

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ciencias Agropecuarias

Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental

APROVECHAMIENTO DE RELAVES MINEROS DE UNA
MINA POLIMETÁLICA COMO INSUMO PARA
LA ELABORACIÓN DE ADOQUINES
DE CONCRETO, TACNA

TESIS

Presentada por:

Bach. Andrea Pamela Ramos Medina

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO AMBIENTAL

TACNA - PERÚ

2024

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ciencias Agropecuarias

Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental

TESIS

**APROVECHAMIENTO DE RELAVES MINEROS DE UNA
MINA POLIMETÁLICA COMO INSUMO PARA
LA ELABORACIÓN DE ADOQUINES
DE CONCRETO, TACNA**

SUSTENTADA Y APROBADA EL 12 DE AGOSTO DEL 2024, SIENDO EL
JURADO CALIFICADOR:

PRESIDENTE:

.....
Dr. Efrén Eugenio Chaparro Montoya

SECRETARIO:

.....
Dr. Edgar Chaparro Aguilar

VOCAL:

.....
MSc. Juan Chura Paucar

ASESOR:

.....
Dr. Edgar Faustino Taya Osorio

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo **Dr. Edgar Faustino Taya Osorio** en mi condición de asesor acreditado por la Resolución de Facultad N° 7124-2022-FCAG de la tesis titulada: **APROVECHAMIENTO DE RELAVES MINEROS DE UNA MINA POLIMETÁLICA COMO INSUMO PARA LA ELABORACIÓN DE ADOQUINES DE CONCRETO, TACNA** informe presentado por la **Bachiller Andrea Pamela Ramos Medina** para optar el título profesional de Ingeniero Ambiental, habiendo cumplido con lo establecido en el reglamento de originalidad y de similitud de trabajos de investigación y producción intelectual, considerando que según la revisión, evaluación y análisis realizado a través del Software de similitud textual Turnitin cuenta con el nivel de similitud permitido cuyo porcentaje es 9 %. Por lo que **CERTIFICO LA SIMILARIDAD** de la tesis y está de acuerdo al nivel PERMITIDO, para continuar con los trámites correspondientes y para su publicación en el repositorio Institucional.

Se emite el presente certificado con fines de continuar con los trámites respectivos para su obtención del título.



DNI: 00426060
Dr. Edgar Faustino Taya Osorio

DEDICATORIA

A Dios, por guiarme y permitirme cumplir las metas que me he propuesto a lo largo de mi vida.

A mis padres Yury y Dina, por el constante apoyo y paciencia que tuvieron conmigo en este proceso.

A mi hermana Diana por la exigencia inculcada desde mi infancia.

AGRADECIMIENTO

Al Dr. Edgar Taya Osorio, mi asesor, por su valiosa orientación y exigencia.

Al Ing. Wilmer Aragón Paucar, superintendente de mina de CIEMSA S.A., por su apoyo en el desarrollo de la presente investigación.

Al Ing. Luis Zeballos Rojas, gerente general de la Fábrica de Bloquetas Zeus.

Al Ing. Christian Tisnado. técnico de laboratorio de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas.

Al Dr. Edgardo Valdez Cortijo, director de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica.

Al Vicerrectorado de Investigación por la subvención económica otorgada para el desarrollo de la presente investigación.

Al Dr. Efrén Chaparro y Sra. Nelly García.

CONTENIDO

	Pág.
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
CONTENIDO	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xv
RESUMEN.....	xvi
ABSTRACT.....	xviii
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

1.1	Planteamiento del problema	4
1.2	Formulación y sistematización del problema	5
1.2.1	Problema general.....	5
1.2.2	Problemas específicos.....	6
1.3	Delimitación de la investigación.....	6
1.3.1	Delimitación temporal	6

1.3.2	Delimitación espacial	6
1.3.3	Delimitación teórica.....	7
1.4	Justificación -----	7
1.4.1	Justificación social	7
1.4.2	Justificación económica.....	8
1.4.3	Justificación ambiental.....	9
1.5	Limitaciones -----	10

CAPÍTULO II

OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1	Objetivos -----	11
2.1.1	Objetivo general.....	11
2.1.2	Objetivos específicos.....	11
2.2	Hipótesis -----	12
2.2.1	Hipótesis general	12
2.2.2	Hipótesis específicas	12
2.3	Variables -----	13
2.3.1	Indicadores de variables.....	13
2.3.2	Operacionalización de las variables.....	13

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

3.1	Marco referencial -----	15
3.1.1	Nivel internacional.....	15
3.1.2	Nivel nacional.....	25
3.2	Bases teóricas -----	26
3.2.1	Relaves mineros	26
3.2.2	Adoquines de concreto	33
3.2.3	Inmovilización de metales pesados en materiales de construcción.....	37
3.2.4	Economía circular en el sector minero	38
3.3	Definición de conceptos básicos-----	39

CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

4.1	Tipo de investigación -----	42
4.2	Nivel de investigación-----	42
4.3	Diseño de la investigación-----	43
4.3	Población y muestra de estudio-----	44

4.4	Métodos -----	44
4.4.1	Técnicas aplicadas en la recolección de la información	46
4.4.2	Instrumentos de la investigación	53
4.5	Análisis estadístico -----	54

CAPÍTULO V

TRATAMIENTO DE LOS RESULTADOS

5.1	Resultados-----	56
5.1.1	Determinación de las características físicas, químicas y mineralógicas del relave minero de una mina polimetálica.....	56
5.1.2	Elaboración de adoquines de concreto con distintos tratamientos de relave minero en reemplazo del agregado fino	65
5.1.3	Análisis de las características físico-mecánicas y de toxicidad de los adoquines de concreto.....	67
5.2	Discusión-----	79
5.2.1	Discusión de las características físicas, químicas y mineralógicas del relave de una mina polimetálica	79
5.2.2	Discusión de la elaboración de los adoquines de concreto con distintos tratamientos de relave en reemplazo de agregado fino	86

5.2.3	Discusión del análisis de las propiedades físico-mecánicas y de toxicidad de los adoquines de concreto	88
	CONCLUSIONES	96
	RECOMENDACIONES.....	99
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	100
	ANEXOS.....	110

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Operacionalización de variables	14
Tabla 2. Espesor nominal y resistencia a la compresión de los adoquines	35
Tabla 3. Absorción de agua de los adoquines de concreto	36
Tabla 4. Tolerancia dimensional de los adoquines de concreto	36
Tabla 5. Tratamientos y repeticiones para el experimento	43
Tabla 6. Análisis de varianza	55
Tabla 7. Análisis granulométrico del relave por tamizado	57
Tabla 8. Resultados del análisis granulométrico de la muestra de relave	59
Tabla 9. Contenido de metales de la muestra de relave	60
Tabla 10. Resultados del análisis ABA para la muestra de relave	61
Tabla 11. Resultados del análisis TCLP para la muestra de relave	62
Tabla 12. Resultados del análisis de difracción de rayos X	64
Tabla 13. Dosificación de los adoquines de concreto con adición de relave	66
Tabla 14. Cantidad de insumos empleados para la producción de adoquines de concreto con adición de relave	67
Tabla 15. Análisis de varianza de la resistencia a la compresión (kg/cm ²) de los adoquines de concreto	68

Tabla 16. Análisis de varianza de la absorción (%) de los adoquines de concreto	70
Tabla 17. Prueba de comparación múltiple de Tukey ($p < 0,05$) para la absorción de los adoquines de concreto	71
Tabla 18. Análisis de varianza de la densidad (kg/m^3) de los adoquines de concreto	73
Tabla 19. Prueba de comparación múltiple de Tukey ($p < 0,05$) para la densidad de los adoquines de concreto	74
Tabla 20. Prueba de Kruskal Wallis para el largo (mm) de los adoquines de concreto	76
Tabla 21. Análisis de varianza del ancho (mm) de los adoquines de concreto	77
Tabla 22. Análisis de varianza del espesor (mm) de los adoquines de concreto	77
Tabla 23. Resultados del análisis TCLP (mg/l) para los tratamientos	78

ÍNDICDE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Proceso de obtención del relave.....	27
Figura 2. Flujograma de la investigación.....	45
Figura 3. Curva granulométrica del relave.....	58
Figura 4. Resistencia a la compresión (kg/cm ²) de los adoquines de concreto.....	69
Figura 5. Absorción (%) de los adoquines de concreto.....	72
Figura 6. Densidad (kg/m ³) de los adoquines de concreto.....	75
Figura 7. Obtención de una muestra representativa del relave.....	128
Figura 8. Análisis de densidad y granulometría del relave.....	128
Figura 9. Pesado de insumos de los adoquines de concreto.....	129
Figura 10. Elaboración de los adoquines de concreto.....	130
Figura 11. Curado de los adoquines de concreto.....	130
Figura 12. Adoquines de concreto a los 28 días de curado.....	131
Figura 13. Ensayo de resistencia a la compresión de los adoquines de concreto.....	131
Figura 14. Ensayo de absorción de los adoquines de concreto.....	132
Figura 15. Ensayo de densidad de los adoquines de concreto.....	132

Figura 16. Medición de las dimensiones de los adoquines de concreto...133

Figura 17. Muestras aleatorias de los adoquines de concreto.....133

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Matriz de consistencia	111
Anexo 2. Informe de ensayo del análisis de metales del relave	112
Anexo 3. Informe de ensayo del análisis ABA y pH	114
Anexo 4. Informe de ensayo del análisis mineralógico del relave	116
Anexo 5. Resultados de la resistencia a la compresión (kg/cm ²) de los adoquines de concreto	117
Anexo 6. Informes de ensayo de la resistencia a la compresión (kg/cm ²) de los adoquines de concreto.....	118
Anexo 7. Resultados de la absorción (%) de los adoquines de concreto	123
Anexo 8. Resultados de la densidad (kg/m ³) de los adoquines de concreto	124
Anexo 9. Resultados del dimensionamiento (largo, ancho y espesor) de los adoquines de concreto	125
Anexo 10. Informe de ensayo del análisis TCLP del relave y tratamientos	126
Anexo 11. Panel fotográfico del trabajo experimental.....	128

RESUMEN

El procesamiento de los minerales genera volúmenes significativos de relaves que son dispuestos en depósitos de relaves. En caso de una gestión inadecuada, el relave puede ser una fuente de generación graves impactos ambientales y daños ecológicos importantes causado por el drenaje ácido u otros aspectos ambientales relacionados. La reutilización del relave como insumo para la elaboración de materiales de construcción, tales como los adoquines de concreto, nos brindan alternativas de valorización de este residuo.

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo principal aprovechar los relaves de una mina polimetálica como insumo para la elaboración de adoquines de concreto. Se llevó a cabo la caracterización física, química y mineralógica del relave de una mina polimetálica. La fabricación de los adoquines de concreto se realizó con cinco tratamientos, los cuales presentaban distintas proporciones de relave en reemplazo del agregado fino, esta sustitución se realizó al 25 %, 50 %, 75 % y 100 %, a su vez, se contó con un tratamiento patrón sin contenido de relave. De acuerdo a los resultados, el relave posee elevadas concentraciones de plomo y cadmio; asimismo, es considerado un material no generador de

drenaje ácido de mina debido a la ausencia de sulfuros. La resistencia a la compresión no mostró diferencias significativas entre cada tratamiento. La absorción de los tratamientos con contenido de relave fue mayor que el tratamiento control, mientras que la densidad de los tratamientos con contenido de relave fue reduciendo a medida que incrementó el contenido de relave. Los adoquines de concretos de cada tratamiento no presentan características de peligrosidad para el ambiente.

En conclusión, los adoquines de concreto presentan resultados de la resistencia a la compresión que cumplen con la NTP 399.611:2017. A su vez, la incorporación de relave en los adoquines de concreto asegura la inmovilización de metales pesados, permitiendo que los adoquines de concreto no se clasifiquen como materiales peligrosos.

Palabras Clave: Reutilización de relaves, inmovilización de metales pesados, relave no DAR, adoquín de concreto, resistencia a la compresión, densidad, absorción, toxicidad por lixiviación de metales.

ABSTRACT

Mineral processing generates significant volumes of tailings that are disposed of in tailings deposits. In the case of inadequate management, tailings can be a source of serious environmental impacts and significant ecological damage caused by acid drainage or other related environmental aspects. The reuse of tailings as an input for the production of construction materials, such as concrete paving stones, provides us with alternatives for the valorization of this waste.

The main objective of this research work was to use the tailings from a polymetallic mine as an input for the production of concrete paving stones. The physical, chemical and mineralogical characterization of the tailings from a polymetallic mine was carried out. The manufacture of the concrete paving stones was carried out with five treatments, which presented different proportions of tailings in replacement of the fine aggregate; this substitution was carried out at 25%, 50%, 75% and 100%, in turn, a standard treatment without tailings content was used. According to the results, the tailings have high concentrations of lead and cadmium; likewise, it is considered a material that does not generate acid mine drainage due to

the absence of sulfides. The compressive strength did not show significant differences between each treatment. The absorption of the treatments with tailings content was greater than the control treatment, while the density of the treatments with tailings content was reduced as the tailings content increased. The concrete pavers of each treatment do not present characteristics of danger to the environment.

In conclusion, concrete pavers present compressive strength results that comply with NTP 399.611:2017. In turn, the incorporation of tailings into concrete pavers ensures the immobilization of heavy metals, allowing concrete pavers not to be classified as hazardous materials.

Keywords: Tailings reuse, immobilization of heavy metals, non-DAR tailings, concrete pavers, compressive strength, density, absorption, metal leaching toxicity.

INTRODUCCIÓN

La explotación minera genera grandes cantidades de residuos en forma de rocas estériles y relaves mineros. Los relaves de la mina son lodos de grano fino que se obtienen por el procesamiento del mineral (Simonsen et al., 2020) y son almacenados en depósitos de relaves en donde los sólidos y fluidos del proceso se separan por gravedad. El sobrenadante casi libre de sólidos es recirculado al proceso productivo, mientras que los relaves sólidos se acumulan en el depósito. Este método de disposición final es ampliamente adoptado por la industria minera. Sin embargo, cuando no se gestiona adecuadamente puede generar graves impactos ambientales y daños ecológicos significativos como el drenaje ácido, contaminación del suelo y agua.

El manejo de los relaves es uno de los grandes desafíos que enfrenta la industria minera debido a que los depósitos de relaves ocupan amplias extensiones de terrenos, a su vez, las presas de relaves son propensas a fallar por deficiencias en el control del equilibrio hídrico, falta de control de la construcción y la falta de comprensión de las operaciones seguras (Fourie, 2009). Asimismo, El acumulamiento de relaves provoca

contaminación del aire debido a la erosión, así como la contaminación del suelo y del agua por la lixiviación de metales pesados (Qi y Fourie, 2019).

