le Chatelier estandarizado como el de la figura 2.

A continuación, se agrega una cantidad seleccionada de relave minero mediante un embudo largo y se observa cuál fue el volumen desplazado para luego calcular la densidad específica del relave de acuerdo con la relación:

$$Densidad\ real = \left(\frac{masa\ del\ relave}{volumen\ desplazado} \right)$$

Se obtuvo como resultado una densidad específica promedio de: **2.75 g/cm³**

Figura 2.

Ensayo Frasco de Le Chatelier.



Nota: Castro, Prada, 2022.

3.2.3 Caracterización Granulométrica

Se realizó análisis granulométrico con el fin de conocer o determinar cuantitativamente la distribución de tamaños de partículas del relave minero.

Con el fin de obtener una muestra representativa se realizó muestreo por cono y cuarteo teniendo una muestra final de 50 gramos. Los materiales limo-arcillosos, cuyos terrones en estado seco no rompan con facilidad, se procesaron por la vía húmeda a forma de presión y se introdujeron en un horno para facilitar la desaglomeración de las partículas, producto de la arcillapropia del relave minero o el efecto del espumante (MICB) introducido en la muestra durante el proceso de flotación. Se realizó el análisis granulométrico de la fracción que pasa el tamiz de mallas 100, 200, 325 y mayor a 325 debido a que vienen de un proceso de molienda y se espera que sean finos. En el apéndice B se observan los modelos de Rosin Rammler y Gates-Gaudin- Schumann obtenidos de los resultados de granulometría.

3.2.4 Caracterización Mineralógica

En la figura 3 se presenta las especies minerales que se encuentran en los relaves mineros obtenidos a nivel de laboratorio, se aprecia que el cuarzo es el más abundante (50%).

Figura 3.

Especies Minerales en Relaves Mineros.

MINERAL	FÓRMULA	PORCENTAJE
Cuarzo	SiO_2	50%
Sericita	$\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$	12%
Pirita	FeS_2	12%
Arcillas	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	13%
Feldespato	$(\text{K}, \text{Na}, \text{Ca}, \text{Ba}, \text{NH}_4)(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_8$	5%
Bornita	Cu_5FeS_4	4%
Calcopirita	CuFeS_2	3%
Ovelita	CuS	0.99%
Tierras raras	La – Ce – Pr – Nd- Otras	0.01%

3.2.5 Caracterización Microscópica

Esta se efectuó con la finalidad de conocer la liberación de los minerales presentes que se encuentra en función tanto de la probabilidad de ruptura como del tamaño al que se fracciona. El

análisis realizado, consistió en realizar la separación de minerales a distintos tamaños de malla, empezando en la #100 hasta la #325. En el apéndice C se muestran imágenes de estereoscopia para determinar la liberación de partículas.

3.3 Tratamiento del Relave Minero

3.3.1 Lavado del Relave Minero y Filtrado

Inicialmente, se llevó a cabo el lavado del relave con agua a 60°C en un tiempo aproximado de 10 minutos, esto con el fin de remover agentes químicos tales como: Metil isobutil carbinol (aceite de pino), Xantato amílico de potasio (PAX), Sulfhidrato de sodio (NASH), los cuales son ampliamente usados en el proceso de flotación. Este lavado se realizó con la ayuda de una plancha de calentamiento eléctrica y un agitador para favorecer el contacto entre el agua y las partículas. (Apéndice D)

A continuación, se realizó el filtrado de la pulpa en un filtro prensa para así obtener una “torta” de relave húmedo que se dispone a un secado en estufa, en la cual se realiza un precalentamiento aproximado de una hora y posteriormente un tiempo de secado de 24 horas a 100-105°C. (Apéndice E)

3.3.2 Peletización y Encapsulado.

Finalmente, se llevó a cabo el proceso de peletización con el fin de encapsular los metales pesados y así mismo reducir su área superficial expuesta al ambiente, mitigando su interacción con la misma. Este proceso se llevó a cabo en un disco peletizador, disponiendo una mezcla de 80% relave, 18% cemento y 2% cal, a la cual se le añade agua gradualmente para favorecer la formación de los pellets, los cuales fueron secados y almacenados posteriormente (Romero & Flores, 2010). (Apéndice F)

3.4 Fabricación de probetas y ensayos mecánicos con mezcla de cemento, agua, arena fina y relaves mineros seleccionados.

Para fabricar las probetas se debe tener en cuenta la dosificación del material para ladrillos y material agregado de vías, respectivamente. La dosificación adecuada del ladrillo corresponde a un porcentaje en peso de 75% arena fina y 25% cemento (Técnica, 2000). La dosificación para el material agregado de vías corresponde a un 38% de arena fina, 38% grava, y 24% cemento (En & Municipio, 2019).

En busca de una resistencia adecuada según las normas NTC 4026 para ladrillos y NTC 3318 para el material agregado de vías, se diseñaron mezclas con diferentes composiciones en peso como se muestra a continuación:

3.4.1 Diseño de mezclas para Fabricación de Ladrillos.

En la tabla 2, se observan los diferentes porcentajes en peso de los agregados para tres diferentes tipos de mezcla, reemplazando en un 10-50-90% de arena fina por relave, manteniendo el porcentaje de cemento fijo. (Apéndice G)

Tabla 1.

Porcentajes de dosificación para ladrillos reemplazando arena fina por relave en un 10-50- 90%.

Reemplazo de Arena Fina por Relave								
Mezcla 1			Mezcla 2			Mezcla 3		
Reemplazo del 10%			Reemplazo del 50%			Reemplazo del 90%		
%	%	%	%	%	%	%	%	%
Arena fina	Relave	Cemento	Arena fina	Relave	Cemento	Arena fina	Relave	Cemento
67.5	7.5	25	37.5	37.5	25	7.5	67.5	25

En la tabla 3, se observan los diferentes porcentajes en peso de los agregados para tres diferentes tipos de mezcla, reemplazando en un 10-50-90% de cemento por relave, manteniendo el porcentaje de arena fina fijo.

Tabla 2.

Porcentajes de dosificación para ladrillos reemplazando cemento por relave en un 10-50-90%.

Reemplazo de Cemento por Relave								
Mezcla 1			Mezcla 2			Mezcla 3		
Reemplazo del 10%			Reemplazo del 50%			Reemplazo del 90%		
%	%	%	%	%	%	%	%	%
Arena	Relave	Cemento	Arena	Relave	Cemento	Arena	Relave	Cemento
fina			fina			fina		
75	2.5	22.5	75	12.5	12.5	75	22.5	2.5

3.4.2 Diseño de Mezclas para Material Agregado de Vías.

En la tabla 4, se observan los diferentes porcentajes en peso de los agregados para tres diferentes tipos de mezcla, reemplazando en un 10-50-90% de arena fina por relave, manteniendo el porcentaje de cemento y grava fijo. (Apéndice H)

Tabla 3.

Porcentajes de dosificación para material agregado de vías reemplazando arena fina por relave en un 10-50-90%.

Reemplazo de Arena fina por Relave											
Mezcla 1				Mezcla 2				Mezcla 3			
Reemplazo del 10%				Reemplazo del 50%				Reemplazo del 90%			
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Arena	Grav	Relav	Cemen	Arena	Grav	Relav	Cemen	Aren	Gra	Relav	Cemen
fina	a	e	to	fina	a	e	to	afina	va	e	to

Reemplazo de Arena fina por Relave											
Mezcla 1				Mezcla 2				Mezcla 3			
Reemplazo del 10%				Reemplazo del 50%				Reemplazo del 90%			
34.2	38	3.8	24	19	38	19	24	3.8	38	34.2	24

En la tabla 5, se observan los diferentes porcentajes en peso de los agregados para tres diferentes tipos de mezcla, reemplazando en un 10-50-90% de cemento por relave, manteniendo el porcentaje de arena fina y grava fijo.

