

Estudio de caso para el aprovechamiento de relaves mineros procedentes de la concesión Campanillas, Zamora Chinchipe-Ecuador, como agregado para la elaboración de adoquines

Case study for the use of mining tailings from the Campanillas concession, Zamora Chinchipe-Ecuador, as an aggregate for the production of cobblestones

Abdón Enríquez, Paola Hermosa, Luis Collahuazo, Fausto Acosta, Cristhian Feijoo, Manuel Quezada, Danilo Ibarra¹

1 Instituto de Investigación Geológico y Energético. Quito – Ecuador. E-mail: abdon.enriquez@geoenergia.gob.ec; paola.hermosa@geoenergia.gob.ec; luis.collahuazo@geoenergia.gob.ec; fausto.acosta@geoenergia.gob.ec; cristhian.feijoo@geoenergia.gob.ec; manuel.quezada@geoenergia.gob.ec; danilo.ibarra@geoenergia.gob.ec

ISSN: 2661-6998

Fecha de recepción: 21-07-2021

Fecha de aceptación: 02-03-2022

RESUMEN

Actualmente los grandes volúmenes de relaves que se generan en la industria minera, requieren una gestión adecuada, sea para su disposición final o reaprovechamiento de acuerdo a sus características. Una mala gestión, puede ser una potencial fuente generadora de drenaje ácido, creando una serie de procesos sinérgicos, que afectan principalmente al suelo y agua, alterando sus propiedades físico-químicas, incrementando las concentraciones de metales y metaloides en estos medios, y relacionados con procesos de bioacumulación, entre otros impactos.

El propósito de esta investigación es identificar si los relaves pueden ser empleados como sustitutos de un agregado (arena), como parte de la fabricación de adoquines.

Para el desarrollo de la investigación, en primer lugar, se realizó la caracterización física, química y mineralógica de los relaves, se analizó el proceso para la fabricación de adoquines. Posteriormente, se definió el porcentaje de sustitución de arena por relave y, por último, los adoquines fabricados, fueron sometidos a ensayos de comprensión, tracción, absorción y lixiviación.

Los resultados muestran que los relaves de la mina Nory Gold de la planta Campanillas, se pueden utilizar en la fabricación de adoquines, como un sustituto de una fracción en porcentaje de la arena (20%, 30% y 40%), debido a sus características físicas y químicas. Por otro

lado, los análisis de laboratorio reflejan que los adoquines fabricados cumplen con los criterios descritos en la Norma ASTM C936 (compresión esfuerzo rotura, 55 Mpa), NTE INEN 3040, BSI. BS 6717-1 (compresión esfuerzo rotura, 49 Mpa) y BS EN 1338: 2003 (tracción indirecta, 3.6 Mpa), referentes a la calidad de estos como elementos de construcción. De acuerdo con Instituto de Cemento y Hormigón de Chile, los adoquines pueden ser utilizados hasta el tránsito de vehículos pesados a una velocidad no mayor de 60 km/h.

Palabras clave:

Relaves mineros, adoquines, resistencia a la compresión, tracción indirecta.

ABSTRACT

Currently, the large volumes of tailings generated in the mining industry either require adequate management, for final disposal or reuse according to their characteristics. Poor management can be a potential source of acid drainage, creating series of synergistic processes that mainly affect soil and water, altering their physical-chemical properties, increasing the concentrations of metals and metalloids, and related to bioaccumulation processes, among other impacts.

The purpose of this research is to identify if tailings can be used as a substitute for an aggregate (sand), as part of the manufacture of pavers.

For the development of the research, in the first place, the physical, chemical and mineralogical characterization of the tailings was carried out, the process for the manufacture of pavers was analyzed. Subsequently, the percentage of substitution of sand for tailings was defined, and finally, the manufactured pavers were subjected to compression, traction, absorption and leaching tests.

The results show that the Nory Gold mine of the Campanillas plant's tailings can be used in the manufacture of pavers, as a substitute for a fraction in percentage of the sand (20%, 30% and 40%), due to its physical and chemical characteristics. On the other hand, the laboratory analyzes show that the manufactured pavers meet the criteria described in the ASTM C936 standard (compression stress break, 55 Mpa), NTE INEN 3040, BSI. BS 6717-1 (compression stress break, 49 Mpa) and BS EN 1338: 2003 (indirect traction, 3.6 Mpa), referring to the quality of these as construction elements. According to the Chilean Institute of Cement and Concrete, pavers can be used up to the traffic of heavy vehicles at a speed of no more than 60 km / h.

Keywords:

Mining tailings, pavers, compression resistance, and indirect traction.

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de la actividad minera, es la explotación de recursos minerales, los cuales se encuentran distribuidos en la corteza terrestre en contenidos muy bajos, para extraer estos recursos, se requiere de una serie de métodos de explotación y beneficio, que permitan recuperar los minerales valiosos y no valiosos [1].

Posterior a la recuperación del mineral de interés económico, se obtienen como subproductos arenas residuales, llamados relaves mineros, los cuales son dispuestos y almacenados en embalses (piscinas), para su disposición final y confinamiento [2].

La generación de grandes volúmenes de relaves como residuos mineros, y la búsqueda de alternativas para su gestión técnica, ambiental y económica, incentiva a la investigación de posibles usos de este material como materia prima [3] [4]; es así como, se planteó el uso de relaves provenientes de la concesión minera Campanillas, con el objetivo de valorizarlos, caracterizarlos y utilizarlos como un sustituto de un porcentaje de la arena dentro del proceso de elaboración de adoquines.