Los avances tecnológicos en la reutilización de relaves mineros han llevado a la elaboración de productos de construcción como ladrillos, cemento, adoquines y morteros, evaluándose principalmente sus propiedades físico-mecánicas y obteniendo resultados óptimos que permiten ser catalogados como adecuados materiales de construcción. Sin embargo, las implicancias ambientales de tales prácticas a menudo no son evaluados (Velásquez et al., 2022), especialmente si estos materiales de construcción con contenido de relave, puede ser considerados como productos inertes o no peligrosos para el ambiente.

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo principal aprovechar los relaves mineros de una mina polimetálica como insumo para la elaboración de adoquines de concreto, para lo cual se realizó la caracterización física, química y mineralógica del relave, así como la fabricación de los adoquines de concreto con distintos tratamientos y el análisis de las propiedades físico-mecánicas y de toxicidad de los adoquines de concreto.

En el Capítulo I se presenta el planteamiento del problema, la formulación y sistematización del problema, la delimitación del problema, la justificación y delimitaciones de la investigación. En el Capítulo II se expone los objetivos, hipótesis y variables de la investigación. En el Capítulo III se detalla los antecedentes, bases teóricas y definiciones de conceptuales. En el Capítulo IV se indica el tipo de investigación, nivel de investigación, diseño de la investigación, población y muestra de estudio, métodos y análisis estadístico de la investigación. En el Capítulo V se muestran los resultados y discusiones de la investigación. Finalmente, se presenta las conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas y anexos de la investigación.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema

La minería en el Perú representa un sector muy importante para el desarrollo de la economía peruana (Banco Mundial, 2021). Sin embargo, la actividad minera genera distintos tipos de residuos que, en el caso de un manejo inadecuado, podrían causar impactos ambientales negativos en el entorno del proyecto minero. Entre los residuos que se generan en el proceso productivo se encuentran los relaves mineros, que son generados en los procesos de concentración del mineral (Peña et al., 2021). Los relaves son considerados como residuos debido a que no presentan un valor económico de gran importancia para la minería (Meza y Mamani, 2020). De acuerdo a sus características fisicoquímicas, los relaves pueden ser un riesgo para el confort del ambiente y la salud de las personas (Saavedra y Beingolea, 2019).

El manejo de este material es de gran importancia debido a los costos que implica para la operación minera. Es por esto que, la reutilización de los relaves es una alternativa que permitiría reducir el riesgo

de contaminación e incrementaría el tiempo de servicio de los depósitos de relave (Romero, 2020). Una alternativa para de reutilización de los relaves es integrarlo en el concreto, con lo cual se tendrían estructuras como losas, muros de contención, cimientos, entre otras estructuras que resisten el intemperismo.

La presente investigación propone aprovechar el relave como insumo para la fabricación de adoquines de concreto, con lo cual se valoriza este residuo generado por la actividad minera y a su vez contribuye en la práctica de la economía circular en el sector minero.

1.2 Formulación y sistematización del problema

1.2.1 Problema general

- ¿Los relaves mineros de una mina polimetálica pueden ser aprovechados como insumo para la elaboración de adoquines de concreto?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿Cuáles son las características físicas, químicas y mineralógicas del relave de una mina polimetálica?
- ¿Cómo se elaborarán los adoquines de concreto con distintos tratamientos de relave en reemplazo del agregado fino?
- ¿Cuáles son las características físico-mecánicas y de toxicidad de los adoquines de concreto?

1.3 Delimitación de la investigación

1.3.1 Delimitación temporal

El proceso de fabricación de los adoquines de concreto se llevó a cabo en 1 día y el curado se realizó durante 28 días. Posteriormente, se realizó los ensayos de las propiedades físico-mecánicas y de toxicidad.

1.3.2 Delimitación espacial

La elaboración de los adoquines de concreto se realizó en el Fabrica de Bloquetas Zeus ubicado en distrito de Ciudad Nueva, provincia de Tacna y departamento de Tacna. El curado se realizó en la Fábrica de Bloquetas Zeus y en el Taller de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica.

1.3.3 Delimitación teórica

La presente investigación se enfocó en el aprovechamiento del relave en reemplazo del agregado fino como insumo para la elaboración de adoquines de concreto, así como en la determinación de las propiedades físico-mecánicas (resistencia a la compresión, absorción, densidad y tolerancia dimensional) y la toxicidad del lixiviado de metales de los adoquines de concreto.

1.4 Justificación

1.4.1 Justificación social

El relave minero es uno de los principales residuos que se generan en la actividad minera, debido a que se producen en grandes cantidades y por representar un riesgo de contaminación. En la actualidad, el manejo de los relaves consiste únicamente en la disposición en los depósitos de relaves que, posteriormente son estabilizados y revegetados, durante la etapa de cierre de la mina. Debido a la disposición de los relaves, estos son considerados como fuentes potenciales de contaminación ambiental. En este sentido, es importante precisar que uno de los motivos principales de

los conflictos sociales es la contaminación ambiental causada por la actividad minera. En consecuencia, el presente trabajo de investigación plantea aprovechar los relaves con el fin disminuir aquel material acumulado que tiene el potencial de causar impactos ambientales negativos que podrían afectar a las poblaciones cercanas al área del proyecto. Además, la fabricación de materiales de construcción, en este caso los adoquines de concreto, permiten atender la demanda de estos materiales para la construcción de pavimentos, ya sea por parte de la empresa para los accesos internos de la unidad minera, o para las poblaciones que requieran de la construcción y/o mejoramiento de accesos.

1.4.2 Justificación económica

En la actualidad, los relaves son dispuestos en su totalidad en los depósitos de relaves debido a que no son valorizados. El cierre de los depósitos de relaves implica costos de ejecución de las actividades de cierre, así como el mantenimiento y monitoreo post cierre, los cuales se desarrollan durante un periodo de tiempo. La reutilización de relaves permite que tengan un valor agregado con el cual pueda ser utilizado como materia prima en la elaboración de adoquines de concreto, esto posibilita

la reducción de los costos de producción (Cerón y Gutiérrez, 2019); asimismo, los costos de comercialización serían menores que los adoquines de concreto convencionales. Este escenario es favorable para atender la alta demanda de materiales de construcción. De otro lado, aprovechar los relaves permiten extender la vida útil de los depósitos de relaves existentes, por lo cual, las empresas evitarían la inversión que constituye la construcción de nuevos depósitos de relaves.

1.4.3 Justificación ambiental

Los relaves constituyen una fuente potencial de contaminación ambiental durante la etapa de operación y cierre de la unidad minera. Estos residuos no son reciclados para la producción de materiales de construcción u otro producto, sino más bien, su disposición final consiste en mantenerlos en los depósitos de relaves hasta que, como medidas de cierre, sean estabilizados y revegetados; por lo tanto, este material estaría situado en un lugar específico de manera permanente. En consecuencia, la presente investigación propone valorizar los relaves mediante la utilización como insumo para la fabricación de adoquines de concreto, con lo cual se disminuiría los riesgos ambientales que representan al ser

dispuestos permanentemente en el ambiente. Además, se contribuye con una alternativa para la práctica de la economía circular en el sector minero.

1.5 Limitaciones

El trabajo de investigación tuvo la siguiente limitación:

- No fue posible realizar la toma de muestra del relave minero in situ debido a asuntos operacionales de la empresa minera.

CAPÍTULO II

OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1 Objetivos

2.1.1 Objetivo general

- Aprovechar los relaves mineros de una mina polimetálica como insumo para la elaboración de adoquines de concreto.

2.1.2 Objetivos específicos

- Determinar las características físicas, químicas y mineralógicas del relave de una mina polimetálica.
- Elaborar adoquines de concreto con distintos tratamientos de relave en reemplazo del agregado fino.
- Analizar las propiedades físico-mecánicas y de toxicidad de los adoquines de concreto.

2.2 Hipótesis

2.2.1 Hipótesis general

- Los relaves mineros de una mina polimetálica sí pueden ser aprovechados como insumo para la elaboración de adoquines de concreto.

2.2.2 Hipótesis específicas

- Sí es posible determinar las características físicas, químicas y mineralógicas del relave de una mina polimetálica.
- Los adoquines de concreto sí pueden ser elaborados con distintos tratamientos de relave en reemplazo del agregado fino.
- El análisis de las características físico-mecánicas y de toxicidad sí permiten conocer la calidad de los adoquines de concreto.

2.3 Variables

2.3.1 Indicadores de variables

a. Variable independiente

- Relave minero

b. Variable dependiente

- Adoquines de concreto

2.3.2 Operacionalización de las variables

En la tabla 1 se presenta la operacionalización de las variables del presente trabajo de investigación.

Tabla 1

Operacionalización de variables

Variables	Dimensiones	Indicadores	Técnicas de investigación
Independiente X ₁ = Relave minero	Caracterización física	- Densidad (g/ml) - Granulometría (%)	- Determinación de la densidad - Análisis granulométrico
	Caracterización química	- pH - Metales pesados (mg/kg) - Potencial generador de drenaje ácido - Toxicidad por lixiviación de metales (mg/l)	- Determinación del pH - Análisis de metales - Análisis ABA - Análisis TCLP
	Caracterización mineralógica	- Composición mineralógica (%)	- Análisis mineralógico por difracción de rayos X
	Porcentaje de relave en sustitución del agregado fino	0 % (Patrón), 25 %, 50 %, 75 % y 100 %	- Dosificación en peso
Dependiente Y ₁ = Adoquines de concreto	Características físicas-mecánicas	- Resistencia a la compresión (kg/cm ²) - Densidad (kg/m ³) - Absorción (%) - Tolerancia dimensional (mm)	- Ensayo de resistencia a la compresión - Ensayo de densidad - Ensayo de absorción - Dimensionamiento
	Características de toxicidad	- Toxicidad por lixiviación de metales (mg/l)	- Análisis TCLP

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

3.1 Marco referencial

3.1.1 Nivel internacional

En la investigación de Jaramillo (2018) titulada “Caracterización ambiental del manejo de relaves en la planta de beneficio Reina del Cisne II, sitio el Pache Cantón Portovelo, provincia del Oro” los relaves contenían metales como Cu en 5460,5 mg/kg, Pb en 2933,5 mg/kg, As en 2202 mg/kg y Cd en 36,52 mg/kg, los cuales no cumplen con los valores permisibles a excepción del Cd y conductividad eléctrica. Se concluye que el elemento de mayor presencia en los relaves es el Cu, el cual excede los estándares establecidos en el TULSMA (25 mg/kg).

Jácome et al. (2022) en su investigación titulada “Desarrollo de adoquines a partir de relaves mineros” realizaron prototipos de adoquines empleando cemento, agua, agregado grueso, agregado fino y relave. El porcentaje de relave en reemplazo de agregado fino fue de 30 %, 50 % y 70 %. De acuerdo a sus resultados, los relaves muestran un PAG marginal.

La resistencia a la compresión para las proporciones de 70 %, 50 % y 30 % fueron de 31,62 MPa (322,43 kg/cm²), 22,62 MPa (230,66 kg/cm²) y 27 MPa (275,32 kg/cm²). Estos valores cumplen el valor requerido de la normativa INEN 1488 (20 MPa) referido a los adoquines para el uso de vías peatonales y estacionamientos. La absorción de agua de los adoquines fabricados con un 30 %, 50 % y 70 % de relave fueron de 7,83 %, 8,6 % y 8,83 %. Se concluye que el aprovechamiento de los relaves es factible en relación al cumplimiento de la normativa, así como en el ámbito económico.

Enríquez et al. (2022) en su investigación titulada “Estudio de caso para el aprovechamiento de relaves mineros procedentes de la concesión Campanillas, Zamora Chinchipe-Ecuador, como agregado para la elaboración de adoquines” fabricaron adoquines con relaves en reemplazo de la arena en las proporciones 0 %, 20 %, 30 % y 40 %. La resistencia a la compresión de los adoquines fue de 53 MPa (540,45 kg/cm²), 59.53 MPa (607,04 kg/cm²), 50.93 MPa (519,34 kg/cm²) y 54.10 MPa (551,67 kg/cm²), la absorción total del agua es de 6,64 %, 8,85 %, 7,87 % y 6,57 %, para las proporciones de 0 %, 20 %, 30 % y 40 % respectivamente. Se identificó que los valores de compresión- esfuerzo superan los 50 MPa, con lo cual pueden ser empleados para tráfico pesado y peatonal según la norma

ASTM. Respecto a la absorción de agua, para el adoquín normal y con 40 % de relave, los valores cumplen con la norma ASTM C936 (≤ 7 %). En conclusión, el adoquín con el 40 % de relave cumple con las normativas, por tal razón, es viable la utilización de relave como materia prima.

Andrews et al. (2022) en la investigación titulada “Reuse and stabilization of sulphide mine tailings as fine aggregate for construction mortar” utilizó relave como sustituto del agregado fino en 0 %, 25 %, 50 %, 75 % y 100 %, para elaboración de mortero de construcción. El relave registró altas concentraciones de As en 766,36 mg/kg y Fe en 38636,36 mg/kg excediendo los límites máximos permisibles de la OMS (20 mg/kg y 50000 mg/kg). La densidad del relave fue de 1,38 g/ml y de la arena fue de 1,61 g/ml. La sustitución de relave tuvo efectos en la disminución de la densidad media con el aumento del porcentaje de relave, reportando 8,4 g/cm³ (0 %), 8,4 g/cm³ (25 %), 8,2 g/cm³ (50 %), 7,9 g/cm³ (75 %) y 7,6 g/cm³ (100 %). Así también, se observó que la absorción incrementó con el aumento del contenido de relave, registrando 7,4 % (0 %), 9,1 % (25 %), 13,5 % (50 %), 17,1 % (75 %) y 21 % (100 %). La resistencia a la compresión fue de 8,4 MPa (0 %), 12,2 MPa (25 %), 8,2 MPa (50 %), 4,1 MPa (75 %), 2,8 MPa (100 %). La lixiviación de metales de los morteros

con el 25 % y 100 % de relave registraron excedencias de As en 0,58 mg/l y 1,1 mg/l respectivamente, respecto a los límites máximos permisibles del GHEPA (0,1 g/ml).

Xie et al. (2023) en su investigación titulada “Synthesis and influencing factors of high-performance concrete based on copper tailings for efficient solidification of heavy metals” elaboraron un material de hormigón empleando material cementante, agregado fino, agregado grueso, agua y agentes reductores de agua. El relave proviene de una mina de cobre cuya concentración metales del lixiviado fue de 2,69 mg/l de Cr, 2,19 mg/l de Cu, 3,89 mg/l de Pb y 2,79 de Zn. El relave reemplazó el agregado fino en 40 %, 45 %, 50 %, 55 % y 60%; a su vez, el material cementante contenía relave, humo de sílice y cemento en la proporción 76:7:16. Se concluye que, los resultados relacionados al efecto de la proporción de arena sobre las propiedades del hormigón, muestran que con el 40% de relave se tiene los mejores resultados en cuanto a la resistencia a la compresión alcanzando 84,06 MPa y con el 60 % de relave se tuvo el menor promedio en 64 MPa. A su vez, los ensayos de lixiviación tóxica de Cr (2,69 mg/l), Cu (2,2 mg/l), Pb (3,89 mg/l) y Zn (2,79 mg/l), indicaron que

presentan un riesgo bajo o nulo de contaminación por metales pesados. Respecto al Pb, las muestras de concreto no excedieron los 0,02 mg/l.