Tabla 4.

Porcentajes de Dosificación para Material Agregado de Vías Reemplazando Cemento por Relave en un 10-50-90%.

Reemplazo de Cemento por Relave											
Mezcla 1				Mezcla 2				Mezcla 3			
Reemplazo del 10%				Reemplazo del 50%				Reemplazo del 90%			
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Aren	Gra	Relav	Cemen	Arena	Grav	Relave	Cemen	Aren	Grava	Relav	Cemen
afina	va	e	to	fina	a		to	afina		e	to
38	38	2.4	21.6	38	38	12	12	38	38	21.6	2.4

3.4.3 Fabricación de Probetas Para ensayos de Compresión

A continuación, se fabricaron las probetas cilíndricas con los diferentes tipos de mezcla, el molde tiene 10 cm de diámetro y 20 cm de alto, el método de llenado se realizó en 3 partes, en cada parte se comprimió la mezcla con 25 golpes con ayuda de una varilla de punta roma y se sumergen en la piscina de curado (ICONTEC NTC 673, 2010). Luego de dos días de secado las probetas fueron desmoldadas mediante inyección de aire comprimido, posterior a esto se sumergieron en la piscina de curado. Transcurridos 28 días, se retiraron las probetas de la piscina y se realizó el ensayo de compresión para cada una de ellas.

3.5 Ensayo de Absorción de Agua

Adicionalmente, se realizó la determinación de absorción de agua de las probetas de ladrillo, para esto se fabricaron especímenes de no menos 250 g como lo indica la norma NTC 4017 “Absorción de agua en unidades de arcilla”, fabricados los especímenes se sometieron a un secado en estufa a ± 110 a 115°C durante 1 día y posteriormente se registró el peso. Pasadas dos horas se vuelve a registrar dicho dato. La norma indica que esta diferencia de peso no debe ser mayor a 0.2%. Los especímenes se dejan enfriar para sumergir en agua durante 24 horas, transcurridas las 24 h se retira el exceso de agua con un paño previamente humedecido y se registra el peso (ICONTEC, 2004). En el apéndice I se observan los especímenes fabricados y los valores.

Según las normas NTC 4026 para ladrillos y NTC 3318 para material agregado de vías, anteriormente mencionadas, nos indican cual es la resistencia mínima adecuada y el máximo porcentaje de absorción de agua para las probetas, como se indica a continuación (Ver figura 3).

Figura 4.

Resistencia a la Compresión y Absorción de Agua para Ladrillos. Norma NTC 4026.

Resistencia a la compresión a los 28 d (R_{c28}) ^a , evaluada sobre el área neta promedio (A_{np})			Absorción de agua (Aa) % según el peso (densidad) del concreto secado en horno, kg/m^3		
Mínimo ^b , MPa			Promedio de 3 unidades, máximo, %		
Clase	Promedio de 3 unidades	Individual	Peso liviano, menos de $1\,680\text{ kg/m}^3$	Peso mediano, de $1\,680\text{ kg/m}^3$ hasta menos de $2\,000\text{ kg/m}^3$	Peso normal, $2\,000\text{ kg/m}^3$ o más
Alta	13	11	15 %	12 %	9 %
Baja	8	7	18 %	15 %	12 %

3.6 Dimensionamiento de equipos y Diseño de la planta piloto 3D

Con la ayuda del programa AutoCAD Plant 3D 2020, se diseñó toda la planta piloto. Es decir, se diseñan los equipos con sus dimensiones que fueron utilizados en el proceso, además, se realiza el flujograma con el balance de masa que se utilizó para la obtención de los ladrillos.

4. Resultados y discusiones

4.1 Ensayo de Compresión

Una vez transcurridos los 28 días de curado, las probetas se secaron superficialmente con tela y se llevaron a ensayo de compresión. En las tablas 5 y 6 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo.

4.1.1 Ensayo de Compresión para Ladrillos

Tabla 5.

Resultados de resistencia a la compresión para ladrillos.

Reemplazo de agregado fino			Reemplazo de material cementante		
Proporción de mezcla	Peso (g)	Resistencia (Mpa)	Proporción de mezcla	Peso (g)	Resistencia(Mpa)
10%	3216	10.03	10%	3214	6.93
50%	3206	14.97	50%	3103	1.55
90%	3135	12.92	90%	-	-

4.1.2 Ensayo de compresión para material agregado de vías

Tabla 6.

Resultados de resistencia a la compresión para material agregado de vías.

Reemplazo de agregado fino			Reemplazo de material cementante		
Proporción de mezcla	Peso (g)	Resistencia (Mpa)	Proporción de mezcla	Peso (g)	Resistencia(Mpa)
10%	3518	16.88	10%	3542	15.34
50%	3525	19.52	50%	3479	6.29
90%	3370	12.53	90%	-	-

Apreciados los resultados, para las probetas de los ladrillos, los tres diferentes tipos de mezclas con reemplazo de agregado fino cumplen la resistencia mínima a la compresión según la tabla 7. Sin embargo, la probeta con una proporción de mezcla del 50% es la más adecuada. En cuanto al reemplazo del material cementante, a mayor proporción de mezcla, disminuye su resistencia a la compresión y por esto, al 90% la probeta no es consistente. Además, según la tabla 8, ninguna proporción de mezcla cumple con la norma.

La resistencia mínima a la compresión para material agregado de vías es de 20,6 Mpa (INVIAS; Ministerio de Transporte, 2017). Como se observa en la tabla 7, la máxima resistencia se obtiene con un reemplazo del 50% de arena fina con un valor de 19,52 Mpa, un valor que no cumple con la resistencia mínima para este tipo de concreto, por esto, se realizaron pruebas adicionales donde se variaron los parámetros de dosificación para la mezcla, aumentando el porcentaje de cemento, sin embargo, también arrojaron un valor menor que el requerido, el valor máximo de estas pruebas fue de 17,84 Mpa como se observa en el apéndice L. Ya que no se alcanzó el valor de resistencia requerido para las probetas de material agregado de vías, se realizará el balance de materiales y el diseño de la planta tomando únicamente como referencia el uso del relave para la fabricación de ladrillos.

Como se indicó anteriormente, la mezcla con un reemplazo de 50% de arena fina nos da un valor más alto en comparación con los otros porcentajes y además cumple con la resistencia mínima a la compresión de los ladrillos. Adicionalmente, se fabricaron 6 probetas con esta proporción, para así ratificar que esta mezcla cumpliera con la resistencia mínima adecuada, los resultados de esta prueba se pueden apreciar en el apéndice K.