1.1. Ubicación del Área

En la provincia de Zamora Chinchipe, en el cantón Zamora, parroquia de San Carlos de las Minas, sector Campanillas, se ubica La Concesión Minera Campanillas, en la cual se encuentra la mina Nory Gold y la planta de beneficio.



Figura 1. Ubicación geográfica de la concesión minera Campanillas

1.2. Geología

El distrito minero de Nambija involucra el complejo batolítico de Zamora de edad jurásica y una faja de rumbo N-S de rocas volcano-sedimentarias y volcánicas, parcialmente skarnificadas, asignadas a la Unidad Piuntza datada con fósiles de edad triásica [32]. La secuencia estratificada constituye heterogéneo colgajo (roof pendant) preservado como una faja en la parte alta de la cordillera de Nanguipa o Nambija. Rocas volcánicas y subvolcánicas porfídicas de edad cretácica se reportan adicionalmente en la zona [33].

Estas rocas se encuentran variablemente skarnificadas, pero en general afectadas por diferentes tipos de alteración hidrotermal. Algunas secuencias de lutitas negras que ocurren en este distrito, han sido asignadas a la Unidad Isimanchi del Paleozoico [32] pero más probablemente representan las facies sedimentarias de la Formación Santiago del Liásico [34] extensamente expuestas hacia el norte en la cuenca del río Santiago y que en la zona de estudio se interdigitan con las rocas volcánicas, en un escenario similar al reportado por Tschopp en la zona de la localidad tipo.

La mineralización está conformada por clorita, epidotas, calcitas, calcopiritas, piritas, esfalerita y como metales de interés económico, se encuentran el oro, cobre y zinc [6].

1.3. Generación de Relave

De acuerdo con los informes de producción, la planta de beneficio Campanillas tiene una capacidad instalada de 80 ton/día, sin embargo, su procesamiento real es de 20

a 30 ton/día, con una estimación de generación de relave de aproximadamente 19 ton/día (Figura 2).



Figura 2. Planta de beneficio Campanillas

En el proceso productivo, el mineral atraviesa diferentes fases de reducción de tamaño: trituración primaria y secundaria de material, molienda y remolienda; posteriormente, el material ingresa al circuito de procesos de gravimetría, obteniendo como productos: concentrados y barras doré (Figura 3). Adicionalmente, se genera como residuo del proceso colas de relave, las cuales son conducidas a través de tuberías y almacenadas en el embalse o depósito de relaves principal, el cual tiene una capacidad total aproximada de 12 250 m³.

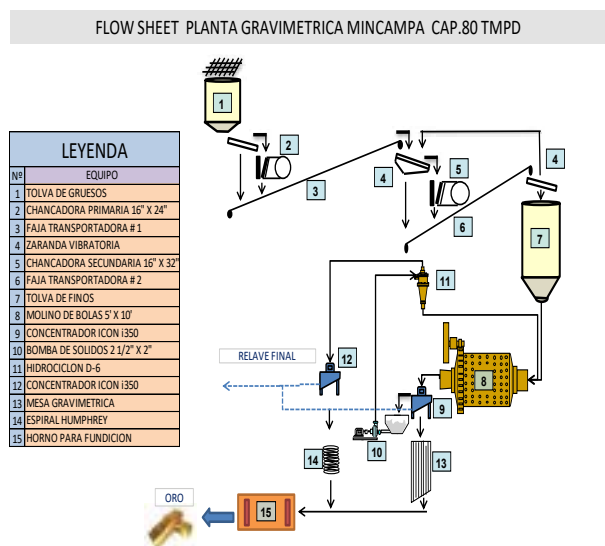


Figura 3. Diagrama de flujo del procesamiento de mineral en la concesión minera Campanillas

Fuente: Modificado Cesar Sinche, 2019

1.4. Aprovechamiento de relaves en la elaboración de materiales de construcción

Los residuos mineros masivos, tal como su nombre lo indica, constituyen residuos sólidos que se generan en grandes volúmenes. De acuerdo con Jacques Wiertz

(2012), en Chile por cada tonelada de cobre producido, se generan entre 300 y 400 toneladas de residuos mineros, produciendo más de un millón de toneladas de relaves y más de dos millones de toneladas estéril al día.

La reutilización de estos residuos mineros es altamente incentivada por la cantidad de su generación y los costos económicos y ambientales asociados a su manejo. Además, de estos residuos puede ser posible extraer un contenido significativo de minerales crudos (críticos), particularmente de residuos de minas antiguas que han sido explotados por tecnologías antiguas [8].

La incorporación de este tipo de residuos para producir productos de construcción puede convertirse en un factor clave para un sector de la construcción sostenible que se enfrenta a la sobreexplotación de recursos primarios, al tiempo que contribuye para proyectos de investigación, así como para una adecuada gestión y reutilización de este tipo de residuos [8][9].

2. METODOLOGÍA.

2.1. Selección del depósito de relave

El depósito de relave seleccionado se encuentra ubicado dentro de la Concesión Campanillas, para su selección se consideró:

- El interés de participación del concesionario minero.
- Facilidad de ingreso a la concesión y al depósito de relave para la toma de muestras.
- Existencia de relave como subproducto de un proceso de recuperación gravimétrica.
- Homogeneidad de relave procedente de un solo tipo de proceso.