Sant'ana et al. (2017) en la investigación titulada "Technical and Environmental Feasibility of Interlocking Concrete Pavers with Iron Ore Tailings from Tailings Dams" utilizaron relaves de mineral de hierro (IOT) como agregado fino en las proporciones 10 %, 20 % y 80 % (peso), a su vez, se consideró un adoquín patrón. La densidad del relave fue de 3,74 g/ml y del agregado fino de 2,66 g/ml. De los resultados, se tiene que los adoquines producidos con IOT presentaron reducción de absorción de agua (entre 0,7 % a 2,2 %) en relación al adoquín patrón. La densidad del adoquín patrón fue de 2150 kg/m³ y el adoquín con 80 % de relave fue de 2650 kg/m³. La resistencia a la compresión disminuye con el aumento del contenido de IOT, siendo 62,6 MPa (638,34 kg/cm²), 62 MPa (632,22 kg/cm²), 51 MPa (520,06 kg/cm²) y 48,9 MPa (498,64 kg/cm²), para la muestra patrón, 10 %, 20 % y 80 % respectivamente. Los análisis químicos indicaron que los IOT son inertes y no peligrosos. Se concluye que los adoquines con 80 % de IOT son adecuados para carreteras para vehículos comerciales y los adoquines con 10 % y 20 % de IOT, pueden ser utilizados

en carreteras para usos vehículos especiales o expuestos a abrasión fuerte.

Balegamire et al. (2022) en la investigación denominada “Production of gold mine tailings based concrete pavers by substitution of natural river sand in Misisi, Eastern Congo” elaboraron adoquines en base a relaves de minería de oro (GMT) y arena (NRS), a su vez utilizaron grava, cemento y agua, estos últimos en distintas proporciones debido a la diferencia en la granulometría del GMT y NRS. Según los resultados, la resistencia a la compresión de los adoquines basados en GMT fue de $25,6 \text{ N/mm}^2$ ($269,9 \text{ kg/cm}^2$) y para los adoquines basados en NRS fue de 26 N/mm^2 ($269,02 \text{ kg/cm}^2$) según el ANOVA, no presentan diferencias significativas. La densidad de los adoquines de GMT fue de $2,09 \text{ g/ml}$ y de NRS fue de $2,13 \text{ g/ml}$. De acuerdo a la composición química del GMT, se tiene que más del 50 % es de sílice y el 21.6 % de clorito, lo que indica el GMT es efectivo para la construcción debido a las altas proporciones de sílice. Se concluye que es posible la sustitución total de NRS por GMT en la fabricación de adoquines de concreto.

Zhao et al. (2024), en su investigación titulada “Revealing the release and migration mechanism of heavy metals in typical carbonate tailings, East China” evaluaron la liberación y el transporte de metales pesados de los relaves bajo infiltración de lluvia ácida a escalas espaciales y temporales. Se concluyó que la neutralización en presencia de rocas carbonatadas en la ganga reduce la intensidad de la liberación de metales pesados de relaves con alto contenido de metales pesados. En ausencia de rocas carbonatadas, se liberan significativamente As, Cu, Zn y Cd.

Helser et al. (2022) en la investigación titulada “Valorizing (cleaned) sulfidic mine waste as a resource for construction materials” analizó la caracterización química y mineralógica, así como pruebas de lixiviación (TCLP) de relaves procedentes de minas polimetálicas (FR_1, PL_62I y NC_2). Los resultados del análisis mineralógico de las muestras FR_1, PL_62I y NC_2 presentaron cuarzo (SiO_2) en 38 %, 51 % y 25 % respectivamente, así como minerales arcillosos/micas en 15 %, 19 % y 14 % respectivamente. Se evidenció el contenido de pirita (FeS_2) en 13 % y 35 % para las muestras FR_1 y NC_2 respectivamente. El análisis químico evidenció excedencias al reglamento VLAREMA para el As (4620 mg/kg y 3782 mg/kg), Cd (95 mg/kg y 27 mg/kg), Cu (616 mg/kg y 3056 mg/kg), Pb

(3036 mg/kg y 3163 mg/kg) y Zn (10453 mg/kg y 9699 mg/kg) para las muestras FR_1 y NC_2 respectivamente. La muestra PL_62I no registró concentraciones superiores a los límites del reglamento VLAREMA para su uso como material de construcción. Los resultados de la prueba TCLP, indicaron que el cemento es un material altamente alcalino y tiene una alta capacidad de neutralización de ácidos, lo que contribuye en la disminución de la lixiviación de metales (As, Cu, Cd y Zn).

Akhavan y Golchin (2021) en su investigación "Estimation of arsenic leaching from Zn–Pb mine tailings under environmental conditions" detectaron que las muestras de relave S1 y S2 contenía cuarzo al 67 % y 24 % respectivamente, y yeso al 33 % y 76 % respectivamente. Asimismo, contienen 1 % y 0,5 % de Pb, 2,5 % y 2,2 % de Zn, 1385 ppm y 698 ppm de As. Se evidenció excedencias de Zn (2,5 %), Pb (1 %), As, Ce y Ni. De acuerdo a los resultados de lixiviación del As, con la prueba TCLP se registró 0,61 mg/l y 0,28 mg/l respectivamente, con lo cual se define como material no peligro respecto a los límites máximos permisibles del EPA (5 mg/l).

Argane et al. (2016) en su investigación "A comparative study on the practical use of low sulfide base-metal tailings as aggregates for rendering and masonry mortars" utilizaron relaves de Pb y Zn para la fabricación de morteros con el 10 %, 20 % y 30 % de reemplazo de la arena (volumen). Las muestras de relave provienen de las minas Zeida (M-Ze), Mibladen (M-Mi), Bediane (M-Be) y Boubker (M-Bo). El contenido de Pb fue de 4710 mg/kg, 5940 mg/kg, 4160 mg/kg y 3670 mg/kg respectivamente. Las concentraciones de Cd en M-Be y M-Bo fueron de 34 mg/kg y 128 mg/kg respectivamente. La densidad de la arena fue de 1400 kg/m³ y la densidad de las muestras de relave fueron de 1350 kg/m³, 1565 kg/m³, 1490 kg/m³ y 1500 kg/m³ respectivamente. Asimismo, se observó que la densidad de los morteros con relave ascienden a 2258 kg/m³ (10 %), 2290 kg/m³ (20 %), 2307 kg/m³ (30 %) para M-Mi, y en 2218 kg/m³ (10 %), 2245 kg/m³ (20 %) y 2264 kg/m³ (30 %) para M-Be, cuyos valores son superiores a la densidad del mortero patrón (2200 kg/m³); sin embargo, la densidad de los morteros con relave M-Ze fueron inferiores que la muestra patrón en 2185 kg/m³ (10 %), 2180 kg/m³ (20 %) y 2172 kg/m³ (30 %) respectivamente. Esto se atribuye a las diferencias entre las densidades de la arena y los relaves. Respecto a la absorción, los morteros con relave presentaron valores mayores que la muestra patrón (9,9 %), obteniendo aproximadamente

10,55 % (10 %), 10,65 % (20 %) y 10,8 % (30 %) para M-Ze, 10,7 % (10 %), 10,9 % (20 %) y 11 % (30 %) para M-Mi, 10,5 % (10 %), 10,6 (20 %) y 10,75 % (30 %) para M-Be. Los resultados de la prueba TCLP indicaron que los relaves se consideran residuos peligrosos, toda vez que excedieron los límites regulatorios del U.S. EPA (1998) para Pb (5 mg/l), en 232 mg/l para M-Ze, 5,26 mg/l para M-Mi, y 152 mg/l para M-Be.

Chen et al., (2022) en su investigación "The geochemical and mineralogical controls on the release characteristics of potentially toxic elements from lead/zinc (Pb/Zn) mine tailings" el relave presentó concentraciones de metales de hasta 428 mg/kg de As, 6,91 mg/kg de Cd, 13300 mg/kg de Pb y 9610 mg/kg de Zn. A su vez, se determinó que el Cd muestra la mayor movilidad en comparación con el Mn, Zn, Pb y As. La composición mineralógica del relave muestra que el cuarzo se encuentra entre 13,9 % al 17 %, sericita del 10,7 % al 12,6 %, calcita entre 17,7 % al 21,8 % y pirita del 34 % al 38 %.

Cordero et al., (2022) en la investigación titulada "Caracterización física, química y mineralógica de un antiguo relave, en busca de alternativas de reutilización" el relave analizado tuvo un pH de 7, una

densidad de 1,4 g/ml y una concentración promedio de As de 93,3 mg/kg, Pb de 682 mg/kg y Cd de 4,3 mg/kg. A su vez, la caracterización mineralógica determinó la presencia de pirita (FeS) y galena (PbS).

3.1.2 Nivel nacional

Jove y Mamani (2020) en su investigación titulada “Adición de relave triturado no tóxico en la mezcla para la producción de adoquines de concreto, Ollachea, Puno, 2022” elaboraron adoquines de concreto con el 10 %, 30 %, 50 % y 75 % de relave en reemplazo del agregado fino, así como muestras patrón. De acuerdo a los resultados de la resistencia a la compresión a los 28 días, se obtuvo 389,12 kg/cm², 380,28 kg/cm², 320,01 kg/cm², 224,15 kg/cm² y 182,21 kg/cm², para las mezclas de 0 %, 10 %, 30 %, 50 % y 75 % respectivamente. Se concluye que el adoquín con el 10 % de relave se categoriza como de tipo II según la NTP 399.611:2017..

Manrique y Agurto (2022) en la investigación titulada “Caracterización geoquímica y mineralógica de relaves mineros La Ciénaga – La Libertad”, los relaves La Ciénada están conformados principalmente por fracciones finas menor a 10 µm entre el 37 % al 67 %. La composición

mineralógica evidencia la presencia de cuarzo al 48 %, pirita al 9,3 %, yeso al 8 %, moscovita al 8,5 %, clinocloro al 8,4 %, calcita al 6,4 %, albita al 4,7 %, dolomita al 4,4 %, ortoclasa al 4,3 %, magnesiohornblenda al 3,9 % y arsenopirita al 1,8 %.

En la investigación de Morche (2022) titulada “Investigación ambiental y opciones de remediación para los Pasivos Ambientales Mineros de La Ciénaga” se determinó que los relaves mineros La Ciénaga son generadores de drenaje ácido de mina, lo que representa un riesgo ambiental para los cuerpos de agua superficiales y subterráneas del entorno.

3.2 Bases teóricas

3.2.1 Relaves mineros

3.2.1.1 Proceso de formación de los relaves

Peña et al. (2021) señala que los relaves se generan en el proceso de concentración, donde la roca molida se reduce al nivel de partículas de polvo. En este punto, se realiza una separación entre el mineral y los otros componentes mediante el uso de agua y productos químicos. Estos

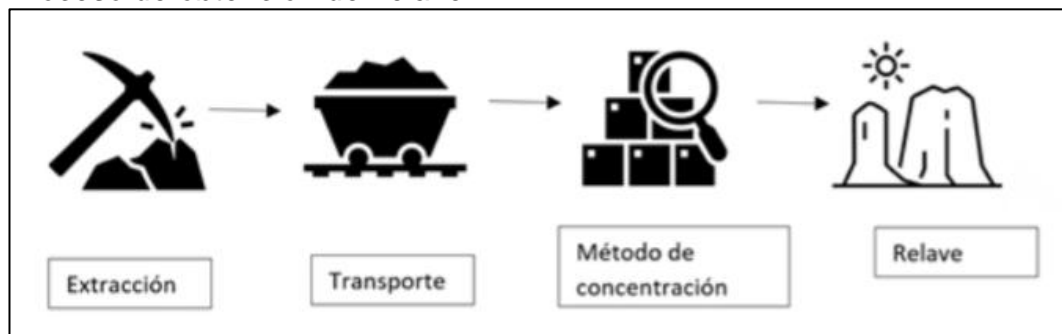
componentes restantes se convierten en un lodo que se transporta a su lugar de almacenamiento, conocidos como depósitos de relaves (Ministerio de Energía y Minas [MINEM], 1995), donde se recupera el agua para su posterior procesamiento.

Existen distintos tipos de depósitos de relaves tales como embalses, tranques, filtrados y espesados. Estos son constantemente supervisados debido a que pueden ser afectados por lluvias o movimientos sísmicos (Simonsen et al., 2020).

En la figura 1 se muestra una representación general del proceso de obtención del relave.

Figura 1

Proceso de obtención del relave



Nota: Esta figura ilustra el proceso de generación de relaves que ocurre en la concentración del mineral virgen. Tomado de “Towards tailings recycled production technologies”, por Peña et al., 2021.

3.2.1.2 Características de los depósitos de relaves

Los materiales contenidos en los depósitos de relaves pueden ser diferentes de acuerdo al yacimiento. Los depósitos de relave contienen lo siguiente:

a. Relave sólido

El relave sólido se debe a la disparidad en la gravedad específica de las partículas minerales de diferentes metales, lo que afecta su distribución. Este fenómeno a menudo conduce a una sobre-molienda, lo que provoca que los minerales más pesados se concentren en las partículas finas del relave (Qi y Fourie, 2019).

b. Efluentes líquidos de flotación

Los residuos de reactivos utilizados en el proceso de flotación se mantienen en los relaves líquidos. La mayoría de estos reactivos existen en formas no tóxicas para los humanos y la vida acuática, a excepción del cianuro (MINEM, 1995).

Asimismo, durante el proceso de flotación, es posible que se liberen otros componentes en solución, dependiendo de su presencia en el mineral y de su solubilidad. Entre estos elementos se encuentran arsénico y selenio (en caso se encuentran en el mineral) que pueden ser solubles a pH neutro (MINEM, 1995). El agua debe ser recirculada hacia la concentradora para evitar la descarga de los efluentes líquidos producto de la flotación ya que podrían contener metales pesados.

c. Efluentes cianurados

El cianuro de sodio se utiliza ampliamente como agente lixivante en la mayoría de las operaciones para extraer oro y plata, y en ocasiones como reactivo en procesos de flotación. En los efluentes de los relaves, el cianuro se encuentra en forma de cianuro libre y también en complejas asociaciones con varios metales, lo que le otorga diferentes niveles de solubilidad y toxicidad (MINEM, 1995).