4.2 Flujograma, Balance de Materiales y Análisis de Costos de Materiales

Realizadas las pruebas preliminares, se efectuó la conformación del ladrillo empleando el

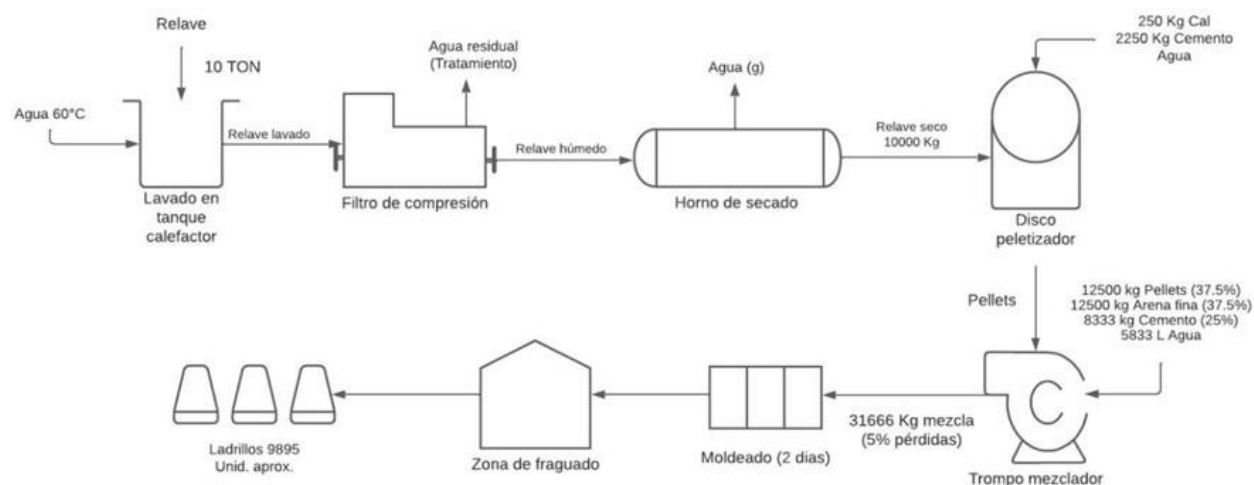
porcentaje de relave que sustituye el 50% de arena fina en la mezcla necesaria.

Los ensayos mecánicos y de hidratación, nos dan la viabilidad para proponer el flujograma y balance de materiales para la fabricación de ladrillos donde se pueden observar los equipos principales y auxiliares con los cuales se plantea el diseño de la planta piloto. Finalmente se realiza un análisis básico de costos para la fabricación de los ladrillos.

4.2.1 Flujograma y Balance de Materiales para Fabricación de Ladrillos

Figura 5.

Flujograma y balance de materia para 10 toneladas.



Nota: Castro, Prada, 2022.

Como se observa en la Figura 4, el uso de 10 Toneladas de relave minero produciría 9895 ladrillos con dimensiones de 20x10x8 cm y un peso aproximado de 3,2 kg. El análisis de las dimensiones y el peso se encuentran en el apéndice L.

El dato 5% de pérdidas en el proceso fue proporcionado por el Ing. Jorge Ventocilla Shaw, Diseñador de plantas de beneficio de minerales de la empresa JVS Ingenieros S.A.C (<http://www.jvsingenieros.com/>).

La figura 5 presenta el molde elaborado y los ladrillos obtenidos con la mezcla

seleccionada.

Figura 6.

Molde y ladrillos obtenidos con la mezcla seleccionada



Nota: Castro, Prada, 2022.

4.2.2 Costos de Ladrillo Macizo obtenido y Relación con Ladrillos del Mercado

Tomando una base de producción de 1000 ladrillos, se calculó el valor por unidad de ladrillo, teniendo en cuenta el valor de los diferentes agregados tomando como referencia los precios de estos en el almacén Homecenter de la empresa SODIMAC. Además, se tomó como referencia el precio por unidad de un ladrillo macizo para realizar la comparación.

Las tablas con los cálculos completos se encuentran en el apéndice M. A continuación, se muestran algunas medidas y valores:

Tabla 7.

Dimensiones y costo de unidad de ladrillo fabricado a través de relaves.

Ladrillo	Medida (cm)	Densidad	Volumen (m ³)	Masa (Kg)	Precio
obtenido con		mezcla(Kg/m ³)			(COP)
mezcla que					
incluyelaves	20x10x8	1998,77	0,0016	3,198	896,91
mineros					

Comparado con un ladrillo macizo de las mismas dimensiones (20x10x8), tiene un valor de **\$1300 COP** en HOMECENTER. (HOMECENTER, 2022). Ver figura 6.

Figura 7.

Precio de ladrillo macizo en HOMECENTER.



Nota: Bloque macizo 10 x 20 x 8 cm 50u/m2 - Homecenter.com.co.

Como se observa, hay una diferencia de **403,09 COP** por unidad de ladrillo, esto equivale al ahorro en materiales por cada ladrillo fabricado a través de relaves. Ahora bien, como se aclaró anteriormente este ahorro es equivalente utilizando el precio de los diferentes agregados desde HOMECENTER, es por esto que se contactaron dos proveedores departamentales diferentes de arena los cuales venden la arena a menor precio. Un kilogramo de arena lavada en HOMECENTER tiene un precio aproximado de 248 COP, mientras que el proveedor nos da un precio de 38 COP por kilogramo de arena. Como se observa, esto disminuiría el costo unitario del ladrillo fabricado, y aumentaría el ahorro por cada unidad.

4.3 Dimensionamiento y Costos de Equipos

El dimensionamiento de equipos es de suma importancia para obtener una óptima eficiencia de la planta, a continuación, se dimensionan los equipos principales y auxiliares del proceso:

Tabla 8.

Equipos principales del circuito de obtención de ladrillos. Apéndice N.

Equipo principal	Fabricante	CapacidadMÁX	Potencia(KW)	Área(m ²)	Precio(US)
Tanque delavado	Local	10 L	1.2	3	10450
Filtro prensa	MinercampoSAS	60 L	2.2	4	12200
Horno secado	MinercampoSAS	32 L	5.5	10	13500
Disco peletizador	Local	0.6 ton/h	2	4	5300
Trompo mezclador	Local	560 L	5.5	3	11100
Moldeador ladrillos	MinercampoSAS	6 pcs/h	4.8	10	10500
Subtotal					63050

Nota: Prof. Walter Pardavé e Ing. Jorge Ventocilla Shaw, Diseñador de plantas de beneficio de minerales de la empresa JVS Ingenieros S.A.C (<http://www./jvsingenieros.com/>).

En la tabla 10 Se presentan los equipos auxiliares del circuito de preparación, que son requeridos para almacenamiento, transporte y otros.

Tabla 9.

Equipos auxiliares del circuito de obtención de ladrillos. Apéndice O.

Equipoauxiliar	Fabricante	Capacidad	Potencia (KW)	Área (m ²)	Precio (US)
Bomba a filtro prensa	Minercampo	48 L/min	1.5	2	11590

Equipo auxiliar	Fabricante	Capacidad	Potencia (KW)	Área (m ²)	Precio (US)
SAS					

Nota: Prof. Walter Pardavé e Ing. Jorge Ventocilla Shaw, Diseñador de plantas de beneficio de minerales de la empresa JVS Ingenieros S.A.C (<http://www.jvsingenieros.com/>).

A continuación, en la tabla 11 se muestra la infraestructura necesaria para los equipos del circuito.

Tabla 10.

Infraestructura requerida.

Infraestructura requerida	Ejecutor	Material	Proceso	Área (m ²)	Precio (US)
Base de horno secado	Local	Mortero	Fraguado	10	2500
Base de disco peletizador	Local	Mortero	Fraguado	10	2400
Zona fraguado					2790
Subtotal					7690

Nota: Prof. Walter Pardavé e Ing. Jorge Ventocilla Shaw, Diseñador de plantas de beneficio de minerales de la empresa JVS Ingenieros S.A.C (<http://www.jvsingenieros.com/>).

4.3.1 Monto de Inversión y Costos de la Planta

Tabla 11.

Inversiones Fijas.

Rubro	Dolares (US)
Equipos principales	63050
Equipos auxiliares	11590
Infraestructura (Obras civiles)	7690
Energía	5972 (8% equipos)
Terrenos	11200 (15% equipos)

Rubro	Dolares (US)
Organización	3800 (5% equipos)
Imprevistos (10% del costo de equipos)	7465
Total	110767

Nota: Prof. Walter Pardavé e Ing. Jorge Ventocilla Shaw, Diseñador de plantas de beneficio de minerales de la empresa JVS Ingenieros S.A.C (<http://www./jvsingenieros.com/>).

Tabla 12.

Capital de trabajo.