2.2. Muestreo del relave

Las muestras de relave empleadas para la presente investigación fueron tomadas del depósito de relave principal (Figura 4).

2.2.1. Toma de muestras

Se aplicó un muestreo sistemático por rejilla rectangular, con la finalidad de reducir la variabilidad de las muestras, en función de la forma del embalse [10].

Para la extracción de muestras se empleó una excavadora manual, aplicando un procedimiento similar a la que se emplea para la toma de muestras en geoquímica de suelos, para lo cual se retiró y descartó el material hasta una profundidad de 10 cm, y a partir de esa profundidad se tomaron las muestras hasta llegar a una profundidad de 50 cm.

Para que el muestreo sea representativo se identificó, cinco puntos de toda la superficie del depósito de relaves, recolectando, cinco muestras de 40 kg

aproximadamente, las mismas que fueron codificadas y almacenadas para su uso y análisis posterior [11].



Figura 4. Depósito de relaves de la concesión minera Campanillas

2.2.2. Homogeneización de la muestra

Posterior a la recolección de las muestras, estas fueron preparadas para sus respectivos análisis, así como para el uso en la elaboración de los adoquines.

Para la homogeneización de las muestras, en primer lugar, fueron secadas a temperatura ambiente, y colocadas sobre una superficie impermeable; en segundo lugar, se realizaron diez cuarteos y mezcla, con el fin de obtener un material homogéneo y representativo.

Con el objetivo de mejorar las características de la muestra, se tamizó el relave para eliminar sólidos voluminosos y obtener una granulometría homogénea con una malla #45 (355 μm).

2.3. Caracterización del relave

2.3.1. Densidad real, aparente y pH

La densidad aparente (d_a) fue determinada utilizando una probeta graduada y se tomó el peso (m) de un volumen conocido (V). La densidad aparente se calculó con la Ec. 1.

$$d_a = \frac{m}{V} \quad \text{Ec. 1}$$

La densidad real (d_r) fue determinada mediante la técnica del picnómetro y con el uso de la Ec.2.

$$d_r = \frac{M_1}{M_1 + M_2 - M_3} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde;

M_1 = peso del sólido,

M_2 = peso del picnómetro lleno de agua,

M_3 = peso del picnómetro con agua y muestra sólida.

El pH del relave se determinó mediante la medición del pH de una pulpa de relave al 50 % p/p de sólidos, con el uso de un pHmetro de resolución $\pm 0,01$.

2.3.2. Análisis granulométrico

Para el análisis granulométrico, se utilizaron mallas de acuerdo a la norma NTE INEN 154. Tamices de ensayo dimensiones nominales de aberturas: #18 (1000 μm), #35(500 μm), #45(355 μm), #60(250 μm), #80(180 μm), #120(125 μm), #170(90 μm), #230(63 μm), #325(45 μm) y #400 (38 μm), con el fin de determinar los diferentes tamaños de partícula del material, de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos - SUCS (Unified Soil Classification System (USCS)), que serán utilizadas en la fabricación de adoquines.

2.3.3. Fluorescencia de rayos x

La muestra de relave fue analizada por fluorescencia de rayos X. El método utilizado para la preparación de la muestra consistió en la determinación de las pérdidas por calcinación a 1000 $^{\circ}\text{C}$ por 2 horas, y posteriormente fundida con tetraborato de litio, para formar una perla fundida, la cual fue leída a través del espectrómetro de Fluorescencia de Rayos X (S8 Tiger marca Bruker) que permite identificar la concentración de los elementos mayoritarios presentes en forma de óxidos.

2.3.4. Difracción de rayos X

La muestra de relave fue analizada por Difracción de Rayos X (Bruker AXS modelo D8 Advance) para identificar los componentes y determinar las fases mineralógicas del material, en un difractor.

2.3.5. Espectroscopía de Plasma ICP-OES

La muestra de relave fue analizada por espectroscopia de plasma ICP-OES (PerkinElmer Optima 8300). La muestra fue tratada por digestión de 4 ácidos: Clorhídrico, Nítrico, Perclórico y Fluorhídrico para la disolución de los metales, mismos que fueron determinados en un espectrómetro de emisión atómica de plasma acoplado inductivamente.

2.3.6. Evaluación de la Toxicidad (Ensayo TCLP)

Para evaluar la toxicidad se aplicó la técnica de TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure). Se midió 200 ml de agua desionizada, se llevó a agitación magnética y se adiciono ácido acético al 99% hasta regular el pH de la solución a un valor de 4,0. Posteriormente, se pesó 5 g de relave y de adoquines pulverizados que fueron añadidos a la solución para dejarlos en agitación por 24 horas; los ensayos se realizaron por duplicado por cada muestra. Pasadas las 24 h se dejó de agitar la mezcla y se centrifugaron aproximadamente 50 ml del líquido. De los líquidos centrifugados se analizaron los metales mencionados

por espectrometría de emisión con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-OES) [12].

2.4. Elaboración de Adoquines

Para la elaboración de los adoquines, se realizó la sustitución de arena por relave en diferentes proporciones; el producto final fue sometido a pruebas físico-mecánicas, con el fin de determinar si los adoquines cumplen con los parámetros de calidad para su uso establecidos en la norma NTE INEN 3040 y ASTM C936.