El cianuro libre es químicamente inestable y su degradación ocurre de manera natural. La volatilización es el proceso de degradación más relevante y su efecto aumenta a medida que el pH se torna neutro debido al tiempo de retención en el depósito de relaves (MINEM, 1995).

d. Drenaje ácido de mina

El potencial generador de drenaje ácido de minas se refiere al proceso mediante el cual el pH del agua en contacto con los relaves puede disminuir significativamente, lo que provoca la disolución y transporte de metales tóxicos disueltos, junto con el aumento drástico en los niveles de sulfatos (Schreck et al., 2020).

Una alternativa es la eliminación del oxígeno manteniendo los espacios vacíos llenos con agua y el depósito totalmente saturado, o cubriendo la superficie del depósito. Si la generación de DAR ha iniciado dentro del depósito, se debe reducir la infiltración por coberturas, en combinación con la derivación del agua superficial y un apropiado tratamiento de la superficie del depósito (MINEM, 1995).

3.2.1.3 Cierre de los depósitos de relave

Los proyectos mineros tienen un periodo de vida útil marcado por el recurso que alberga el yacimiento. Al finalizar el periodo productivo de la mina, se debe ejecutar las respectivas medidas de cierre establecido en el Plan de Cierre de Minas. Este plan comprende el cierre de todos los

componentes de la unidad minera, tales como tajos, bocamina, panta concentradora, depósitos de relaves, depósitos de desmonte, entre otros.

El Decreto Supremo N° 033-2005-EM establece los objetivos del cierre de minas “de tal forma que se garantice la estabilidad física, estabilidad química, la rehabilitación de las áreas afectadas, uso alternativo de las áreas y determinación de uso futuro” (MINEM, 2005, Artículo 10).

Cuando se lleva a cabo el cierre de los depósitos de relaves, se analizan diversos aspectos cruciales. Según Aduvire (2022) incluye la ubicación del depósito, las características físicas y químicas del relave, el método de construcción del depósito y el comportamiento proyectado de los relaves a lo largo del tiempo. El objetivo principal es lograr un diseño final del depósito de relaves que sea seguro y estable a largo plazo.

3.2.1.4 Riesgos de los relaves mineros

Según Romero y Salinas (2020), los riesgos relacionados a los relaves mineros, son los siguientes:

a. Ambiental

El riesgo de contaminación al ambiente se generaría al realizar un manejo sin especificaciones técnicas de los relaves, lo cual provocaría la contaminación del entorno de donde se deposita y confina los relaves mineros, afectando la calidad del agua, suelos y aire (Qi y Fourie, 2019).

b. Social

Está referido a la afectación en la salud de las personas. Los relaves pueden contener elementos tóxicos que, aunado a la cercanía de las poblaciones, incrementan el riesgo de afectación a la salud de las personas (Boussen et al., 2013).

c. Económico

Está referida a las consecuencias negativas que pueda originar los relaves en las actividades económicas y productivas de las poblaciones cercanas a la zona crítica. Como ejemplo se puede considerar el colapso de las presas de relaves, ya sea por el inadecuado almacenamiento o por un evento sísmico, este suceso afectaría carreteras, viviendas, tierras de cultivo, entre otros (Romero y Salinas, 2020).

3.2.2 Adoquines de concreto

3.2.2.1 Clasificación de los adoquines

El Instituto Nacional de Calidad (INACAL) aprobó la Norma Técnica Peruana (NTP) 399.611:2017, en donde se clasifican los adoquines de concreto para pavimentos.

- Tipo I: Adoquines para pavimentos de uso peatonal
- Tipo II: Adoquines para pavimentos de tránsito vehicular ligero
- Tipo III: Adoquines para pavimentos de tránsito vehicular pesado, patios industriales y contenedores

3.2.2.2 Materiales para la fabricación de los adoquines de concreto

A continuación, se describen los materiales empleados en la fabricación de adoquines de concreto:

a. Cemento

El cemento es un material que brinda cohesión entre todos los componentes de la mezcla (Hidalgo y Poveda, 2013). Está constituido por caliza y arcilla.

b. Agua

El agua es un elemento muy importante para la preparación del concreto debido a que se relaciona directamente con la resistencia, trabajabilidad y propiedades del concreto endurecido (López y Pinedo, 2015).

c. Agregados

Hidalgo y Poveda (2013) señalan que los agregados se clasifican en dos clases: agregado fino y grueso.

Los agregados pueden ser naturales o artificiales. Los agregados naturales son generados por la acción del agua y la meteorización, como la arena y grava. El agregado artificial proviene de procesos mecánicos como el polvo de piedra y ripio triturado.

3.2.2.3 Propiedades físico-mecánicas del adoquín

a. Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión es la relación entre la carga de rotura a compresión de un adoquín y su sección (INACAL, 2017).

En la tabla 3 se presenta la resistencia a la compresión mínima que deben cumplir los adoquines de concreto según la NTP 399.611:2017.

Tabla 2

Espesor nominal y resistencia a la compresión de los adoquines

Tipo	Espesor (mm)	Resistencia a la compresión, min. (kg/cm ²)	
		3 unidades (promedio)	1 unidad
I	40	320	290
	60	320	290
II	60	420	380
	80	380	340
	100	360	325
III	≥ 80	561	510

Nota: Adaptada de “Unidades de albañilería. Adoquines de concreto para pavimentos. Requisitos”, elaborada por INACAL, 2017.

b. Absorción

La absorción es la propiedad de los agregados que le permite introducir agua dentro de los poros de sus partículas (Romero y Salinas, 2020).

En la tabla 4 se indican los requisitos de máxima los requisitos de máxima absorción que deben cumplir los adoquines de concreto según la NTP 399.611:2017.

Tabla 3

Absorción de agua de los adoquines de concreto

Tipo	Absorción máxima (%)	
	3 unidades (promedio)	1 unidad
I y II	6	7,5
III	5	7

Nota: De “Unidades de albañilería. Adoquines de concreto para pavimentos. Requisitos”, por INACAL, 2017.

c. Tolerancia dimensional

En la tabla 2 se presenta la tolerancia dimensional que deben ser considerados para los adoquines de concreto según la NTP 399.611:2017.

Tabla 4

Tolerancia dimensional de los adoquines de concreto

Longitud	Ancho	Espesor
± 1,6	± 1,6	± 3,2

Nota: De “Unidades de albañilería. Adoquines de concreto para pavimentos. Requisitos”, por INACAL, 2017.

3.2.3 Inmovilización de metales pesados en materiales de construcción

La inmovilización de metales pesados se realiza mediante el proceso de solidificación y estabilización (S/S). La S/S es utilizada para aquel material contaminado con metales pesados con el fin de reducir su toxicidad (Batchelor, 2006).

La solidificación implica mezclar desechos con agentes solidificantes para generar la unión física de los residuos en forma monolítica o material granular. La estabilización es un proceso de convertir un residuo tóxico en una forma física y químicamente más estable (Kamal et al., 2019).

Los agentes aglutinantes (aditivos minerales o aditivos químicos para métodos de estabilización) utilizados en el proceso S/S son cemento portland ordinario (OPC), productos de combustión de carbón (p.ej. cenizas volantes de carbón, cenizas de fondo de carbón y escoria de caldera), material puzolánico (p.ej. metacaolín y humo de sílice), puzolana natural (zeolitas), cal (carbonato de calcio), entre otros.

3.2.4 Economía circular en el sector minero

La economía circular es un modelo que busca el desarrollo económico considerando la reducción de la presión que se ejerce en el ambiente a causa del incremento de la demanda de materias primas, la generación de residuos y consumo de energía.

Uno de los pilares fundamentales de la economía circular es que maximiza la vida útil de los productos, y a su vez, aprovechar los residuos generados después del consumo o la producción como recursos para la creación de nuevos productos (Julca, 2022).

La aplicación de la economía circular conlleva distintos desafíos, debido a la reingeniería en los procesos extractivos de economía lineal a un modelo circular, en el cual se debe alcanzar el aprovechamiento y uso eficiente de los recursos no renovables (Zamora e Hinojosa, 2019).

El avance de las operaciones mineras hacia un enfoque circular en todo el mundo y en los países andinos se ve restringido por la falta de tecnología que permita valorizar los residuos mineros (Julca, 2022). En

consecuencia, el avance de la minería con enfoque circular depende exclusivamente del impulso en I+D+i en el país.

Es importante que en el Perú se realicen proyectos de investigación que aporten en las prácticas de economía circular en sector minero, debido a la importancia que representa este sector en la economía peruana y que se ve constantemente afectada por los problemas ambientales y conflictos socio ambientales. Según Mendiola (2019), los proyectos mineros con enfoque circular permitirán reducir drásticamente los conflictos socio ambientales.

3.3 Definición de conceptos básicos

- **Relaves mineros**

Este tipo de residuo mineral sólido se caracteriza por tener un tamaño que se encuentra entre arena y limo. Estos residuos se generan como resultado del proceso de concentración y son transportados o depositados en forma de lodo (MINEM, 1995).

- **Economía circular**

La economía circular busca regenerar y restaurar los sistemas naturales al disminuir el consumo de materias primas y la generación de residuos. A su vez, maximiza la vida útil de los productos que al convertirse en residuo se convierten en insumos para fabricar nuevos productos (Julca, 2022).

- **Valoración de residuos**

Según la Ley 7/2022 de residuos y suelos contaminados para una economía circular de España, se define valoración como una operación cuyo objetivo principal es darle un uso útil al residuo, reemplazando otros materiales que se hubieran utilizado para cumplir una función específica o preparando dicho residuo para que cumpla esa función en la instalación o en la economía en general.

- **Unidades de albañilería**

Son los componentes básicos empleados para el rubro de la construcción, el cual se forma a partir de un molde y de la compactación de

diferentes componentes como la arcilla, el cemento y una mezcla de sílice y cal (Cornejo, 2019). Las unidades de albañilería pueden presentarse de diferentes formas como hueca, tubular, alveolar o sólida (Pacco, 2019).

CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 Tipo de investigación

La presente investigación fue de tipo experimental debido a que se manipularon intencionalmente la variable independiente con el propósito de examinar sus efectos sobre la variable dependiente. En el presente caso, se añadió distintas proporciones de relave minero en reemplazo del agregado fino con finalidad de conocer las propiedades físico-mecánicas y de toxicidad de los adoquines de concreto de cada tratamiento.

4.2 Nivel de investigación

Aplicada, porque se reutilizó los relaves mineros como insumo para fabricar adoquines de concreto que pueden ser empleados en la construcción de pavimentos de tránsito peatonal y vehicular.

4.3 Diseño de la investigación

La elaboración de los adoquines de concreto se realizó con cinco tratamientos, los cuales presentaban distintas proporciones de relave en reemplazo del agregado fino, esta sustitución se realizó al 25 %, 50 %, 75 % y 100 %, a su vez, se contó con un tratamiento patrón sin contenido de relave. Se obtuvo un total de 16 adoquines de concreto por cada tratamiento.

Para el análisis de las propiedades físico-mecánicas (resistencia a la compresión, absorción, densidad y tolerancia dimensional) se utilizó un diseño completamente aleatorizado con cinco tratamientos y tres repeticiones.

Tabla 5

Tratamientos y repeticiones para el experimento

Tratamientos	Repeticiones		
	R1	R2	R3
M1 (Control)			
M2 (25% relave)			
M3 (50% relave)			
M4 (75% relave)			
M5 (100% relave)			

Para determinar las propiedades de toxicidad se analizó la lixiviación de metales de un adoquín de concreto por cada tratamiento con contenido de relave.

4.3 Población y muestra de estudio

La población estuvo conformada por 80 adoquines de concreto elaborados con distintas proporciones de relave minero.

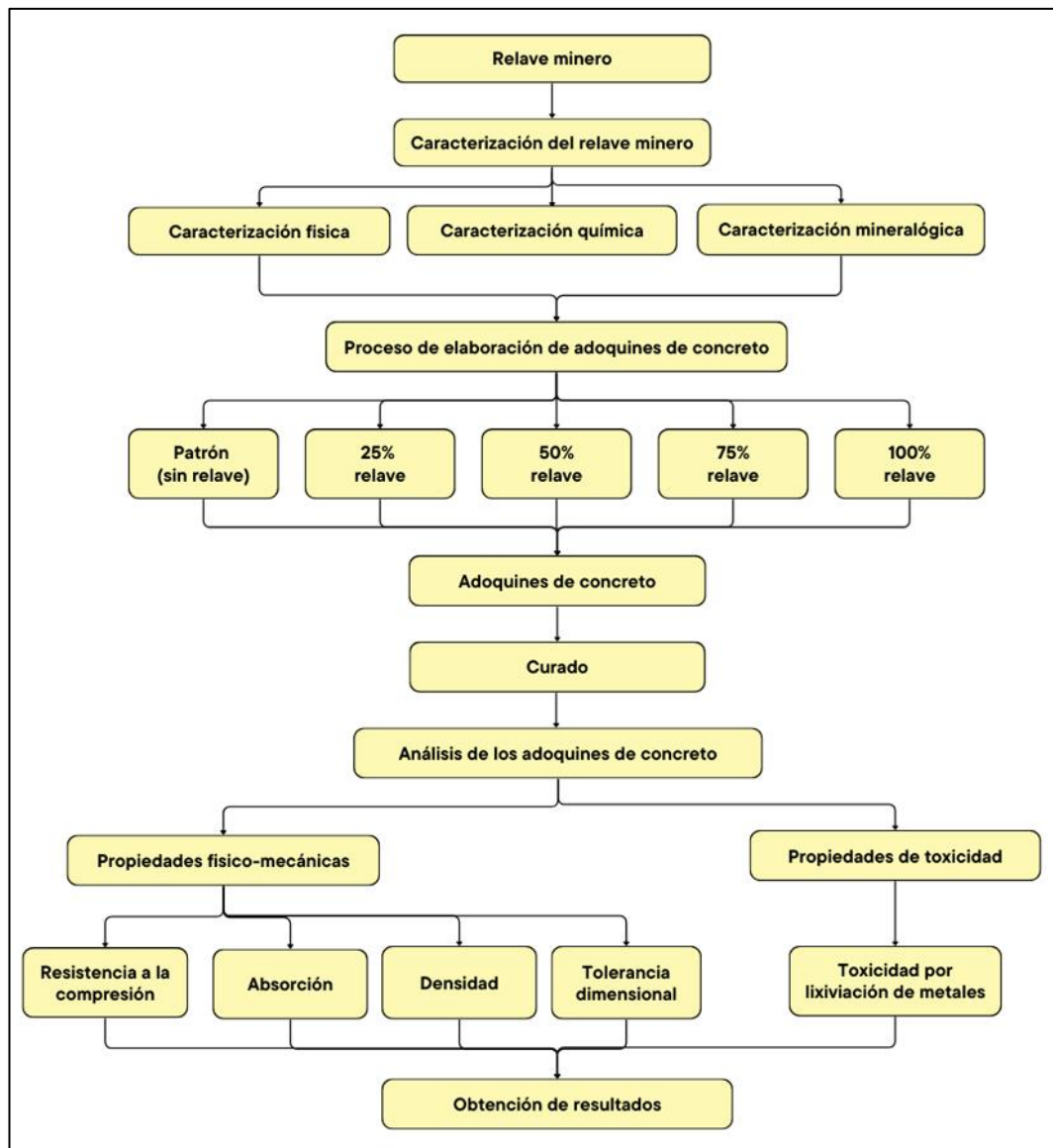
La muestra es de tipo no probabilístico, razón por la cual estuvo compuesta por 80 adoquines de concreto.