Rubro	Dólares (US)
Suministros	18770
Insumos	11130
Imprevistos	3320
Total	33220

Nota: Prof. Walter Pardavé e Ing. Jorge Ventocilla Shaw, Diseñador de plantas de beneficio de minerales de la empresa JVS Ingenieros S.A.C (<http://www./jvsingenieros.com/>).

Es decir, Inversión fija + Capital de trabajo: US \$143,987.00

4.4 Análisis Económico

El objetivo del análisis económico es saber cuánto la planta puede llegar a ahorrarse utilizando relave minero a cambio de arena fina o cemento. Como se observa en la figura 4, el proceso de obtención de ladrillos parte de 10 toneladas de relave. Suponiendo que la empresa trabaja 50 semanas (350 días) al año, considerando dos semanas al año para mantenimiento general, se tendría los siguientes valores:

Tabla 13.*Información para el Análisis Económico.*

Precio ladrillo Homecenter	1.300 COP
Precio ladrillo obtenido con mezcla que incluye relave minero	896,91 COP
Ahorro por ladrillo	403,09 COP
Ladrillos fabricados por año	3.463.250 unidades
Precio del dólar en COP	4.554 COP

Se realiza el siguiente cálculo:

$$\frac{403.09 \text{ COP}}{1 \text{ ladrillo}} * \frac{x}{3.463.250 \text{ ladrillos}}$$

$$x = 1.396.001.443 \text{ COP} = 306.544,01 \text{ US}$$

Es decir, la planta se ahorra 306.544,01 dólares al año. Ahora bien, es claro que la planta debe invertir en gastos anuales como mantenimiento de equipos, personal, infraestructura, etc. (sección 4.3.1), siendo un valor de US \$143.987. Entonces se concluye que la planta tiene un gran beneficio no solo ambiental al usar relave minero, sino que sus ahorros anuales pueden saldar rápidamente la inversión inicial de la planta.

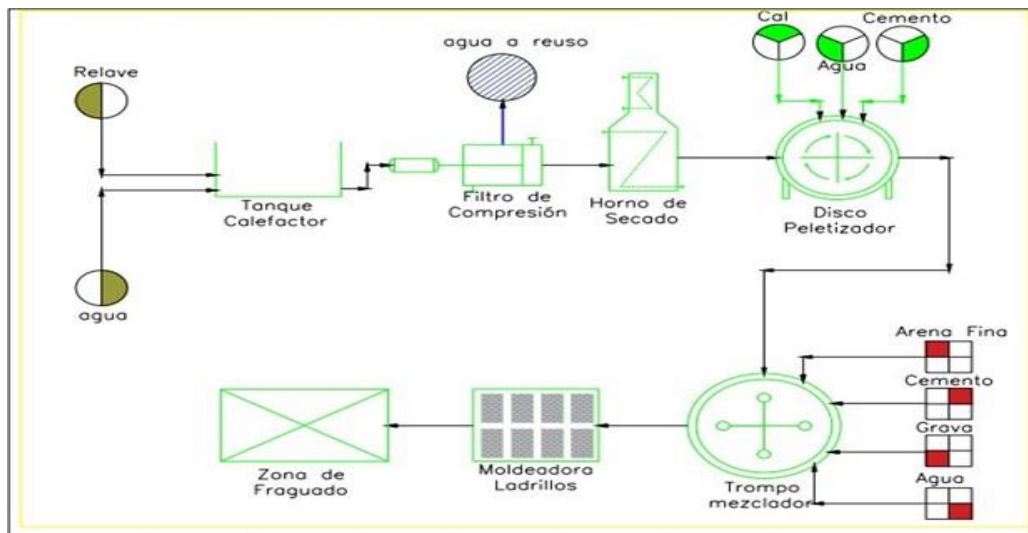
4.5 Plano General y Diseño 3D de la Planta Piloto

Para el diseño de la planta se utilizó el Software AutoCAD Planta 3D con el procedimiento de laboratorio y el balance de materiales obtenido anteriormente.

4.5.1 Plano General Planta Piloto de la Ladrillera a partir de Mezcla que Incluye el Relave Minero (Ver figura 7)

Figura 8.

Plano General.

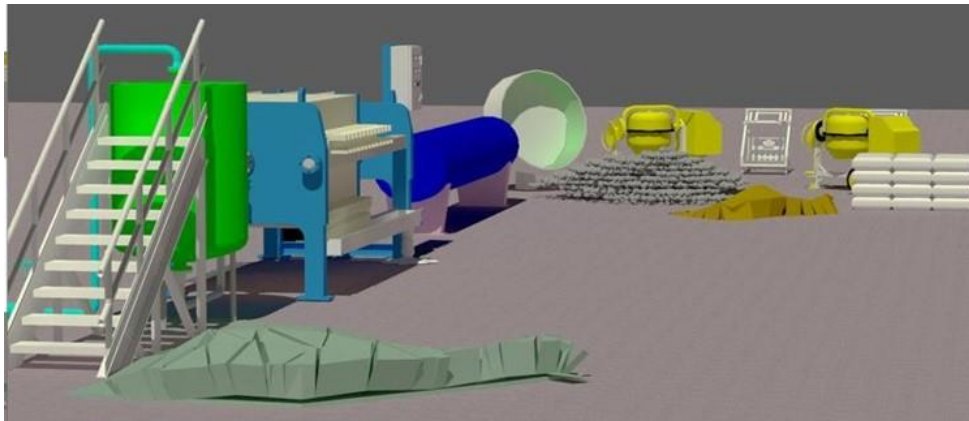


Nota: Castro, Prada, 2022.

4.5.2 Vistas 3D de la Planta Piloto para la Fabricación de Ladrillos Macizos a partir de la Mezcla que incluye el Relave Minero. (Ver figuras 8, 9 y 10)

Figura 9.

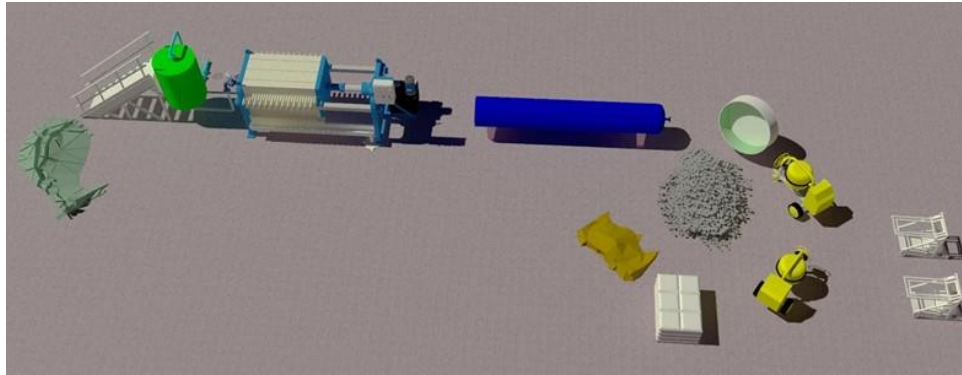
Vista Panorámica.



Nota: Castro, Prada, 2022.

Figura 10.