Figura 5. Dimensiones de los adoquines fabricados

Considerando las necesidades constructivas identificadas en el área de estudio, se seleccionó el diseño y elaboración del sistema de “adoquín estándar” (Figura 5) o ladrillo tipo piedra que se usa especialmente para piso pues en conjunto conforma una superficie continua, tanto para el uso peatonal como para transporte ligero [13].

Para la elaboración de los adoquines, se requiere una composición estándar de cemento, ripio, arena y agua; sin embargo, para el desarrollo de la investigación, se realizó una variable con respecto a la composición, reemplazando parcialmente el porcentaje de arena por relaves mineros, de acuerdo con la descripción la Tabla 1 [14] [15].

Tabla 1. Dosificación con reemplazo para fabricación de 12 adoquines.

Material	Adoquín original	Adoquín con porcentaje de relave		
		40%	30%	20%
	kg	kg	kg	kg
Ripio	14,76	14,76	14,76	14,76
Cemento	12,50	12,50	12,50	12,50
Arena	21,63	12,98	15,14	17,11
Relave	0,00	8,65	6,49	4,32
Agua (L)	5,00	4,00	4,00	4,00

La fabricación de adoquines inicia al mezclar arena (granulometría entre 2,00 mm a 0,25 mm) con relave y cemento portland puzolánico tipo IP, posteriormente, se agrega ripio de ½ pulgada (Figura 6). Una vez mezclado todos los componentes, se colocan en equipos

mezcladores donde se realiza la combinación con adición controlada de 4 de agua de acuerdo al porcentaje de relave añadido, por 5 minutos.



Figura 6. Preparación de la mezcla para la fabricación de adoquines

La mezcla homogénea se coloca en moldes, para su ingreso a una prensa de gatos hidráulicos, por un período promedio de 24 segundos, obteniendo como resultado 12 adoquines de forma rectangular por parada. (Figura 7).



Figura 7. Fabricación de adoquines en prensa de gatos hidráulicos

A continuación, los adoquines son colocados en tableros, al día siguiente son embalados en plástico para conservar su humedad y dar inicio al período de fraguado (Figura 8).



Figura 8. Fraguado de los adoquines

Una vez fabricados los adoquines, estos se colocaron sobre paneles, a los cuales se les hidrataron con agua, posteriormente para preservar su humedad, se envolvió en polietileno de alta densidad, durante el tiempo de fraguado, correspondiente a 28 días, como lo establece la norma “NTE INEN 1855-2, para alcanzar la resistencia a la compresión y tracción requeridas.

De igual forma, los adoquines cumplieron con un espesor de 8 cm, con caras paralelas, textura fina, porosa y áspera, tal como lo solicita la norma NTE INEN 3040, que indica las características de los adoquines.

2.5. Caracterización de Adoquines

La determinación de las características de los adoquines se realizó con la aplicación de pruebas mecánicas como el ensayo de resistencia a la compresión, ensayo de tracción indirecta y absorción total de agua [16].

De los adoquines elaborados con el relave, se tomaron 36 unidades para realizar ensayos absorción, compresión y tracción indirecta. Los ensayos mecánicos fueron realizados en el laboratorio LEMSUR de la Escuela Politécnica Nacional (EPN) y la medición de dimensiones y densidad en por el laboratorio analítico del Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE).

2.6. Análisis de Resultados

Los resultados fueron comparados con lo establecido en las siguientes normas:

- NTE INEN 3040 2016-04, Adoquines de hormigón. Requisitos y métodos de ensayo;
- ASTM C936, Standard specification for solid concrete interlocking paving units. Masonry test methods and specifications for the building industry, 4th ed., American Society of Testing and Materials, 2001;
- BSI. BS 6717-1:1993 Precast, unreinforced concrete paving blocks - requirements and test methods y BS EN 1338: 2003, Concrete Paving Blocks – Requirements and Test Methods”, The British Standards (BSI) (BSI, 1993) and The European Standard (CEN).

3. RESULTADOS

3.1. Caracterización del Relave

3.1.1. Densidad aparente, real y pH del relave minero

Los resultados de la densidad real, densidad aparente y pH se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Densidad aparente, real y pH del relave minero

Parámetro	Valor (g/cm ³)
Densidad aparente	1,63 ± 0,02
Densidad real	3,10 ± 0,19
pH	6,89 ± 0,03

Con base en la mayoría de los compuestos encontrados por difracción de rayos X que tienen valores de densidad similares en un rango de 2,1-2,7 g/cm³, posiblemente la presencia de la andradita (3,9 g/cm³) incrementa la densidad real del relave. La densidad aparente de relave se asemeja a la de un suelo mineral. Además, el relave presenta características de pH, con tendencias a un medio básico.

3.1.2. Análisis granulométrico

El relave utilizado presenta características granulométricas resultantes sobre la malla #35 (500 μm), correspondiente al 0,9% como arenas gruesas, posterior se tomó desde la malla #45 (355 μm) a la #230 (63 μm) presenta un 50,4% del material estudiado, lo que corresponde a una arena fina, el material que pasa la malla #230 (63 μm) corresponde a limos y arcillas. Por lo que el material que se retiene sobre la malla #230 es mayor al 50%, se considera al relave como arenas con una matriz limo-arenosa debido a la cantidad considerable de finos.