4.4 Métodos

El desarrollo de la investigación se detalla en la figura 2.

Figura 2

Flujograma de la investigación



4.4.1 Técnicas aplicadas en la recolección de la información

4.4.1.1 Procedimiento para la caracterización del relave minero

El relave proviene de la unidad minera Tacaza de titularidad de Consorcio de Ingenieros Ejecutores Mineros S.A. La muestra de relave fue proporcionada de manera directa.

Se realizó el método del cuarteo de la totalidad del relave suministrado por Consorcio de Ingenieros Ejecutores Mineros S.A., esto con la finalidad de contar con una muestra representativa para la caracterización del relave.

a. Caracterización física

- **Determinación de la densidad**

La densidad del relave fue determinada mediante el método del picnómetro (Zavaleta, 1992). El análisis fue realizado en el Laboratorio de Química Orgánica de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann.

- **Análisis granulométrico**

El análisis granulométrico del relave se realizó mediante el método de separación por tamices para agregado fino (Tamiz N° 1/2'' – N° 200).

La muestra de relave fue secada en el horno a una temperatura de 110 °C durante 24 horas. Se dispuso 500 g de relave en los tamices y se agitó de manera manual durante 10 minutos. El relave retenido en cada tamiz fue pesado y registrado para el tratamiento de información.

Este ensayo se llevó a cabo en el Laboratorio de Mecánica de Suelos y Concreto de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann.

b. Caracterización química

- **Determinación del pH**

El análisis del pH fue realizado por AGQ Perú S.A.C. mediante el Método 9045D de la U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA), cuyo ensayo se encuentra acreditados por la norma ISO/IEC Standart 17025:2017.

- **Análisis de contenido de metales pesados**

Se identificó los metales contenidos en el relave mediante Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS) realizado por Certificación del Perú S.A., cuyo ensayo se encuentra dentro del marco de la acreditación otorgada por el INACAL-DA.

- **Análisis del potencial de generación de acidez**

El análisis del potencial de generación de acidez fue realizado por AGQ Perú S.A.C., cuyos ensayos de laboratorio se encuentran acreditados por la norma ISO/IEC Standart 17025:2017.

- **Análisis del potencial de generación de acidez**

El Procedimiento de Lixiviación por Características de Toxicidad (TCLP) según el Método 1311 de la U.S. EPA, fue realizado por Certimin S.A., cuyo ensayo se encuentra acreditados por la norma ISO/IEC Standart 17025:2017.

c. Caracterización mineralógica

- **Análisis mineralógico por difracción de rayos X**

Se determinó la composición mineralógica del relave por difracción de rayos X. Este análisis fue realizado por la empresa Bizalab S.A.C. que cuenta con la Certificación ISO 9001:2015.

4.4.1.2 Procedimiento para elaborar los adoquines de concreto

Para elaborar los adoquines de concreto se definió la dosificación del agregado fino, agregado grueso, agua y cemento, que comprenden la mezcla, de tal manera que se pueda obtener un adoquín de control que cumpla con las propiedades físico-mecánicas establecidas en la NTP 399.611.

De acuerdo a lo descrito en la presente investigación, se aprovechó el relave en reemplazo del agregado fino en las proporciones 25 %, 50 %, 75 % y 100 %.

Las dimensiones previstas de los adoquines de concreto fueron 20 cm x 10 cm x 6 cm. La elaboración se realizó en la Fábrica de Boquetas Zeus. El curado de los adoquines se realizó durante 28 días.

Luego de los 28 días de secado, se determinó las características físico-mecánicas y de toxicidad.

4.4.1.3 Procedimiento para analizar las propiedades de los adoquines de concreto

a. Propiedades físico-mecánicas

- **Ensayo de resistencia a la compresión**

La resistencia a la compresión se determinó mediante la aplicación de una fuerza de compresión en la misma dirección en la que el pavimento soporta las cargas. Según la NTP 399.604:2002, se calcula de la siguiente manera:

$$F'c = \frac{F_{carga}}{A_{neta}}$$

Donde:

- $F'c$ = Resistencia a la compresión (kg/cm²)
- F_{carga} = Carga de rotura aplicada indicada por la maquina (kg)
- A_{neta} =Área neta (cm²)

- **Ensayo de absorción**

De acuerdo a la NTP 399.604:2002, INACAL (2022) se determina sumergiendo el adoquín en agua durante 24 horas. Posteriormente, se dejó drenar por 1 minuto, se retira el excedente de agua y se continúa con el pesado (W_s).

Luego de la saturación, los adoquines se dispusieron en un horno entre 100 °C a 115 °C por no menos de 24 horas. Se registró los pesos secos (W_d).

$$\text{Absorción (\%)} = \frac{W_s - W_d}{W_d} \times 100$$

Donde:

- W_s = peso saturado (kg)
- W_d = peso seco al horno (kg)

- **Densidad**

Según la NTP 399.604:2002, la densidad se obtiene al sumergir los adoquines en agua por 24 horas. Seguidamente, se pesa la muestra sujeta a un alambre o malla, mientras está totalmente sumergido en agua (W_i).

Luego, se retira del agua y se deja drenar por 1 minuto, el agua visible se extrae con un pañuelo (W_s).

Luego de la saturación, los adoquines se dispusieron en un horno entre 100 °C a 115 °C por no menos de 24 horas. Se registró los pesos secos (W_d).

$$\text{Densidad (kg/m}^3\text{)} = \frac{W_d}{W_s - W_i} \times 1000$$

Donde:

- W_d = peso seco al horno (kg)
- W_s = peso saturado (kg)
- W_i = peso sumergido (kg)

- **Tolerancia dimensional**

Se realizó la medición del largo, ancho y espesor de los adoquines de concreto de cada tratamiento. Se verificó que el promedio de las dimensiones cumpla con la tolerancia dimensional según la NTP 399.611:2017.

b. Propiedades de toxicidad

El Procedimiento de Lixiviación de Características de Toxicidad (TCLP) según el Método 1311 de la U.S. EPA, fue realizado por Certimin S.A., cuyo ensayo se encuentra acreditados por la norma ISO/IEC Standart 17025:2017.

4.4.2 Instrumentos de la investigación

4.4.2.1 Materiales

- Lampa 1 unidad
- Carretilla 1 unidad
- Plástico 2 m x 1,5 m
- Sacos de polipropileno 4 unidades
- Bolsas ziploc 10 unidades
- Cajas de cartón 5 unidades
- Picnómetro 25 ml
- Tamices 1/2", 3/8", 1/4", N° 4, N° 8, N° 16, N° 30, N° 50, N° 100 y N° 200
- Recipientes metálicos 5 unidades

- Recipientes de plásticos 12 unidades
- Bandeja metálica 1 unidad
- Parrillas metálicas 5 unidades
- Pañuelo 1 unidad
- Guantes de construcción 2 unidades
- Malla metálica 1 unidad
- Cinta métrica 1 unidad
- Vernier digital 1 unidad

4.4.2.2 Equipos

- Balanza digital
- Horno
- Vibrocompactadora

4.5 Análisis estadístico

Para el análisis estadístico de las propiedades físico-mecánicas se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) a un 95 % de confianza ($p < 0,05$) utilizando el software IBM SPSS Statistics 25.

En la tabla 6 se presenta el modelo del análisis de varianza que se utilizó para evaluar los resultados obtenidos.

Tabla 6*Análisis de varianza*

Factor de variabilidad (FV)	Suma de cuadrados (SC)	Grados de libertad (GL)	Cuadrados medios (CM)	F calculado (F)	p-Valor 0,05
Tratamientos					
Error					
Total					

Coefficiente de variabilidad (CV)=

Posterior al ANOVA, de existir un efecto significativo entre los tratamientos, se aplica la prueba de comparación múltiple de Tukey para determinar las diferencias significativas entre las medias de los grupos de experimento.

CAPÍTULO V

TRATAMIENTO DE LOS RESULTADOS

5.1 Resultados

5.1.1 Determinación de las características físicas, químicas y mineralógicas del relave minero de una mina polimetálica

En primera instancia, se realizó el método del cuarteo de los 60 kg de relave proporcionado por Consorcio de Ingenieros Ejecutores Mineros S.A. de la unidad minera Tacaza, esto con la finalidad de contar con una muestra representativa para la caracterización del relave.

5.1.1.1 Caracterización física

a. Determinación de la densidad

La densidad del relave fue determinada mediante el método del picnómetro. Los resultados nos indican que la densidad promedio del relave es de 1,627 g/ml.

b. Análisis granulométrico

El análisis granulométrico del relave se realizó mediante el método de separación por tamices para agregado fino de acuerdo a la NTP 400.012:2021.

En la tabla 7 se presenta el análisis granulométrico obtenido a partir de la separación por tamices del relave. En la figura 3 se muestra la curva granulométrica del relave.

Tabla 7

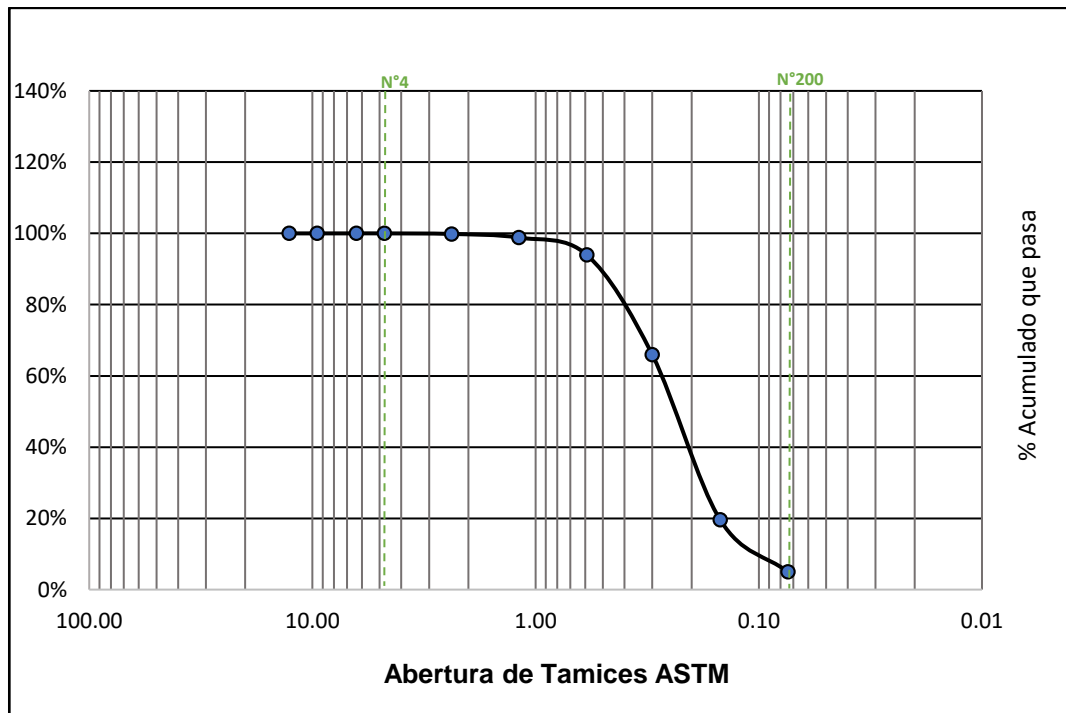
Análisis granulométrico del relave por tamizado

Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (g)	Retenido parcial (%)	Retenido acumulado (%)	Pasa (%)
1/2"	12,700	0	0,00	0,00	100
3/8"	9,525	0	0,00	0,00	100
1/4"	6,350	0	0,00	0,00	100
N°4	4,760	0	0,00	0,00	100
N°08	2,380	0,76	0,16	0,16	99,84
N°16	1,190	4,96	1,03	1,19	98,81
N°30	0,590	23,23	4,83	6,02	93,98
N°50	0,300	134,86	28,06	34,08	65,92
N°100	0,149	222,7	46,33	80,41	19,59
N°200	0,074	70,3	14,62	95,03	4,97
Fondo		23,88	4,97	100	0,00
Total		480,69			

Nota: Esta tabla muestra los resultados del análisis granulométrico del relave.

Figura 3

Curva granulométrica del relave



De acuerdo a los resultados presentados en la tabla 8, se puede verificar que la composición del relave es mayoritariamente de arena con un porcentaje de 95.03 %, con lo cual se clasifica como predominantemente arena con bajo contenido de finos.

Tabla 8

Resultados del análisis granulométrico de la muestra de relave

Muestra	Granulometría		
	Gravas (%)	Arena (%)	Finos (%)
Relave	0,00	95,03	4,97

Nota: Esta tabla muestra la composición del relave a partir de los resultados del análisis granulométrico.

5.1.1.2 Caracterización química

a. Determinación del pH

El relave presenta un pH de 8,03, el cual nos indica una tendencia ligeramente alcalina (Anexo 3).

b. Análisis de metales

Los resultados del análisis de metales del relave se presentan en el anexo 2. Se analizaron los contenidos de metales totales de la muestra de relave con la finalidad de identificar los elementos que destacan en su composición.

Los resultados expuestos en la tabla 9 evidenciaron concentraciones excedentes para el plomo y cadmio respecto al

Estándar de Calidad Ambiental para el Suelo aprobado por el Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM.

Tabla 9

Contenido de metales de la muestra de relave

Parámetros	Resultados (mg/kg)	ECA suelo (mg/kg)		
		Uso residencial/ parques	Uso comercial/ industrial/ extractivo	Uso Agrícola
Arsénico	10,6	50	140	50
Bario	133,7	500	2000	750
Cadmio	7,18	10	22	1,4
Cromo total	28,03	400	1000	**
Cromo VI	<0,4	0,4	1,4	0,4
Mercurio	<0,01	6,6	24	6,6
Plomo	1198	140	800	70
Cianuro libre	<0,5	0.9	8	0,9

Nota: Esta tabla muestra los resultados del análisis de metales del relave, realizado por Certificaciones del Perú S.A., en comparación con los ECA para suelo.

c. Análisis del potencial de generación de acidez

Los resultados del análisis ABA se presentan en el anexo 3. El análisis del potencial de generación de acidez del relave fue realizado mediante el ensayo ABA. Este ensayo es un método que indica si una muestra tiene o no el potencial de producir ácido y de neutralizarlo durante el proceso de interacción con agua.