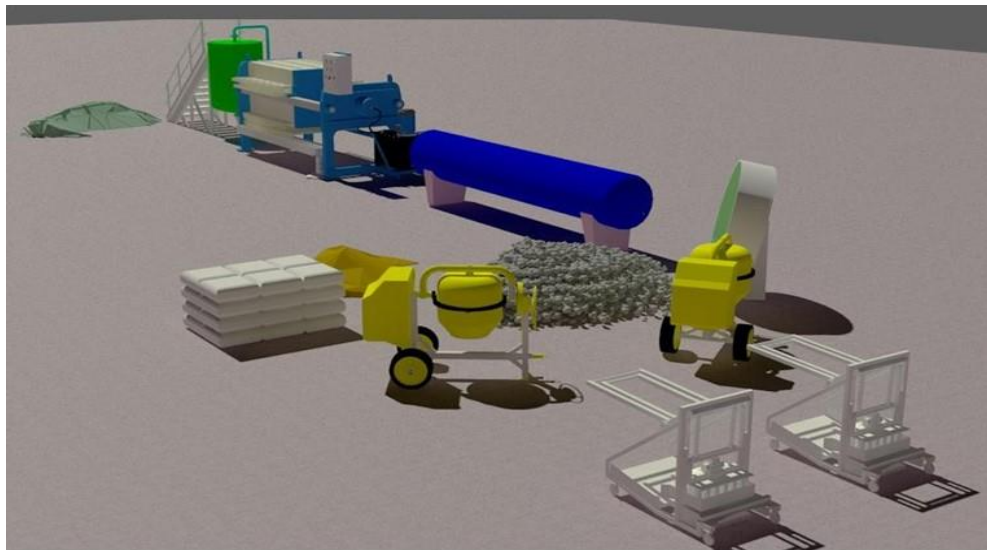
Vista Superior.



Nota: Castro, Prada, 2022.

Figura 11.

Vista Lateral.



Nota: Castro, Prada, 2022.

5. Conclusiones

- Los resultados de las pruebas realizadas para el material agregado de vías no cumplieron con la resistencia mínima a la compresión de la normatividad, por ello, se enfocó hacia el diseño y fabricación de los ladrillos.
- La mezcla adecuada para obtener ladrillos macizos es: 37,5% Pellets, 37,5% arena fina, 25% cemento y agua necesaria.
- El ladrillo macizo obtenido cumple la norma NTC 4026, con una resistencia a la compresión de 14,97 Mpa.
- El proceso para obtener ladrillos a partir de mezclas que contienen relave minero es: lavado del relave, filtración de la pulpa, peletización y encapsulado, obtención de la mezcla, moldeado, fraguado del ladrillo y finalmente, la obtención del producto final.
- El valor de cada ladrillo obtenido es de 896,91 COP, respecto al valor comercial actual de 1300 COP de un ladrillo con las mismas dimensiones. Daría un ahorro de 403,09 COP por ladrillo fabricado, lo cual, con un total de 3.463.250 ladrillos producidos en un año, nos da un retorno de inversión en unos meses.
- La planta piloto para obtener ladrillos requiere una inversión de \$143.987 dólares.
- Es viable ambiental, económica y socialmente, obtener ladrillos con relaves mineros y así generamos economía circular y un desarrollo minero que propende por la sostenibilidad.

6. Recomendaciones

- Para el caso de material agregado de vías, se recomienda realizar más ensayos mecánicos como ensayo de compresión, variando los diferentes parámetros para hacer cumplir la normatividad.
- Se recomienda realizar más pruebas con diferentes insumos para la dosificación del material agregado de vías.

Referencias Bibliográficas

- Ansori. (2015). No Title No Title No Title. *Paper Knowledge. Toward a Media History of Documents*, 3(April), 49–58.
- Arquitecto Gustavo. *La relación agua cemento*. ICPA, mimeógrafo N° 148. Tomado de <https://www.arquitectogustavo.com.ar/Archs/relacion%20agua%20cemento-ICPA.pdf>
- Chindris, L., Arad, V., Arad, S., Radermacher, L., & Radeanu, C. (2017). Valorization of mining waste in the construction industry general considerations. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*, 17(41), 309–316. <https://doi.org/10.5593/sgem2017/41/S18.040>
- Christensen, T. H., Zelinskaya, E. V., & Starostina, V. U. (2019). Life cycle assessment of mining and processing productiolife cycle assessment of mining and processing production. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*, 6(4), 681–685.
- En, T., & Municipio, E. L. (2019). *Estudios y planes complementarios pavimento en placa-huella*. 1–43.
- Homecenter. (s.f.). *Bloque macizo 10 x 20 x 8 cm 50u/m²* - Recuperado 29 de septiembre de 2022, de <https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/99933/bloque-macizo-10-x-20-x-8-cm-50u-m2/99933/>
- ICMM & Bullet; *Recuperar, reutilizar, reciclar*. (2022). 20 Mayo 2022, Recuperado de <https://www.icmm.com/es/mineria-y-los-metales/produccion-responsable/recuperar-reutilizar-reciclar>
- ICONTEC NTC 673. (2010). *Ingeniería Civil y Arquitectura. Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto -ICONTEC*. 571, 1– 13.

ICONTEC. (2004). NTC 5324. Bloques de Suelo cemento para muros y divisiones. Definiciones.

Especificaciones. Métodos de ensayo. Condiciones de entrega. *Norma Técnica Colombiana-5324*, 44.

Infante, C. (2011). *Pasivos Ambientales Mineros. Barriendo bajo la alfombra*. 68.

<https://exactasbienescomunes.files.wordpress.com/2012/02/pasivos-ambientales-mineros-barriendo-bajo-la-alfombra.pdf>

INVIAS; Ministerio de Transporte. (2017). *Guía de Diseño de Pavimentos con Placa-huella.pdf*.

INVIAS; Ministerio de Transporte. (2017). *Guía de Diseño de Pavimentos con Placa-huella.pdf*.

Kuranchie, F. A., Shukla, S. K., & Habibi, D. (2013). *Mine Wastes in Western Australia and Their*

Suitability for Embankment Construction. February, 1443–1452.
<https://doi.org/10.1061/9780784412787.145>

Mendoza, G. V., & Cabello, G. D. (2021). *Construcción de vivienda a partir de bloque con*

material reciclado. https://www.uteq.edu.ec/doc/investigacion/libros/LB_2021_041

Ministerio de Energía y Minas. (2021). *Estandarizar los procesos relacionados con Drenajes*

Ácidos Mineros. La Nueva Energía.

Modi, J. V., Sujeet, B., Aruna, M., & Harsha, V. (2014). *Utilization of Mining Wastes in*

Manufacturing of Bricks. September 2016.

Morales, A., & Hantke, M. (2020). *Guía metodológica de Cierre de Minas*. Comisión

Económica Para América Latina y El Caribe (CEPAL), 283.
https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/46532/S2000767_es.pdf

Pinto, A., 2022. *Resistencia del concreto a los 28 días*. [online] Ingeniería Real. Recuperado de

<https://ingenieriareal.com/resistencia-del-concreto-a-los-28-dias/>. [Accessed 22 September 2022].

Romero, A., & Flores, S. (2010). Reuso de relaves mineros como insumo para la elaboración de agregados de construcción para fabricar ladrillos y baldosas. *Industrial Data*, 13(1), 75–

82. redalyc.org/pdf/816/81619984010.pdf

Servicio Nacional de Geología y Minería, Chile. *Depósito de relaves*. 2022. Recuperado de <https://www.sernageomin.cl/preguntas-frecuentes-sobre-relaves/>

Técnica, N. (2000). 2000-06-21 *Concretos. Especificaciones De Los Agregados Para Concreto*.

Apéndices

Apéndice A. Resultados Caracterización Química.