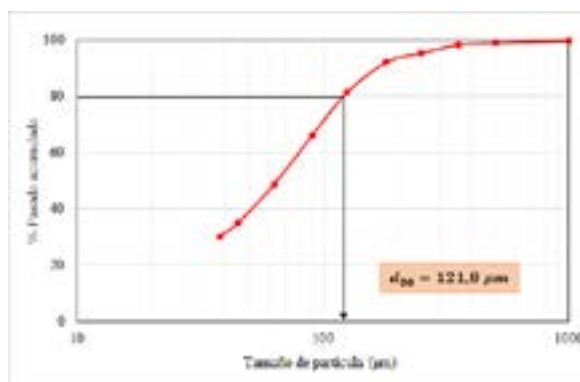


Figura 9. Análisis granulométrico del relave

De acuerdo con los resultados, el relave presenta un diámetro de partícula (d_{80}) de 121,81 μm.

3.1.3. Fluorescencia de rayos X

Los resultados obtenidos de elementos mayoritarios por fluorescencia de rayos X se muestran en la Tabla 5, indican que el relave tiene un elevado contenido de óxido de calcio (11,62% CaO). Al ser un material proveniente de mina, los elementos mayoritarios son el silicio (58,47% SiO₂) y el aluminio (Al₂O₃). La presencia de hierro puede deberse a que el mineral original presentó sulfuros (pirita, calcopirita) en menor proporción.

Adicional, se registra pérdidas por calcinación con un valor de 3,67%, esto se atribuye a la presencia de carbonato de calcio (calcita), que al ser sometida a altas temperaturas se descompone en óxido de calcio (CaO) y dióxido de carbono (CO₂).

Tabla 3. Determinación de elementos mayoritarios por XRF

Elementos mayores	Composición (% p/p)
SiO ₂	58,47

CaO	11,62
Al ₂ O ₃	9,40
Fe ₂ O ₃	8,75
K ₂ O	2,23
MgO	1,20
Na ₂ O	0,46
TiO ₂	0,46
SO ₃	0,44
P ₂ O ₅	0,15
Mn ₂ O ₃	> 0,80
LOI	3,67

3.1.4. Difracción de rayos X

Del análisis de difracción de rayos X mostrado en la Tabla 3, el mineral con mayor composición es cuarzo, esto se puede asociar debido a que el mineral original proviene de un afloramiento “Skarn”.

Tabla 4. Determinación de minerales por difracción de rayos X

Minerales	Compuestos	Composición (%)
Cuarzo	SiO ₂	33,60
Grupo plagioclasa (albita-anortita)	NaAlSi ₃ O ₈ - Ca(Al ₂ Si ₂ O ₈)	17,70
Grupo k-feldespato (ortoclasa, microclina, sanidina)	KAlSi ₃ O ₈	16,80
Andradita	Ca ₃ Fe ₂ +2(SiO ₄) ₃	14,90
Calcita	Ca(CO ₃)	7,50
Grupo clorita	Mg _{3,75} Fe ₂ +1.25Si ₃ Al ₂ O ₁₀ (OH) ₈	5,90
Ilita	K _{0.6} (H ₃ O) _{0.4} Al _{1.3} Mg _{0.3} Fe ₂ +0.1Si _{3.5} O ₁₀ (OH) ₂ ·(H ₂ O)	3,60

Los grupos plagioclasa y andradita (perteneciente al grupo del granate) son comunes de encontrar en los depósitos tipo Skarn.

3.1.5. Espectroscopía de Plasma ICP-OES

Del análisis de elementos químicos determinados por ICP-OES se obtuvieron como resultado la presencia de elementos menores principales: Ca>Fe>Al>K>Mg>Mn y como elementos secundarios: Ti >Ba>Zn>Cu>V>Pb, como se observa en la Tabla 4.

Tabla 5. Resultados de la determinación de elementos menores por ICP-OES

Elemento	Valor (mg/Kg)	Elemento	Valor (mg/Kg)
Al	44000,00	Mg	8523,18
Ag	<12,50	Mn	5093,71
As	<30,00	Mo	<10,00
Ba	395,84	Ni	<10,00
Be	<6,25	Pb	33,33
Ca	76274,85	Sb	<20,00
Cd	<12,50	Se	20,00
Co	<10,00	Sn	<10,00
Cr	<11,00	Sr	30,24
Cu	68,78	Ti	1183,00
Fe	53643,00	Tl	<8,50
K	15652,00	V	44,44
		Zn	255,20

Confirma que los elementos se encuentran asociados al tipo de formación presente en el área, tipo skarn, el cual se encuentra asociado a minerales como cuarzo, grupo plagioclasa (albita-anortita), grupo k-feldespato (ortoclasa, microclina, sanidina).

3.2. Caracterización de Adoquines

3.2.1. Características Físicas

Los adoquines fabricados con una variación parcial de arena por el relave minero no presentan fisuras o descamaciones, cumplen con el espesor para la circulación de transporte, así como la variación en las dimensiones en referencia a las normas ASTM C936 y NTE INEN 3040, y presentan las características físicas que se observan en la Tabla 6.

Tabla 6. Características físicas de los adoquines

Característica	Unidad	Norma ASTM C936	Adoquín original	Adoquín con porcentaje de relave		
				40%	30%	20%
Peso	g		3640,0	3396,50	3454,50	3474,0
Espesor	mm	>60	76	76,7	76	79
Área	cm ²	-	200	204,42	205,3	202,93
Volumen	cm ³	-	1600	1579,49	1588,64	1592,27
Densidad	g/cm ³	-	2,28	2,19	2,18	2,18

Cabe mencionar que, de acuerdo a las normas ASTM C936 y NTE INEN 3040, puede existir una variación de 3 mm en las dimensiones, por lo que los adoquines cumplen con las especificaciones geométricas. Con respecto al peso, los adoquines formulados con relaves presentan menor peso con respecto a los adoquines originales, y una mínima variación en el volumen y en la densidad.