El conjunto de datos mostrados en la tabla 10 permitieron evaluar el potencial de generación de acidez. Teniendo en cuenta los criterios considerados por Amphos 21 (2022), una muestra no es generadora de ácido si el PN es mayor de 20 kgCaCO₃/tonelada y el RNP es mayor de 3. Es así que, la muestra de relave analizada no es generadora de acidez (RNP=6.99).

Tabla 10

Resultados del análisis ABA para la muestra de relave

Muestra	PA kg CaCO ₃ /t	PN kg CaCO ₃ /t	RNP (PN/PA)	Potencial DAR
Relave	4,69	32,8	6,99	NO PAG

Nota: Esta tabla muestra los resultados del análisis ABA del relave realizado por AGQ Perú S.A.C.

d. Análisis de toxicidad por lixiviación de metales

Los resultados del análisis TCLP se presentan en el anexo 10. El comportamiento de lixiviación de los metales del relave según la prueba TCLP, se presenta en la tabla 11. Los resultados muestran que el relave puede clasificarse como residuo peligroso debido a que el contenido de Pb en el lixiviado supera los límites regulatorios establecidos por U.S. EPA (2023) para la caracterización de toxicidad.

Tabla 11

Resultados del análisis TCLP para la muestra de relave

Metales	Resultados (mg/l)	U.S. EPA (2023) Límite regulatorio (mg/l)
Ag	<0,002	5
As	<0,008	5
Ba	0,046	100
Cd	0,145	1
Cr	0,009	5
Pb	50,06	5
Se	0,05	1

Nota: Esta tabla muestra los resultados del análisis TCLP del relave, realizado por Certimin S.A., en comparación con los límites regulatorios de la U.S. EPA (2023).

5.1.1.3 Caracterización mineralógica

- **Composición mineralógica**

Los resultados del análisis mineralógico se presentan en el anexo 4.

El análisis mineralógico por difracción de rayos X nos permite reconocer las fases cristalinas presentes en la muestra. En el análisis de la muestra de relave se identificó mayoritariamente el Cuarzo que representa aproximadamente el 32 %. Además, se determinó Ortoclasa y Andesina en aproximadamente 29 % y 21 % respectivamente.

En proporciones inferiores se identificó a la Clorita (Clinocloro), mineral laminar, Calcita y Siderita.

Es importante señalar que el relave no contiene sulfuros, tal como se muestra en la tabla 12, causantes de la generación de drenaje ácido.

Tabla 12*Resultados del análisis de difracción de rayos X*

Mineral	Fórmula general	Resultado aproximado (%)
Cuarzo	SiO ₂	32
Ortoclasa	KAlSi ₃ O ₈	29
Andesina	(Ca,Na)(Al,Si) ₄ O ₈	21
Clorita (Clinocloro)	(Mg,Fe) ₅ Al(Si ₃ Al)O ₁₀ (OH) ₈	4
Mineral Laminar*		4
Calcita	CaCO ₃	2
Siderita	FeCO ₃	2
Magnetita	Fe ₃ O ₄	< L. D.
Yeso	CaSO ₄ ·2(H ₂ O)	< L. D.
Zeolita (Heulandita)	(Ca,Na) ₂ - 3Al ₃ (Al,Si) ₂ Si ₁₃ O ₃₆ ·12(H ₂ O)	< L. D.
Cristobalita	SiO ₂	< L. D.
Pirita	FeS ₂	< L. D.

Nota: Esta tabla muestra los resultados de la difracción de rayos X del relave realizado por Bizalab S.A.C.

5.1.2 Elaboración de adoquines de concreto con distintos tratamientos de relave minero en reemplazo del agregado fino

Los adoquines de concreto fueron elaborados en una maquina vibrocompactadora perteneciente a la Fábrica de Bloquetas Zeus ubicado en el distrito de Ciudad Nueva, provincia y departamento de Tacna.

Para la fabricación de los adoquines de concreto para los tratamientos M1, M2, M3, M4 y M5, se consideró una adición de relave en sustitución del agregado fino del 0 % (patrón), 25 %, 50 %, 75 % y 100 % respectivamente.

En la tabla 13 se presenta la dosificación en peso utilizada en la elaboración de los adoquines de concreto. Asimismo, la dosificación de control (M1) fue proporcionada por la empresa C.F.C. Técnicos, Ingenieros y Arquitectos E.I.R.L.

Tabla 13*Dosificación de los adoquines de concreto con adición de relave*

Tratamiento	Dosificación				
	Cemento (kg)	Relave (kg)	Arena (kg)	Piedra (kg)	Agua (kg)
M1	1	0	0,75	1,35	0,27
M2	1	0,19	0,56	1,35	0,27
M3	1	0,375	0,375	1,35	0,27
M4	1	0,56	0,19	1,35	0,27
M5	1	0,75	0	1,35	0,27

Nota: Esta tabla muestra la dosificación de los adoquines de concreto correspondientes a cada tratamiento.

Cabe indicar que las densidades del relave y agregado fino son similares, debido a que la densidad del agregado fino (arena) es de 1,63 g/ml, razón por la cual, el reemplazo no afecta en el volumen de la mezcla de concreto.

En la tabla 14 se presenta la cantidad de insumos empleados para obtener un mínimo de 16 adoquines de concreto por cada mezcla. Esta considera un adicional aproximado del 20 % debido a las posibles pérdidas que se pudieran generar en el traslado, en el proceso de mezcla o por el manejo de máquina de fabricación de adoquines.

Tabla 14

Cantidad de insumos empleados para la producción de adoquines de concreto con adición de relave

Tratamiento	Insumos				
	Cemento (kg)	Relave (kg)	Arena (kg)	Piedra (kg)	Agua (kg)
M1	15	0	11,25	20,25	4
M2	15	2,85	8,4	20,25	4
M3	15	5,63	5,63	20,25	4
M4	15	8,4	2,85	20,25	4
M5	15	11,25	0	20,25	4

Nota: Esta tabla muestra la cantidad total de insumos utilizados para la elaboración de los adoquines de concreto de cada tratamiento.

El curado de los adoquines de concreto se llevó a cabo durante 28 días para luego ser sometidos a los ensayos físico-mecánicos y de toxicidad.

5.1.3 Análisis de las características físico-mecánicas y de toxicidad de los adoquines de concreto

5.1.3.1 Propiedades físico-mecánicas

a. Resistencia a la compresión

Los resultados de la resistencia a la compresión de los adoquines de concreto se presentan en el anexo 6.

El análisis de varianza de la resistencia a la compresión de los distintos tratamientos se expone en la tabla 15. Los resultados señalan que las proporciones de relave en reemplazo del agregado fino, no tienen una influencia significativa en la resistencia a la compresión con un nivel de confianza del 95 % y un coeficiente de variabilidad del 16,706 %.

Tabla 15

Análisis de varianza de la resistencia a la compresión (kg/cm²) de los adoquines de concreto

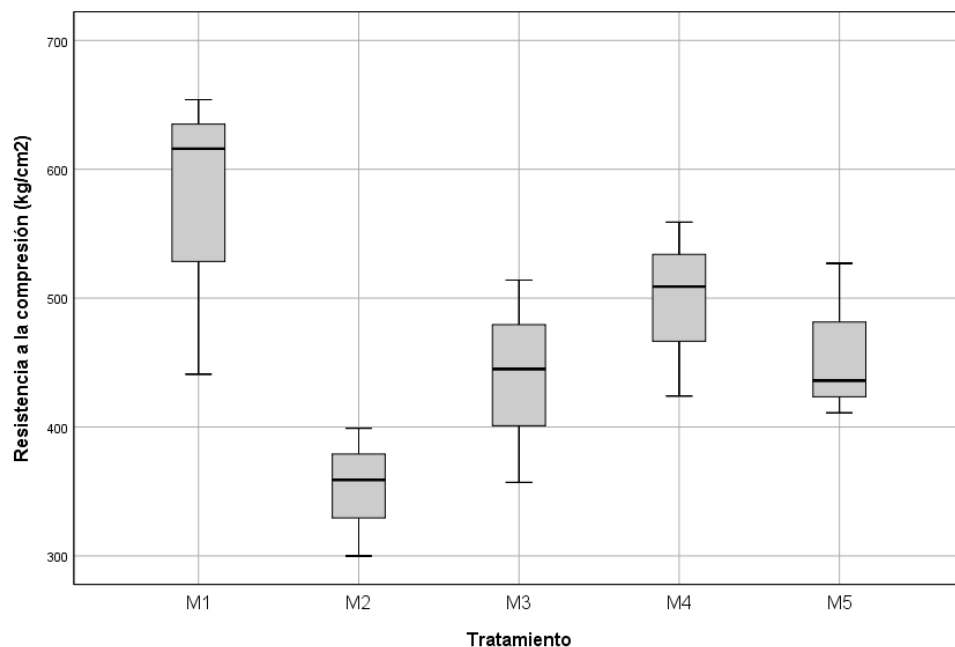
F.V.	S.C.	G.L.	C.M.	Fc	P-value
Tratamientos	76466,933	4	19116,733	3,19	0,062
Error	59928,667	10	5992,867		
Total	136396,6	14			

C.V.= 16,706 %

En la figura 4 se muestra la distribución de los resultados de la resistencia a la compresión obtenidos para cada tratamiento. Entre los tratamientos con contenido de relave, se visualiza que el adoquín de concreto con el 75 % de relave registra el mejor promedio de la resistencia a la compresión en 497,33 kg/cm². No obstante, de acuerdo al análisis de varianza, esta diferencia no es significativa respecto a los demás tratamientos.

Figura 4

Resistencia a la compresión (kg/cm²) de los adoquines de concreto



b. Absorción

Los resultados de la absorción de los adoquines de concreto se presentan en el anexo 7.

El análisis de varianza de la absorción de los tratamientos se expone en la tabla 16. Los resultados señalan que sí existe diferencias significativas entre los tratamientos con un nivel de confianza del 95 % y un coeficiente de variabilidad del 13,039 %.

Tabla 16

Análisis de varianza de la absorción (%) de los adoquines de concreto

F.V.	S.C.	G.L.	C.M.	Fc	P-value
Tratamiento	42,041	4	10,510	13,357	0,001
Error	7,869	10	0,787		
Total	49,910	14			

C.V.= 13,039 %

En la tabla 17 se presenta la prueba de Tukey, la cual nos indica que el promedio de la absorción de los adoquines de concreto de los tratamientos M5, M3, M4 y M2 fueron 8,3067 %, 7,8567 %, 7,6667 % y 6,5167 % respectivamente, y no existe diferencias significativas entre estos tratamientos; sin embargo, dichos tratamientos sí se diferencian significativamente del tratamiento M1 con un promedio de 3,67 %.

Tabla 17

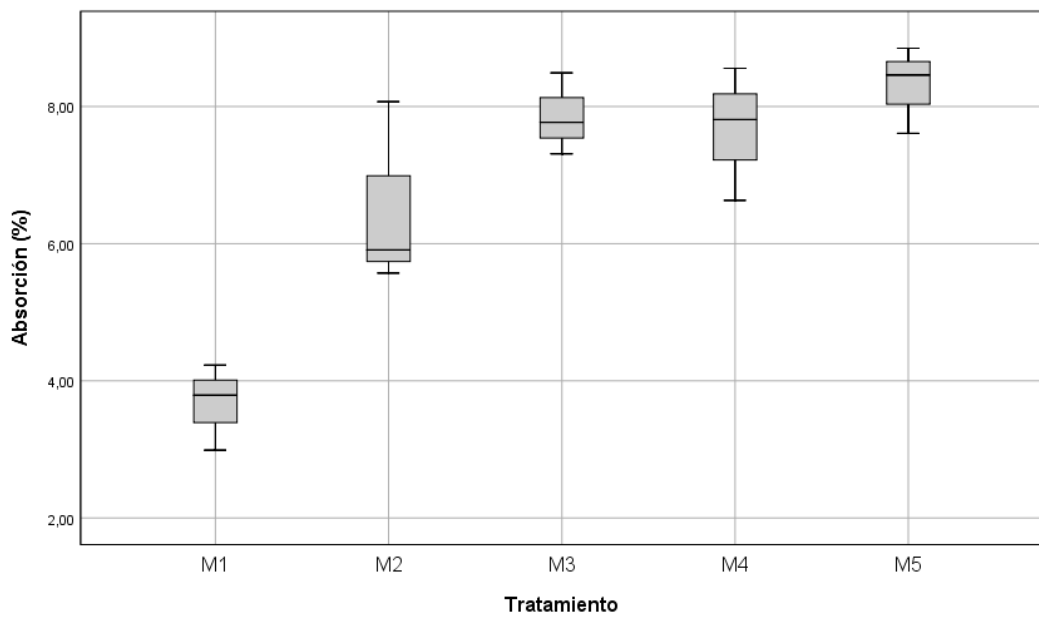
Prueba de comparación múltiple de Tukey ($p < 0,05$) para la absorción de los adoquines de concreto

Tratamiento	N	Media	Significancia
M5 (100 % de relave)	3	8,3067	a
M3 (50 % de relave)	3	7,8567	a
M4 (75 % de relave)	3	7,6667	a
M2 (25 % de relave)	3	6,5167	a
M1 (sin relave)	3	3,6700	b

En la figura 5 se observa que los tratamientos con contenido de relave (M2, M3, M4 y M5) registraron promedios de absorción superiores al tratamiento M1.

Figura 5

Absorción (%) de los adoquines de concreto



c. Densidad

Los resultados de la densidad de los adoquines de concreto se presentan en el anexo 8.

El análisis de varianza de la densidad de los tratamientos se muestra en la tabla 18. Los resultados nos indican que sí existe diferencias significativas entre los tratamientos con un nivel de confianza del 95 % y un coeficiente de variabilidad del 1,749 %.

Tabla 18

Análisis de varianza de la densidad (kg/m³) de los adoquines de concreto

F.V.	S.C.	G.L.	C.M.	Fc	P-value
Tratamientos	50236,574	4	12559,143	9,534	0,002
Error	13172,417	10	1317,242		
Total	63408,991	14			

C.V.= 1,749 %

De acuerdo a la prueba de Tukey presentada en la tabla 19, el promedio de la densidad de los adoquines de concreto de los tratamientos M5, M4 y M3 fueron 2015,12 kg/m³, 2031,52 kg/m³ y 2050,67 kg/m³ respectivamente, siendo menores y diferenciándose significativamente respecto al promedio de la densidad de los adoquines de concreto del tratamiento M1, el cual es de 2174,78 kg/m³.