Figura 1A. *Análisis químico elemental semicuantitativo del relave por EDS.*

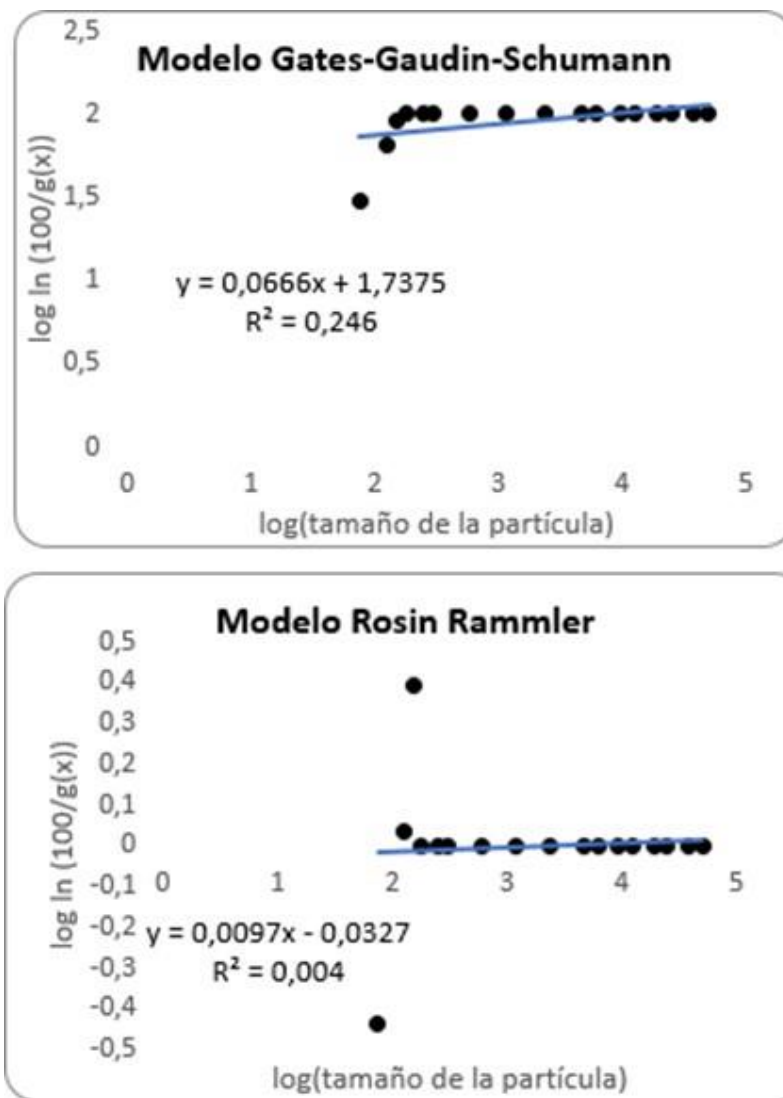
Elemento	Punto A		Punto B	
	%p/p	At%	%p/p	At%
C	10,81	17,06	9,48	20,99
O	45,29	53,69	26,75	44,48
Al	1,26	0,88	2,96	2,92
Si	40,92	27,63	19,58	18,54
S	0,35	0,21	-	-
K	0,44	0,21	1,44	0,98
Fe	0,94	0,32	1,01	0,48
Mg	-	-	0,37	0,4
Zr	-	-	38,41	11,2

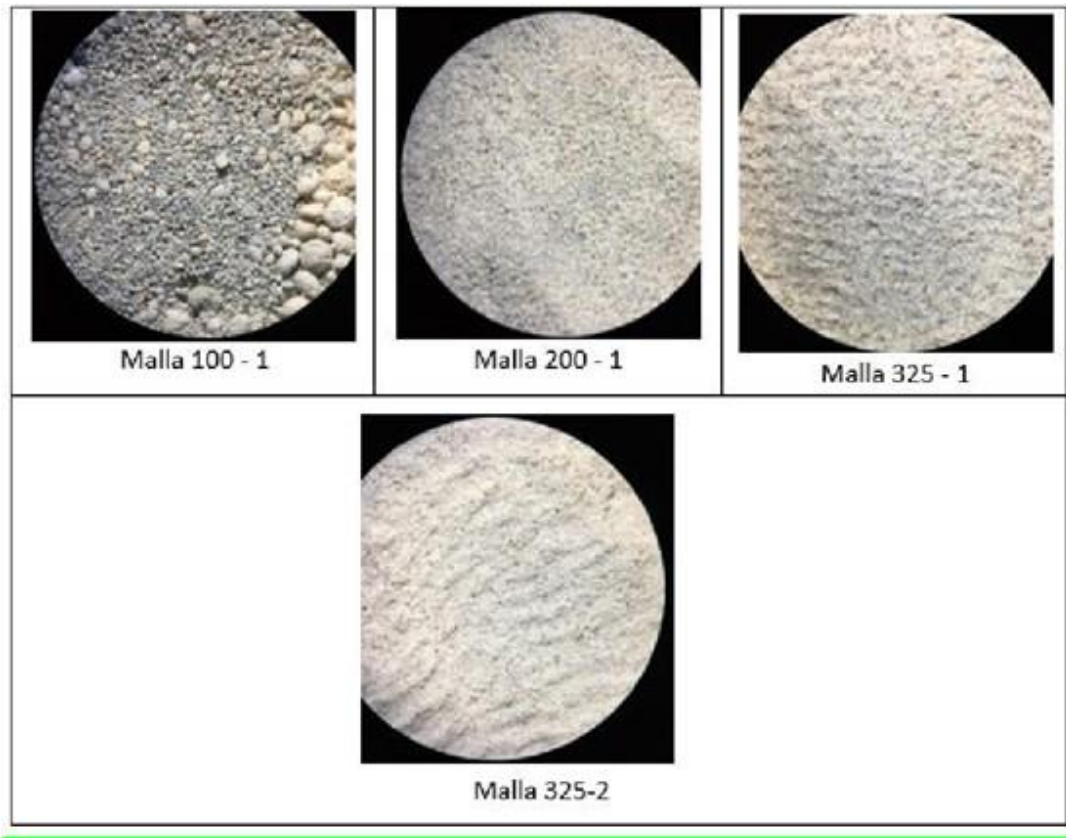
Figura 2A. *Análisis por Fluorescencia de Rayos X (FRX).*

Elemento	Número atómico(Z)	Concentración	Óxido	Concentración
Si	14	36,81%	SiO_2	78,75%
Al	13	5,32%	Al_2O_3	10,05%
K	19	4,83%	K_2O	5,82%
Fe	26	1,24%	Fe_2O_3	1,78%
Na	11	0,27%	TiO_2	0,36%
Mg	12	22,00%	MgO	0,36%
Ti	22	0,22%	Na_2O	0,36%
Ba	56	0,15%	BaO	0,17%
Ca	20	0,04%	P_2O_5	0,07%
P	15	0,03%	CaO	0,06%
Zr	40	0,02%	SO_2	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_2O_3	0,02%
Rb	37	0,01%	ZnO	0,02%
Zn	30	0,01%	Rb_2O	0,01%

Apéndice B. Modelos de Rosin Rammler y Gates-Gaudin-Schumann.

Figura 3B. Modelos Rosin Rammler y Gates-Gaudin-Shumann a partir del análisis granulométrico.