Con relación a la norma ASTM C936, en la cual se indica que las dimensiones del espesor de los adoquines deben ser mínimo 60 mm; los adoquines resultantes de la investigación, con las tres variaciones en la cantidad de relaves, presentan espesores mínimos de 75 mm, con lo que se puede deducir que todos cumplen con la norma de fabricación con respecto al espesor (Tabla 6).

3.2.2. Características Mecánicas

Para la identificación de características mecánicas de los adoquines, éstos fueron sometidos a pruebas de compresión, tracción indirecta y absorción, obteniendo los resultados que se observan en la Tabla 7.

Tabla 7. Características mecánicas de los adoquines

Adoquín % relave	Compresión Esfuerzo rotura [M'Pa]	Tracción indirecta [MPa]	Absorción total de agua %
		55,00*	
	-	>2,90**	≤6,00**

	49.00***	-	-
	-	3.60****	6.00****
0 (original)	53.00	2.00	6.64
20	59.53	3.93	8.85
30	50.93	3.47	7.87
40	54.10	3.63	6.57

*Norma ASTM C936, **NTE INEN 3040, ***BSI. BS 6717-1
****BS EN 1338: 2003

De los resultados obtenidos se identifican valores de compresión- esfuerzo de rotura mayor a 50 MPa, lo que indica que de acuerdo con la norma ASTM, los adoquines cumplen con el parámetro establecido y pueden ser usados para tráfico pesado y para usos ornamentales o de tráfico peatonal o liviano.

El ensayo de compresión se realizó en grupos de 4 adoquines para cada % de adición de relave, registrando resultados promedio sobre el valor establecido en las normas.

Como se observa en la Figura 10, los adoquines que presentan los porcentajes de 20, 30 y 40 % de relave en su composición, se encuentran sobre el valor establecido por la norma ASTM C936/C936M y por la norma BSI. BS 6717-1, por lo que presentan una mayor resistencia a la compresión.

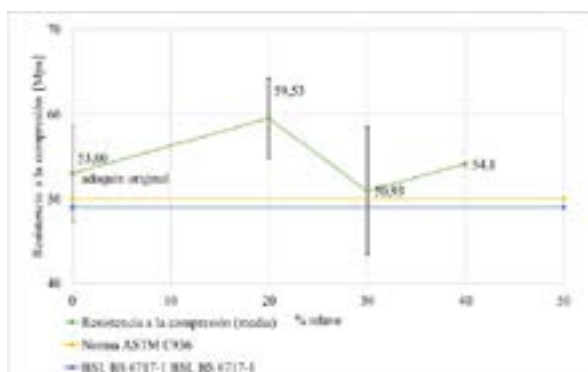


Figura 10. Resistencias a la compresión de adoquines

El ensayo de resistencia a la rotura por tracción indirecta, registra resultados mayores a 3 MPa en los adoquines con 20, 30 y 40% de relave y de 2 MPa en el adocuin original. Es importante mencionar que esta característica no es considerada en las normas ASTM.

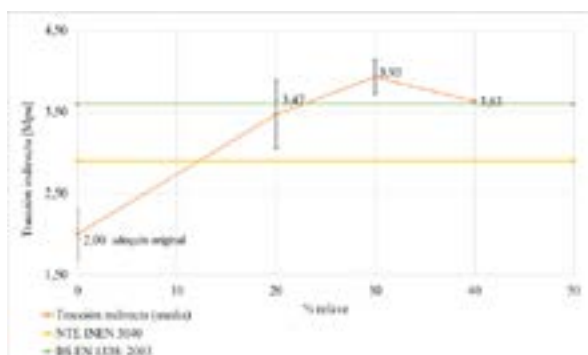


Figura 11. Valores de tracción indirecta de los adoquines

En la Figura 11, se puede observar que con respecto a la norma NTE INEN 3040, las muestras individuales no pueden registrar un valor menor a 2,9 MPa, criterio que

se cumple en todos los adoquines elaborados con relave, además si se compara con la norma BSI. BS 6717-1, en la que se describe la resistencia a la compresión de los bloques de hormigón para pavimentar debe cumplir con el mínimo de 3,6 MPa, valor que no se cumple en los adoquines con un 20% de relave.

En el ensayo de absorción total de agua, la norma BS EN 1338: 2003 y la norma NTE INEN 3040 establecen que el porcentaje de absorción de las muestras debe ser inferior o igual al 6% y en las ASTM C936 el valor puede ser hasta 7%.