Tabla 19

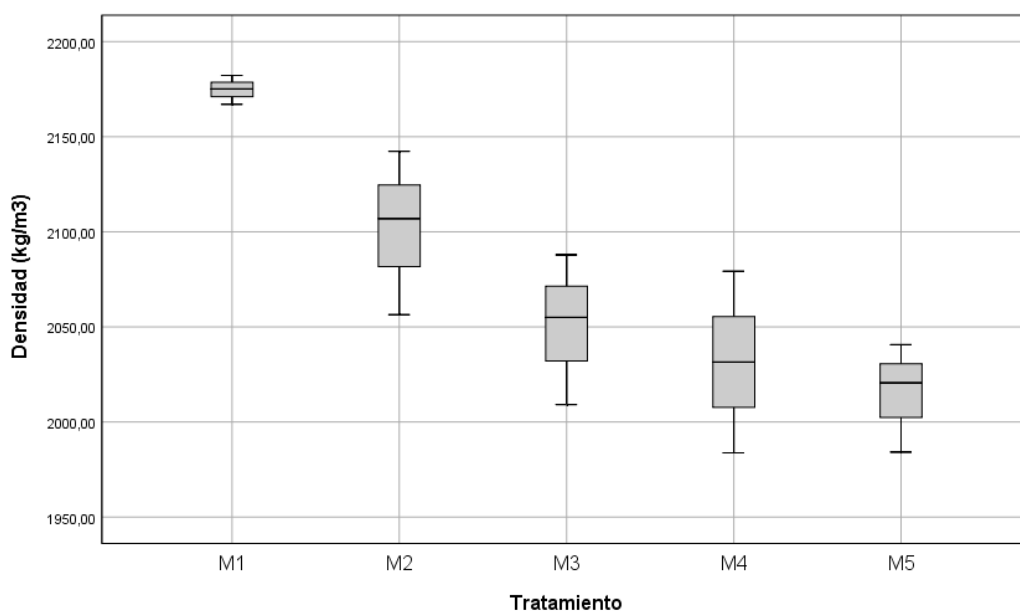
Prueba de comparación múltiple de Tukey ($p < 0,05$) para la densidad de los adoquines de concreto

Tratamiento	N	Media	Significancia	
M1 (sin relave)	3	2174,78	a	
M2 (25 % de relave)	3	2101,87	a	b
M3 (50 % de relave)	3	2050,67		b
M4 (75 % de relave)	3	2031,52		b
M5 (100 % de relave)	3	2015,12		b

En la figura 6 se visualiza que promedio de la densidad de los adoquines de concreto fue disminuyendo a medida que incrementó el porcentaje de sustitución del agregado fino por relave.

Figura 6

Densidad (kg/m³) de los adoquines de concreto



d. Tolerancia dimensional

Los resultados de las dimensiones de los adoquines de concreto (largo, ancho y espesor) se presentan en el anexo 9.

Largo

La prueba de Kruskal Wallis del largo de los adoquines de concreto de cada tratamiento se muestra en la tabla 20. Los

resultados evidencian que no existe diferencias significativas entre los tratamientos con un nivel de confianza del 95 %.

Tabla 20

Prueba de Kruskal Wallis para el largo (mm) de los adoquines de concreto

Tratamiento	N	D.E.	Medianas	H	P value
M1	3	0,58	199	4,13	0,2706
M2	3	0,58	198		
M3	3	0,58	198		
M4	3	0,58	198		
M5	3	0,58	199		

Ancho

El análisis de varianza del ancho de los adoquines de concreto de cada tratamiento se expone en la tabla 21. Los resultados señalan que no existe diferencias significativas entre los tratamientos con un nivel de confianza del 95 % y un coeficiente de variabilidad de 0,433 %.

Tabla 21*Análisis de varianza del ancho (mm) de los adoquines de concreto*

F.V.	S.C.	G.L.	C.M.	Fc	P-value
Tratamiento	2,361	4	0,590	3,187	0,062
Error	1,852	10	0,185		
Total	4,213	14			

C.V.= 0,433 %

Espesor

El análisis de varianza del espesor de los adoquines de concreto de cada tratamiento se presenta en la tabla 22. Los resultados indican que no existe diferencias significativas entre los tratamientos con un nivel de confianza del 95 % y un coeficiente de variabilidad de 0,713 %.

Tabla 22*Análisis de varianza del espesor (mm) de los adoquines de concreto*

F.V.	S.C.	G.L.	C.M.	Fc	P-value
Tratamiento	1,668	4	0,417	2,329	0,127
Error	1,790	10	0,179		
Total	3,458	14			

C.V.= 0,713 %

5.1.3.2 Propiedades de toxicidad

- **Análisis toxicidad por lixiviación de metales**

Los resultados de la lixiviación de metales de los tratamientos con contenido de relaves se presentan en la tabla 23. Los resultados demostraron que la lixiviación de los metales pesados no excede los límites regulatorios establecidos por la U.S. EPA (2023), razón por la cual, los adoquines de concretos obtenidos para cada tratamiento, no se consideran tóxicos ni peligrosos.

Tabla 23

Resultados del análisis TCLP (mg/l) para los tratamientos

Metales	Tratamiento					U.S. EPA (2023) Límite regulatorio (mg/l)
	M1	M2	M3	M4	M5	
Ag	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	5
As	<0,008	<0,008	0,009	0,013	<0,008	5
Ba	0,876	0,722	0,588	0,564	0,497	100
Cd	0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	1
Cr	0,024	0,012	0,048	0,006	0,008	5
Pb	0,06	0,1	0,07	<0,01	0,04	5
Se	<0,02	0,03	0,03	<0,02	0,05	1

Nota: Esta tabla muestra los resultados del análisis TCLP de los adoquines de concreto realizado por Certimin S.A., en comparación con los límites regulatorios de la U.S. EPA (2023).

5.2 Discusión

5.2.1 Discusión de las características físicas, químicas y mineralógicas del relave de una mina polimetálica

Los resultados del estudio nos muestran que la densidad promedio del relave fue de 1,627 g/ml. Este resultado es inferior al registrado por Sant'ana et al. (2017), quien obtuvo un promedio de 3,74 g/ml. A su vez, este resultado es similar al reportado por Argane et al. (2016), en donde el promedio de una muestra es de 1,565 g/ml. No obstante, este resultado es superior al obtenido por Balegamire et al. (2022), que reportó una densidad promedio fue de 1,5 g/ml.

En relación a la granulometría, el relave presenta un 95 % de arena y 4,97 % de finos, clasificándose como arena con bajo contenido de finos. Este resultado es similar al obtenido por Balegamire et al. (2022) cuyo relave comprende un 95,1 % de arena, 0,7 % de limo y 4,2 % de arcilla. Sin embargo, este resultado difiere con aquellos relaves con mayor contenido de finos tales como los reportados por Andrews et al. (2022), cuyo relave presenta 48,7 % de arena, 42 % de limo y 9,3 % de arcilla, y

Manrique y Agurto (2022) cuyas muestras se comprende del 37 % al 67 % de fracciones finas.

En cuanto al pH del relave, se reportó una tendencia ligeramente alcalina con un valor de 8,03. Este resultado difiere al obtenido por Enríquez et al. (2022) y Cordero et al. (2022), quienes registraron un pH neutro con 6,89 y 7 respectivamente. El pH neutro a alcalino se debe principalmente a la presencia de carbonatos. Sin embargo, en el estudio de Andrews et al. (2022), el pH del relave sulfuroso fue de 8,4 lo cual se le atribuye a la presencia en altas concentraciones de cal (17727 mg/kg) utilizada para condicionar el pH durante la extracción del mineral.

Asimismo, otro factor que podría condicionar el pH del relave, en el caso de un antiguo depósito de relave, es la profundidad de la muestra, según Manrique y Agurto (2022), el pH ácido corresponde a relaves “alterados” que se sitúan en la superficie y el pH de cercano a la neutralidad a básico >6,5 corresponden a relaves “inalterados” ubicados a mayor profundidad.

En cuanto al contenido de metales pesados, el relave presentó excedencias de plomo en 1198 mg/kg respecto a los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelo de uso residencial/parques, uso comercial/industrial/extractivo y uso agrícola, cuyos valores máximos permitidos son de 140 mg/kg, 800 mg/kg y 70 mg/kg respectivamente (Ministerio del Ambiente del Perú [MINAM], 2017). Así también, se registró excedencias de cadmio en 7,18 mg/kg respecto a los ECA para suelo de uso agrícola cuyo valor máximo permitido es de 1,4 mg/kg (MINAM, 2017).

La concentración residual de Pb se debe a que el relave proviene de un yacimiento minero polimetálico de Pb, Zn y Ag. Este resultado es significativamente inferior a los obtenidos para otros yacimientos polimetálicos de Pb-Zn, como en las investigaciones de Akhavan y Golchin (2021), Chen et al. (2022) y Helser et al. (2022), quienes reportaron valores de hasta 10000 mg/kg, 13300 mg/kg y 3163 mg/kg respectivamente. Por el contrario, este resultado es superior al registrado por Cordero et al. (2022) cuyo relave contiene 682 mg/kg de Pb.

La concentración de Cd es ligeramente superior a las obtenidas por Chen et al. (2022) y Cordero et al. (2022), quienes obtuvieron 6,91 mg/kg

y 4,3 mg/kg respectivamente. Sin embargo, este resultado es significativamente inferior a las evidenciadas por Helser et al. (2022) y Jaramillo (2018), registrando valores de hasta 95 mg/kg y 36,52 mg/kg.

Según la Agency for Toxic Substances and Disease Registry (2022), los metales pesado que se encuentran con mayor frecuencia y que tienen un mayor potencial de peligrosidad son el As, Pb, Hg y Cd. El relave materia de estudio obtuvo 10,6 mg/kg de As, y concentraciones de Hg por debajo del límite de detección; en consecuencia, no excedieron los ECA para suelo para dichos parámetros (tabla 9).

Respecto al Potencial de Generación de Acidez (PAG) del relave, el factor principal en la producción de ácido y la posterior liberación de elementos potencialmente tóxicos, se debe a la oxidación de minerales de sulfuro, especialmente pirita. Sin embargo, la presencia de cantidades considerables de carbonato y, en menor medida, ciertos silicatos como feldespatos y aluminosilicatos pueden dar lugar a la neutralización del ácido. En la presente investigación, el relave fue clasificado como no PAG (tabla 10), lo cual es consistente con los resultados obtenidos en el análisis mineralógico, en donde no se identificó presencia de sulfuros

(tabla 12). En otras investigaciones que caracterizaron relaves de minas de Pb-Zn, Argane et al. (2016), determinó un carácter no PAG del relave, mientras que Morche (2022) identificó al relave en estudio como PAG.

El análisis de toxicidad por lixiviación de metales se realizó mediante el Procedimiento de Lixiviación con Características de Toxicidad (TCLP), el cual nos permite determinar la movilidad de los metales presentes en desechos líquidos, sólidos y multifacéticos. En caso los resultados excedan los límites máximos de contaminantes para la característica de toxicidad, los productos o desechos son considerados como residuos peligrosos (U.S. EPA, 1992).

De acuerdo con los resultados de la tabla 11, el relave se clasifica como residuo peligroso a causa de la excedencia de Pb en 50,06 mg/l, respecto a los límites regulatorios de toxicidad para Pb (5 mg/l) establecido en Code of Federal Regulations: Toxicity characteristic por U.S. EPA (2023). Este resultado es significativamente inferior al reportado por Argane et al. (2016) que obtuvo 232 mg/l en el relave de la mina Zeida y 152 mg/l en el relave de la mina Bediane, esto a consecuencia de las elevadas concentraciones de Pb que asciende a 4710 mg/kg y 4160

mg/kg respectivamente. A su vez, el valor obtenido en la presente investigación es superior al contenido de Pb en el lixiviado del estudio de Xie et al. (2023) que obtuvo 3,89 mg/l, y de Sant'ana et al. (2017) donde la concentración de Pb estuvo por debajo de los límites de detección; asimismo, en la investigación de Argane et al. (2016), el lixiviado de Pb para la mina Mibladen fue de 5,26 mg/l, aún con el considerable contenido de Pb en 5940 mg/kg, esto se debe al alto contenido de carbonatos del relave (80 %) que mejora su capacidad amortiguadora.

La concentración de Cd en el lixiviado fue de 0,145 mg/l, con lo cual no excede los límites regulatorios de toxicidad para Cd (1 mg/l) (U.S. EPA, 2023), esto a pesar de que sea considerado como uno de los metales pesados con mayor movilidad (Chen et al., 2022).

El análisis mineralógico mostró que la composición mineral del relave está dominada por silicatos, tales como Cuarzo al 32 %, Ortoclasa al 29 %, Andesina al 21 % y Clorita al 4 %. Asimismo, se evidenció la presencia de carbonatos como la Calcita y Siderita, ambas al 2 %.

El alto contenido de silicatos, en especial del cuarzo, según Almeida et al. (2020) brindan propiedades positivas a los materiales de construcción en relación a la durabilidad, resistencia y estabilidad química. El contenido de cuarzo del 32 % que fue identificado en la presente investigación es superior a la registrada por Chen et al. (2022) quien obtuvo hasta el 17 %. Sin embargo, este resultado fue inferior a las investigaciones de Akhavan y Golchin (2021) y Helser et al. (2022) quienes registraron hasta el 67 % y 51 % respectivamente.

Los carbonatos son considerados minerales inhibidores de ambientes ácidos, de acuerdo a Zhao et al. (2024) estos minerales reducen la intensidad de liberación de metales pesados causado principalmente por la presencia de sulfuros. En la presente investigación se determinó un 4 % de carbonatos entre la calcita y siderita, a su vez, se resalta la ausencia de sulfuros. Sin embargo, este resultado difiere considerablemente a investigaciones que evidenciaron altos contenidos de carbonatos y sulfuros, tales como en el estudio de Chen et al. (2022) donde se detectó hasta el 21,8 % de calcita y sulfuros de hasta el 38 % de pirita, así también, Manrique y Agurto (2022) reportó 10,8 % de

carbonatos entre calcita y dolomita, así como 11,1 % de sulfuros entre pirita y arsenopirita.

El relave proviene de un yacimiento polimetálico de Pb, Zn y Ag. En el análisis de contenido de metales se observó la presencia residual de Pb (1198 mg/kg) y Zn (1239 mg/kg); sin embargo, en el análisis mineralógico no se detectaron minerales cristalinos como cerusita o smithsonita, ya que probablemente se encuentren por debajo del límite de detección del método de difracción de rayos X (<1 %).

5.2.2 Discusión de la elaboración de los adoquines de concreto con distintos tratamientos de relave en reemplazo de agregado fino

Para evaluar el potencial de reutilización de los relaves mineros es importante combinar enfoques de caracterización física, química y mineralógica. El relave en estudio mostró resultados adecuados que le permitirían ser un excelente material para construcción, dado al bajo contenido de finos, el alto contenido de silicatos y la ausencia de sulfuros que lo clasifica como un material no PAG.