Apéndice C. *Imágenes de Estereoscopia para Determinar Liberación de Partículas.***Figura 4C.** *Imágenes de estereoscopia, diferente tamaño de malla.*

Apéndice D. *Lavado del Relave.*

Figura 5D. *Relave lavado a 60° C*



Apéndice E. *Filtrado y Secado del Relave.***Figura 6E.** *Proceso de filtración y posterior secado.*

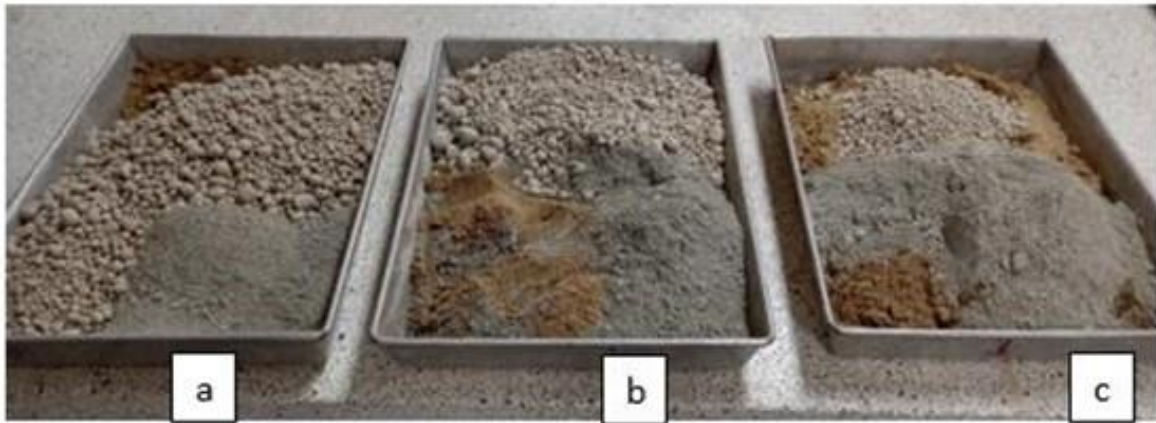
Apéndice F. *Peletización y Encapsulado.*

Figura 7F. *Proceso de peletización.*



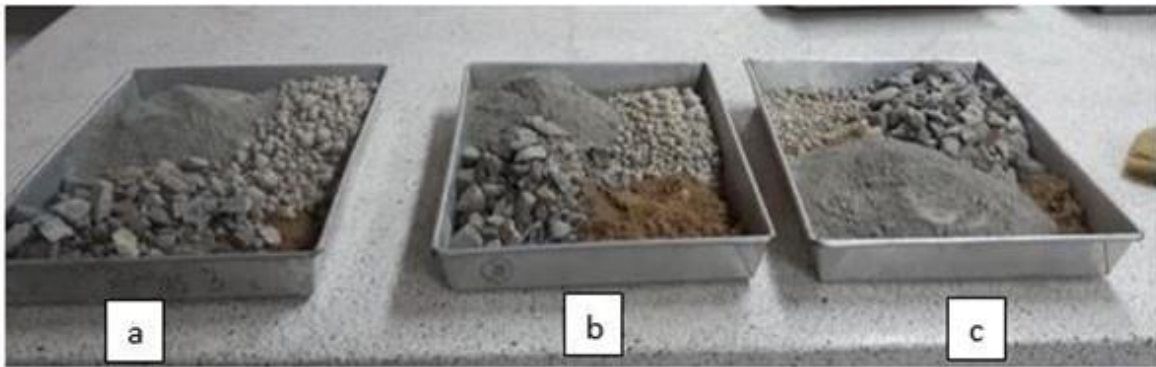
Apéndice G. *Mezclas con Sustitución de Arena Fina para Fabricación de Ladrillos.*

Figura 8G. *Preparación de las mezclas con la sustitución de arena fina por relave para la fabricación de ladrillos. a) Sustitución de 90% de arena fina. b) Sustitución de 50% de arena fina. c) Sustitución de 10% de arena fina.*



Apéndice H. *Mezclas con Sustitución de Arena Fina para Fabricación de Material Agregado de Vías.*

Figura 9H. *Preparación de las mezclas con la sustitución de arena fina por relave para la fabricación de placa huella. a) Sustitución de 90% de arena fina. b) Sustitución de 50% de arena fina. c) Sustitución de 10% de arena fina.*



Apéndice I. *Datos Prueba de Absorción de Agua.***Figura 10I.** *Peso en gramos de los especímenes para la fabricación de ladrillos en la prueba de absorción de agua.*

Designación	10%AFL	50% AFL	90% AFL	10% CL	50% CL
Peso antes de inmersión	484.4	461.8	449.4	450.6	450
Peso después de secado (antes de inmersión)	448.2	423.8	412.8	417.2	423
Peso después de 2 horas de haber secado (antes de inmersión)	448.1	423.8	412.8	417.7	422.8
Peso después de inmersión	516	495.7	497	479.6	492

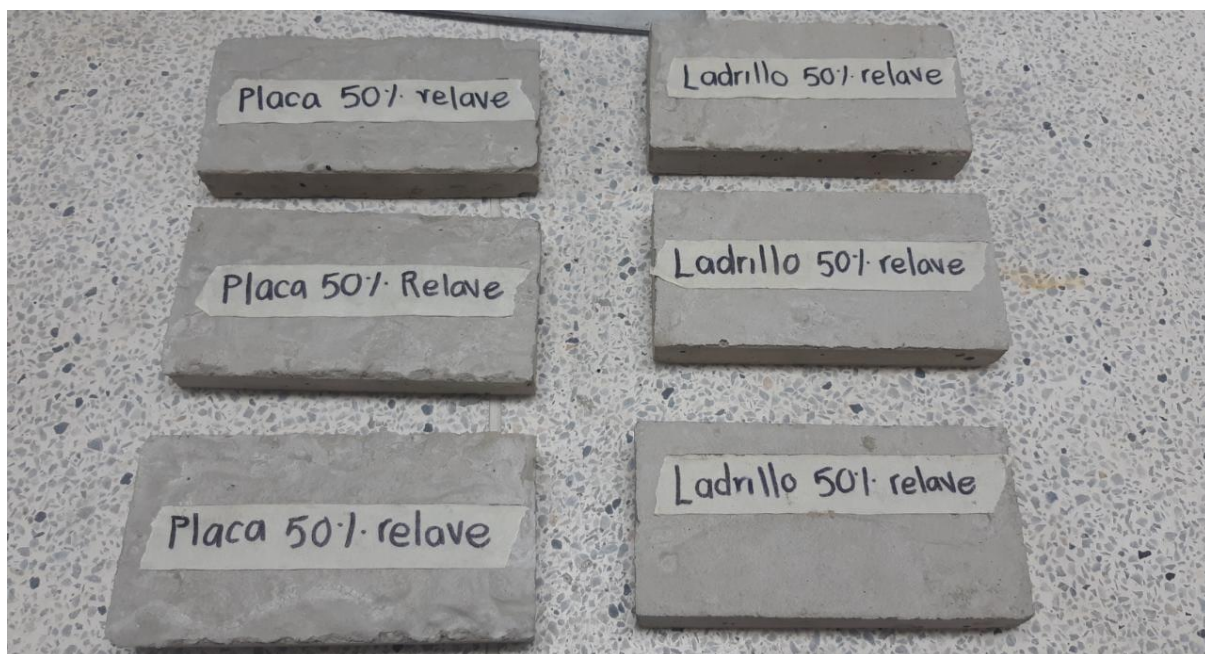
Figura 11I. *Ladrillos para la prueba de absorción de agua.*

Figura 12J. *Certificado ensayo de compresión 30 de agosto.*

[illegible]

Apéndice K. Certificado Ensayo de Compresión para Probetas de Ladrillos con Reemplazo del 50% de Arena Fina.

Figura 13K. Certificado ensayo compresión 13 de julio.