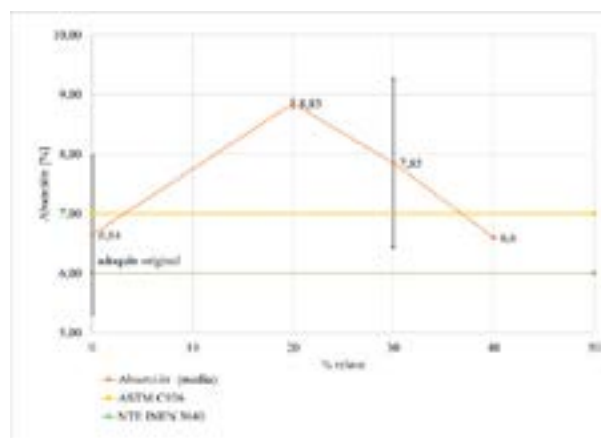


Figura 12. Porcentajes de Absorción total de agua

Como se observa en la Figura 12, los valores promedios de porcentaje de absorción en todos los adoquines no cumplen con las normas BS EN 1338: 2003 y NTE INEN, sin embargo, para el caso de los adoquines original y con 40% de relave, el porcentaje de absorción se encuentra dentro de lo establecido en la norma ASTM C936.

3.2.3. Determinación de metales en TCLP

Los parámetros para definir al relave y adoquines elaborados con relaves como material peligros se determinaron con base a límites permisibles de que se presentan en la legislación ambiental (TULSMA). En la Tabla 8 se muestran los resultados del test TCLP realizado al relave y adoquines, así también se indica los límites permisibles por el TULSMA, Tabla 2: Criterios de Calidad Admisibles para la Preservación de la Vida Acuática y Silvestre en Aguas Dulces, Marinas y de Estuarios [17]

Tabla 8. Concentración máxima permitida en lixiviados

Elemento	Concentración en el lixiviado (mg/L)			Concentración TULSMA (mg/L)	*Concentración máxima permitida EPA (mg/L)
	20%	30%	40%		
Ag	0,01	0,07	0,07	0,01	5,0
As	0,06	0,05	0,10	0,05	5,0
Ba	0,14	0,11	0,19	1,00	100,00
Cd	0,004	0,004	0,004	0,01	1,0
Cu	-0,25	-0,25	-0,25	0,005	-
Cr	0,21	0,31	0,21	0,032	5,0
Pb	0,001	0,001	0,001	0,001	5,0
Se	-0,11	-0,11	-0,10	0,001	1,0
Mg	-0,45	-0,44	-0,45	0,1	-
Mn	-0,35	-0,35	-0,35	-	-
Zn	-1,21	-1,21	-1,21	0,03	-

Como se observa, los metales analizados se encuentran por debajo de las concentraciones máximas permitida por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés); además, en comparación con el TULSMA, Tabla 2, el As sobrepasa en un 10 % los límites establecidos, sin embargo, estas concentraciones se darían a través de condiciones controladas de un medio ácido ($\text{pH} < 4$).

4. CONCLUSIONES

Se puede concluir que los relaves producto del procesamiento con método gravimétrico del mineral de la mina Nory Gold de la planta Campanillas, pueden ser utilizados en la fabricación de adoquines, como un sustituto de una fracción en porcentaje de la arena, los parámetros físicos y mecánicos y los análisis de laboratorio reflejan que cumplen con la mayoría de parámetros indicados en las normas Norma ASTM C936, NTE INEN 3040, BSI. BS 6717-1 y BS EN 1338: 2003, referentes a la calidad de los adoquines como elementos de construcción.

Los resultados indican que las concentraciones de los metales pesados lixiviados son bajas en comparación con lo establecido por la legislación ambiental, por lo tanto, se considera que los adoquines elaborados a partir de relaves no son tóxicos y pueden ser empleados del mismo modo que los adoquines tradicionales.

De acuerdo a las normas, los adoquines pueden ser utilizados hasta para el tránsito de vehículos pesados, a una velocidad no mayor de 60 km/h, siendo el adoquín con el 40 % de relave el que cumple con las normas antes mencionadas.

De acuerdo con los resultados obtenidos del porcentaje de absorción total de agua, disminuye con el aumento del porcentaje de relave, siendo el adoquín con 40% de relave que presenta adsorción similar al adoquín original.

La investigación desarrollada demuestra que se puede utilizar un material considerado como residuos de procesamiento de mineral como materia prima para la elaboración de adoquines, y así tener beneficios como minimizar la contaminación por la acumulación de relaves, disminuir los espacios destinados para el depósito de relave, incentivar una actividad productiva diferente dentro del área de estudio, impulsar la investigación en el entorno de la actividad minera.

5. RECOMENDACIONES

Dentro de la formulación del adoquín y el uso del relave como sustituto de arena, se sugiere aumentar el porcentaje de relave en reemplazo de arenas, considerando otros usos que demanden menores esfuerzos.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se recomienda escalar la investigación y generar una cantidad mayor de adoquines, los cuales sean utilizados o dispuestos en vías de circulación peatonal.

Se recomienda desarrollar líneas de investigación las cuales analicen otros posibles usos de los relaves, considerando que, a nivel de Ecuador, se ha iniciado minas de gran escala, las cuales generan grandes volúmenes de estos residuos mineros.

En próximas investigaciones se sugiere considerar los costos de producción, con el fin de fabricar los adoquines a escala industrial.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Sr. Ausberto Moisés Zúñiga Salinas, titular de la Planta de Beneficio Campanilla, al Sr. Ing. Napoleón Sarmiento, técnico de la Planta de Beneficio Campanilla por permitir desarrollar la investigación. Al Sr. Ing. José Quinatoa, Gerente ROCADA, por el auspicio de esta investigación, y a todo el personal técnico involucrado en el proyecto.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Instituto de Cemento y Hormigón de Chile, Manual de Diseño de Pavimentos de Adoquines de Hormigón, Santiago: www.ich.cl, 2013.
- [2] American Concrete Institute, Guía para la durabilidad del hormigón ACI 201.2R-01, 2001.
- [3] T. Volke, J. Velasco y D. de la Rosa, Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación, México D.F.: Instituto Nacional de Ecología, 2005.
- [4] E. Salazar, «Principales Hitos en la minería de Ecuador,» Ministerio de Energía y Minas - Ecuador, Quito, 2012.
- [5] A. Yupari, «Informe “Pasivos Ambientales Mineros en Sudamérica”,» 2005.
- [6] A. Romero y S. Flores, «Reuso de relaves mineros como insumo para la elaboración de agregados de construcción para fabricar ladrillos y baldosas,» *Industrial Data*, pp. 75 - 82, 2010.
- [7] ASTM, *ASTM C936/C936M-20*, American Society for Testing and Materials, 2020.
- [8] INEN, *INEN 1485*, Quito: Instituto Ecuatoriano de Normalización, 1986.
- [9] NTC INEN, *NTC INEN 1855-2*, Quito: Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2015.
- [10] NTE INEN, *NTE INEN 3040*, Quito: Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2016.
- [11] BSI, *BSI*, British Standard Institution, 1993.

- [12] SERNAGEOMIN, *Guía metodológica para la estabilización química de faenas e instalaciones mineras*, Santiago: Ministerio de minería de Chile, 2015.
- [13] Ministerio del Ambiente del Perú, *Guía para el muestreo de suelos: estándares de calidad ambiental (ECA) para suelo*, Ministerio del Ambiente del Perú, 2014.
- [14] J. Velazco, *Proyecto Minero "NORY GOLD". CÓDIGO 501412. Zamora, Ecuador*, Compañía Minera Campanillas Mincampa S.A. 2019.
- [15] A. Zúñiga, *Informe de Actividades de la Planta de Beneficio CAMPANILLAS, código 592138. Zamora, Ecuador*, Compañía Minera Campanillas Mincampa S.A, 2019.
- [16] I. Araceana, T. Triviño y M. Luque, *Manual de uso público. Técnicas de perforación, muestreo y caracterización para la recuperación de elementos de valor desde relaves.*, Santiago: Gobierno de Chile, 2019.
- [17] Perkin Elmer Instruments, *Determination of metals in TCLP extracts using RCRA ICP-OES METHOD 6010*, Perkin Elmer Instruments, 2020.
- [18] F. L. C. I. D. P. García Q. Soriano S., «Comparación de Ensayos De Lixiviación Estáticos de Elementos Tóxicos en Residuos Mineros,» *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, vol. 14, pp. 109-117, 2015.
- [19] M. J. T. J. M. R. Martínez C., *Evaluation of the toxicity characteristics of two industrial wastes*, Colombia: Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Facultad de Minas, 2014.
- [20] C. G. B. H. G. V. L. & A. L. M. M. Cedeño, «Efecto de la Sustitución de Agregado Fino por Ceniza Proveniente del Proceso de Incineración en Bruto de Residuos Sólidos Industriales en la Elaboración de Hormigón de Baja Resistencia,» *Revista Politécnica*, pp. 86-88, 2015.
- [21] P. J. & R. K. A. Mercado, «Influencia de los porcentajes de los relaves mineros en la resistencia a la compresión en bloques de concreto ensamblables, Trujillo 2019 (Tesis de licenciatura),» *Repositorio de la Universidad Privada del Norte*, 2020.
- [22] R. Di Marco, «Diseño y elaboración de un sistema de adoquines de bajo costo y material reciclado para construcciones en núcleos rurales,» *Revista ESAICA*, vol. 1, pp. 30-38, 2015.
- [23] A. G. G. R. Roy S., «Use gold mill tailings in making bricks: A feasibility study,» *Revista Waste Management and research*, pp. 475-482, 2007.
- [24] P. A., «Trabajo de graduación "Correlación entre las propiedades mecánicas de los adoquines ecológicos fabricados con agregados reciclados y adoquines convencionales",» *Universidad Central del Ecuador*, 2017.
- [25] E. Salazar, «Principales hitos en la minería de Ecuador,» *Ministerio de Energía y Minas*, 2012.
- [26] A. Yupari, «Pasivos ambientales mineros en Sudamérica,» 2005.
- [27] A. Romero y S. Flores, «Reuso de relaves mineros como insumo para la elaboración de agregados de construcción para fabricar ladrillos y baldosas,» *Industrial Data*, pp. 75-82, 2010.
- [28] S. M. Arias Torres, J. D. Córdova Castro y M. A. Gómez Botero, *Alternativas de aprovechamiento de residuos de la industria minera de El Bajo Cauca Antioqueño en el sector de la construcción*, Universidad EIA, Envigado, Colombia, 2021.
- [29] J. Almeida, A. B. Ribeiro, A. Santos Silva y P. Faria, «Overview of mining residues incorporation in construction materials and barriers for full-scale application,» *Journal of Building Engineering*, 2020.
- [30] D. M. R.O., «Diseño y elaboración de un sistema de adoquines de bajo costo y material reciclado para construcciones en núcleos rurales,» *ESAICA*, vol. 1, pp. 30-38, 2015.
- [31] T. Volke, J. Velasco y De la Rosa, «Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación,» *Instituto Nacional de Ecología*, 2005.