LABORATORIO DE ESTRUCTURAS Y MATERIALES		Código PPS-01												
INFORME DE RESULTADOS ENSAYO A COMPRESIÓN EN CILINDROS DE HORMIGÓN		Versión 06												
		Pág 1 de 1												
INFORME No. 07 - 22 - 07 - 1011H														
CLIENTE :	WALTER PARDAVE													
FECHA DE ENSAYO :	JULIO 13 2022													
PROCEDENCIA/OBRA:	MINESA													
NORMA DE REFERENCIA NTC 673: 2010														
CONDICIONES DE ENSAYO														
EQUIPO	PRENSA HIDRAULICA CS112298	CAPACIDAD EQUIPO 1500 kN												
PUNTO DE CARGA	CENTRICA	TEMPERATURA 23 °C												
VELOCIDAD DE ENSAYO	0.10 mm/s	ULTIMA CALIBRACIÓN 11 DE AGOSTO 2021 SERVINGTEGRAL LTDA												
CLASE 1														
HUMEDAD 60 %														
RESULTADOS														
IDENTIFICACION DE LA MUESTRA	IDENTIFICACION INTERNA	DIAMETRO	ALTURA	PESO	FECHA FUNDICION	FECHA DE PLANTURA	EDAD MUESTRA	AREA	RESISTENCIA ULTIMA	ESFUERZO	TIPO DE FALLA MINERAL Y A MIC			
		mm	mm	g	D	M	A	cm²	kgf	N/mm²				
L-01	C-01	10	20	3226	15	8	22	18	28	78.5	10169	130	1801	TIPO 2
1	C-02	10	20	3228	15	8	22	18	28	78.5	9598	122	1747	TIPO 5
2	C-03	10	20	3261	15	8	22	18	28	78.5	9812	125	1786	TIPO 5
3	C-04	10	20	3225	15	8	22	18	28	78.5	8333	106	1516	TIPO 5
4	C-05	10	20	3246	15	8	22	18	28	78.5	8711	111	1545	TIPO 5
5	C-06	10	20	3076	15	8	22	18	28	78.5	11781	150	2144	TIPO 5
FIN DEL INFORME														
Realizó: <i>Jairo Hernandez Salazar</i> JAIRO HERNANDEZ SALAZAR Lab. De Hormigón														
LABORATORIO DE ESTRUCTURAS Y MATERIALES Ciudad Universitaria, Carrera 27 – Calle 9, Edificio Álvaro Beltrán Pinzón PBX: (+57 7) 634 4000 Ext. 2487-2490 – FAX: (+57 7) 632 0744, Bucaramanga, Colombia E-mail: labcivil@pu.edu.co														

Apéndice L. Análisis de Tres Diferentes Dimensiones de Ladrillos y su Peso.**Figura 14L. Análisis de ladrillos de diferentes dimensiones**

	Dimensiones ladrillo		
	opcion_1	opcion_2	opcion_3
b [cm]	24	24	20
h [cm]	12	10	10
e [cm]	6	6	8
Vol [m ³]	0,001728	0,00144	0,0016
V_total	1,728	1,44	1,6
m_ladrillo [kg]	3,454	2,878	3,198
m_1000 [kg]	3453,88	2878,23	3198,04
m_arenafina [kg]	1295,21	1079,34	1199,26
m_pellets [kg]	1295,21	1079,34	1199,26
m_cemento [kg]	863,47	719,56	799,51
m_agua [kg]	604,429	503,691	559,657

Figura 15L. Masas de diferentes materiales usados.**Tabla B.3.2-1
Masas de los materiales**

Material	Densidad (kg/m ³)	Material	Densidad (kg/m ³)
Acero	7 800	Mortero de inyección para mampostería	2 250
Agua		Mortero de pega para mampostería	2 100
Dulce	1 000	Piedra	
Marina	1 030	Caliza, mármol, cuarzo	2 700
Aluminio	2 700	Basalto, granito, gneis	2 850
Arena		Arenisca	2 200
Limpia y seca	1 440	Pizarra	2 600
Seca de río	1 700	Plomo	11 400
Baldosa cerámica	2 400	Productos bituminosos	
Bronce	8 850	Asfalto y alquitrán	1 300
Cal		Gasolina	700
Hidratada suelta	500	Grafito	2 160
Hidratada compacta	730	Parafina	900
Carbón, apilado	800	Petróleo	850
Carbón vegetal	200	Relleno de ceniza	920
Cemento pórtland, a granel	1 440	Tableros de madera aglutinada	750
Cobre	9 000	Terracota	
Concreto simple	2 300	Poros saturados	1 950
Concreto reforzado	2 400	Poros no saturados	1 150
Corcho, comprimido	250	Tierra	
Estaño	7 360	Arcilla húmeda	1 750
Grava seca	1 660	Arcilla seca	1 100
Hielo	920	Arcilla y grava seca	1 600
Hierro		Arena y grava húmeda	1 900
Fundido	7 200	Arena y grava seca apisonada	1 750
Forjado	7 700	Arena y grava seca suelta	1 600
Latón	8 430	Limo húmedo consolidado	1 550
Madera laminada	600	Limo húmedo suelto	1 250
Madera seca	450-750	Vidrio	2 600
Mampostería de concreto	2 150	Yeso en tableros para muros	800
Mampostería de ladrillo macizo	1 850	Yeso suelto	1 150
Mampostería de piedra	2 200	Zinc en láminas enrolladas	7 200

Apéndice M. *Costos de Fabricación de Ladrillos a Través de Relaves.***Figura 16M.** *Precios de los agregados en HOMECENTER.*

Homecenter		
Producto	Cantidad (Kg)	Precio (COP)
Arena de peña	40	8.200
Arena de río	40	8.800
Arena lavada	40	9.900
Gravilla	40	20.600
Gravilla mona	40	18.400
Cal	10	14.900
Cal	25	24.900
Cal Argos	10	9.950
Cemento	50	27.500

Figura 17M. *Cálculo de la densidad promedio de la mezcla.*

Volumen probeta	0,001570796	(kg/m3)
Probeta	Masa húmeda	densidad
1	3,154	2007,899
2	3,161	2012,355
3	3,186	2028,271
4	3,15	2005,352
5	3,17	2018,085
6	3,017	1920,682
	Densidad Promedio	1998,77

Figura 18M. *Costos por unidad de ladrillo fabricado con relaves.*

Ladrillo 10x20x8		
Volumen	0,0016	
Masa unidad ladrillo (Kg)	3,19804	
Masa 1000 ladrillos (Kg)	3198,04	
Agregados	Masa (Kg)	Precio (COP)
Arena fina	1199,26	296.817,92
Pellets	1199,26	146.370,21
Cemento	799,51	439.730,25
Agua	559,67	13.991
Valor total 1000 unid		896.910
Valor unidad		896,91

Apéndice N. *Catálogo para los Equipos Principales.***Tabla 1N.** *Referencias de los equipos principales.*

Equipo	Procedencia	Link
Tanque delavado	Sitio Web	https://bombas360.com/producto/tanque-hidroneumatico-membrana-210-litros-evans-eqth-210ve/?gclid=CjwKCAjws--ZBhAXEiwAv-RNL_UVbCjce7tCjzKgs03SO7Q80fpTmilSV2nam6uyS9uvakxSnHdn5hoCuFYQAvD_BwE
Filtro prensa	Sitio Web	https://www.alibaba.com/product-detail/Filtro-Prensa-Movable-Filter-Press-Machine_1600464694201.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.419e50b9ilODS5&s=p
Horno Secador	Sitio Web	https://spanish.alibaba.com/p-detail/Rotary-60632559767.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.58f2b42cV2fov5&s=p
Disco peletizador	Sitio Web	https://spanish.alibaba.com/product-detail/chicken-manure-fertilizer-making-machine-disc-fertilizer-granulator-1600156625329.html?spm=a2700.details.maylikeexp.1.6aa73befcDoImq
Trompo mezclador	Sitio Web	https://spanish.alibaba.com/p-detail/Concrete-1600372398771.html?spm=a2700.7735675.normal_offer.d_image.72c763d8TD8Uw2&s=p

Equipo	Procedencia	Link
Moldeador de ladrillos	Sitio Web	https://spanish.alibaba.com/p-detail/Automatic-1600375149334.html?spm=a2700.7735675.normal_offer.d_image.fe4a4ba52bJvTD&s=p

Apéndice O. *Catálogo para los Equipos Auxiliares.***Tabla 20.** *Referencias de los equipos auxiliares.*

Equipo	Procedencia	Link
Bomba a filtroprensa	Catálogo	https://es.slideshare.net/oscarfernandez72/veneto-catalogo2020bombas