Los adoquines de concreto para cada tratamiento fueron elaborados en base a la dosificación indicada en la tabla 13. El tratamiento M1 corresponde al adoquín de concreto sin contenido de relave, mientras que los tratamientos M2, M3, M4 y M5 se consideró la adición de relave en sustitución del agregado fino en las proporciones del 25 %, 50 %, 75 % y 100 % respectivamente.

Los adoquines de concreto fueron fabricados con una máquina vibrocompactadoras al igual que en las investigaciones de Jácome et al. (2022), Enríquez et al. (2022) y Sant'ana et al. (2017). Las dimensiones de los moldes de los adoquines de concreto fueron 6 cm de alto, 10 cm de ancho y 20 de largo.

Las proporciones de relave en sustitución de agregado fino dependen de las características del relave, en relación al potencial de generación de acidez (presencia de sulfuros) y la toxicidad de este residuo. El relave materia de estudio de Sant'ana et al. (2017) fue considerado inerte y no peligroso, razón por la cual, se podría emplear dicho relave en mayores proporciones, puesto que no implicarían algún

tipo de riesgo ambiental. Sin embargo, en el caso de los relaves sulfurosos, Huang et al. (2024) sostiene que más del 3% de contenido de sulfuros en los agregados puede causar daños por corrosión, por lo que la proporción de relave en sustitución al agregado fino no debería exceder el 30 %. En consecuencia, en la presente investigación dado que el relave no contiene sulfuros, por ende, tiene un carácter no PAG, se optó por realizar la sustitución hasta el 100 % del agregado fino.

5.2.3 Discusión del análisis de las propiedades físico-mecánicas y de toxicidad de los adoquines de concreto

El promedio de la resistencia a la compresión de los adoquines de concreto con el 0 % (M1), 25 % (M2), 50 % (M3), 75 % (M4) y 100 % (M5) de relave fueron de 570,33 kg/cm², 352,67 kg/cm², 438,67 kg/cm², 497,33 kg/cm² y 458 kg/cm² respectivamente. De acuerdo a la NTP 399.611:2017, los adoquines de concretos correspondientes a los tratamientos M1, M3, M4 y M5, se clasifican como Tipo II, mientras que el tratamiento M2 se categoriza como Tipo I.

Si bien el tratamiento patrón M1 reportó los valores más altos de la resistencia a la compresión en comparación con los tratamientos M2, M3,

M4 y M5, estos resultados no son significativamente diferentes (tabla 15). No obstante, es importante resaltar que entre los tratamientos con contenido de relave, el adoquín de concreto con el 75 % de relave (M4) registra el mejor promedio de la resistencia a la compresión con 497,33 kg/cm². Este resultado es similar al obtenido por Sant'ana et al. (2017) con el 80 % de relave, alcanzando 498,64 kg/cm² (638,34 kg/cm² para la muestra patrón). Sin embargo, estos resultados son superiores a los registrados por Jácome et al. (2022) siendo su mejor promedio 322,43 kg/cm² con el 70 % de relave, Jove y Mamani (2020) con el 75% de relave consiguió una resistencia a la compresión de 182,21 kg/cm² (389,12 kg/cm² para la muestra patrón).

En cuanto a los adoquines de concreto con el 100 % de relave, en la presente investigación se tuvo un promedio de 458 kg/cm², mientras que Balemire et al., (2022) reportó un valor de 269,9 kg/cm² y para la muestra sin relave un valor de 269,02 kg/cm², por lo que no determinó diferencias significativas entre ambos tratamientos.

De acuerdo a Vignesh et al. (2015), la resistencia a la compresión disminuye con la adición de relave; sin embargo, esto difiere con las

investigaciones de Andrews et al. (2022), Xie et al. (2023), Enríquez et al. (2022) y Jácome et al. (2022), en donde el mejor resultado de resistencia a la compresión se obtiene a una determinada proporción de relave.

En cuanto a la absorción de los adoquines de concreto, se observa que los tratamientos con contenido de relave (M2, M3, M4 y M5) registraron promedios de absorción superiores al tratamiento M1 (figura 5). El menor promedio se obtuvo para el tratamiento M1 con 3,67 % y el mayor promedio para el tratamiento M5 con 8,31 %. De acuerdo a la NTP 399.611:2017, la absorción promedio de 3 unidades para adoquines de Tipo I y II no deben exceder el 6 %; sin embargo, los tratamientos M2, M3, M4 y M5 superaron lo establecido en la normativa ya que obtuvieron 6,52 %, 7,86 %, 7,67 % y 8,31 % respectivamente. La influencia del relave en la absorción de agua está relacionada al contenido de finos dado que se tiene una mayor superficie de contacto.

Estos resultados son inferiores a los presentados en la investigación de Jácome et al. (2022) que trabajó con las proporciones de 30 %, 50 % y 70 % de relave alcanzando valores de absorción de agua de 7,83 %, 8,6 % y 8,83 % respectivamente, a su vez, en el estudio de

Enríquez et al. (2022) para las proporciones de 0 %, 20 %, 30 % y 40 %, la absorción de agua fue de 6,64 %, 8,85 %, 7,87 % y 6,57 % respectivamente. En todos estos casos no se cumple con la absorción de agua mínima requerida (6 %) según la NTP 399.611:2017. Sin embargo, sí se cumple la NTP 399.611:2017 en la investigación de Sant'ana et al. (2017) en donde la absorción de los adoquines fue de 2,3 %, 2,2 %, 1,8 % y 0,5 % para las proporciones de del 0 %, 10 %, 20 % y 80 % de relave respectivamente.

El promedio de la densidad de los adoquines de concreto fue disminuyendo a medida que incrementó el porcentaje de sustitución del agregado fino por relave (figura 6). Para los tratamientos M1, M2, M3, M4 y M5 la densidad promedio fue de 2174,78 kg/m³, 2101,87 kg/m³, 2050,67 kg/m³, 2031,52 kg/m³ y 2015,12 kg/m³ respectivamente. La menor densidad promedio se obtuvo para el tratamiento M5 con 2015,12 kg/m³ y el mayor promedio para el tratamiento M1 con 2174,78 kg/m³. Esto se debe a que la densidad del relave (1,627 g/ml) es menor que la densidad del agregado fino (1,630 g/ml).

Estos resultados son consistentes con los reportados por Balegamire et al., (2022), en donde la densidad de los adoquines de concreto sin relave y con el 100 % de relave en reemplazo del agregado fino fue de 2130 kg/m³ y 2090 kg/m³ respectivamente. Sin embargo, en la investigación de Sant'ana et al., (2017), la densidad promedio de los adoquines de concreto fue incrementando a mayor contenido de relave, alcanzando para la muestra patrón un valor de 2150 kg/m³ y para la muestra con 80 % de relave un valor de 2650 kg/m³, esto a causa de que la densidad del relave (3,74 kg/m³) es mayor a la del agregado fino (2,66 kg/m³).

El efecto en la densidad causado por la diferencia de la densidad del relave y agregado fino, también se observa en las investigaciones en donde se elaboraron morteros de construcción. En el caso de Andrews et al., (2022) la densidad del relave fue de 1,38 g/ml y del agregado fino de 1,61 g/ml, y para las proporciones del 0 %, 25 %, 50 %, 75 % y 100 % de relave, se obtuvo 8,4 g/cm³, 8,4 g/cm³, 8,2 g/cm³, 7,9 g/cm³ y 7,6 g/cm³ respectivamente. En el estudio de Argane et al. (2016), densidad de la arena fue de 1400 kg/m³ y la densidad de relave M-Ze, M-Mi y M-Be fue de 1350 kg/m³, 1565 kg/m³ y 1490 kg/m³ respectivamente, por

consiguiente, la densidad de los morteros con relave ascienden a 2258 kg/m³ (10 %), 2290 kg/m³ (20 %), 2307 kg/m³ (30 %) para M-Mi, y en 2218 kg/m³ (10 %), 2245 kg/m³ (20 %) y 2264 kg/m³ (30 %) para M-Be, cuyos valores son superiores a la densidad del mortero patrón (2200 kg/m³); sin embargo, la densidad de los morteros con relave M-Ze fueron inferiores que la muestra patrón en 2185 kg/m³ (10 %), 2180 kg/m³ (20 %) y 2172 kg/m³ (30 %) respectivamente.

Las dimensiones de los adoquines de concreto no se vieron afectadas por los distintos niveles de sustitución de agregado fino por relave (tabla 20, tabla 21 y tabla 22). Según la NTP 399.611:2017, la tolerancia dimensional máxima para la longitud, ancho y espesor es de $\pm 1,6$ mm, $\pm 1,6$ mm y $\pm 3,2$ mm respectivamente. De acuerdo a los resultados (Anexo 9), los adoquines de concreto obtenidos en todos los tratamientos cumplen con la tolerancia dimensional establecida en la norma. De la misma manera, en el estudio realizado por Sant'ana et al. (2017) los adoquines de concreto con 0 %, 10 %, 20 %, 30 % y 80 % de relave en sustitución del agregado fino, cumplen con la variación dimensional. Este factor es esencial para asegurar la aplicabilidad del material de construcción.

Para evaluar la efectividad de la inmovilización de metales pesados debido a la incorporación del relave como insumo de adoquines de concreto, se realizó el análisis de lixiviación de metales mediante la prueba TCLP, según Schreck et al. (2020), este procedimiento proporciona la evaluación de lixiviación más conservadora.

La concentración de metales en los lixiviados obtenido para los tratamientos M2, M3, M4 y M5 (tabla 23) no excedieron los límites regulatorios establecidos en Code of Federal Regulations: Toxicity characteristic por U.S. EPA (2023). En este sentido, los adoquines de concretos correspondientes a cada tratamiento no poseen características tóxicas, por ende, no se consideran materiales peligrosos.

El relave utilizado en la presente investigación contenía altas concentraciones de Pb de 1198 mg/kg y 50,06 mg/l en el lixiviado, atribuyendo este último características de toxicidad. Sin embargo, los adoquines de concreto con el 25 %, 50 %, 75 % y 100 % de relave presentan bajas concentración de Pb en el lixiviado, alcanzando 0,1 mg/l, 0,07 mg/l, <0,01 mg/l, y 0,04 mg/l respectivamente. Esto se debe a que la matriz de cemento reduce la movilización de metales pesados de manera

efectiva. De la misma manera, en las investigaciones de Enríquez et al. (2022) y Argane et al. (2016), los materiales de construcción obtenidos fueron catalogados como no peligrosos.

En la investigación de Enríquez et al. (2022), se reportó 0,001 mg/l de Pb en el lixiviado para los adoquines de concreto, esto debido a que inicialmente el relave contenida bajas concentraciones de Pb en 0,001 mg/l. En contraste, Argane et al. (2016) registró 0,384 mg/l de Pb en el mortero con 30 % de relave, siendo este valor significativamente mayor al obtenido en la presente investigación, esto se debe a que dicho relave inicialmente el contenía 4710 mg/kg de Pb.

El costo de los adoquines de concreto fue estimado considerando únicamente los costos de adquisición de los materiales utilizados para su elaboración, tales como el cemento, agregado fino, agregado grueso, piedra y agua; asimismo, se despreció el costo del relave debido a que al tratarse de un residuo fue obtenido de manera gratuita. En este sentido, el costo de un adoquín de concreto para los tratamientos M1, M2, M3, M4 y M5 fue de S/ 0,74, S/ 0,71, S/ 0.69, S/ 0,67 y S/ 0,64 respectivamente.

CONCLUSIONES

Se aprovechó los relaves de una mina polimetálica como insumo para la elaboración de adoquines de concreto, los cuales presentan resultados de la resistencia a la compresión y tolerancia dimensional que cumplen con la NTP 399.611:2017, a su vez, la incorporación del relave en el concreto asegura la inmovilización de metales pesados, permitiendo que los adoquines de concreto no se clasifiquen como materiales peligrosos.

Se determinó las características física, química y mineralógica del relave de una mina polimetálica. Los resultados evidenciaron que el relave posee propiedades que le permiten ser empleado como sustituto del agregado fino, debido principalmente al bajo contenido de finos, altas concentraciones de silicatos y ausencia de sulfuros que lo categoriza como material no generador de drenaje ácido. Asimismo, el relave presentó altas concentraciones de plomo en el lixiviado, por lo que se categoriza como un residuo peligroso.

Se elaboró adoquines de concreto con distintos tratamientos de relave en reemplazo del agregado fino, esta sustitución se realizó al 25 %, 50 %, 75 % y 100 %, a su vez, se contó con un tratamiento patrón sin contenido de relave. El amplio rango de sustitución se debe a las adecuadas características que presenta el relave para ser empleado como agregados de construcción. Los adoquines de concreto fueron elaborados en una maquina vibrocompactadora y se obtuvo 16 adoquines de concreto por cada tratamiento.

Se analizó las propiedades físico-mecánicas y de toxicidad de los adoquines de concreto elaborados con distintas proporciones de relave. Los resultados de la resistencia a la compresión determinaron que no existe diferencias significativas entre los tratamientos. Según la NTP 399.611:2017, los tratamientos M1, M3, M4 y M5, se clasifican como Tipo II (adoquines para pavimentos de tránsito vehicular ligero) y el tratamiento M2 se categoriza como Tipo I (adoquines para pavimentos de uso peatonal). La absorción de agua de los tratamientos con contenido de relave (M2, M3, M4 y M5) registraron promedios de absorción superiores al tratamiento M1. Los tratamientos M2, M3, M4 y M5 no cumplieron con la absorción máxima establecida en la NTP 399.611:2017. Los adoquines

de concreto mostraron una disminución de la densidad a medida que se incrementa el contenido de relave en los tratamientos. Las dimensiones de los adoquines de concreto de cada tratamiento cumplieron con la tolerancia dimensional máxima de la NTP 399.611:2017. La concentración de metales en los lixiviados para todos los tratamientos no excedió los límites regulatorios establecidos por la U.S. EPA, razón por la cual, los adoquines de concretos no se consideran tóxicos ni peligrosos.

RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar estudios comparativos entre un relave generador y no generador de drenaje ácido para evaluar el efecto en las propiedades físico-mecánicas y de toxicidad del material de construcción.

Se recomienda realizar un estudio a largo plazo de los relaves sulfurosos para evaluar el comportamiento de las propiedades físico-mecánicas y de toxicidad del material de construcción.

Se recomienda considerar, en primer lugar, el reprocesamiento de los relaves que presenten altos contenidos de metales de interés económico.

Se recomienda desarrollar estudios la reutilización de relaves como tecnosoles.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aduvire, O. (2022). Costos de cierre en depósitos de desmontes y presas de relaves generadores de acidez. *Revista de Medio Ambiente Minero y Minería*.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (2022). *ATSDR's Substance Priority List*. ATSDR. <https://www.atsdr.cdc.gov/spl/index.html#2022spl>
- Akhavan, A., & Golchin, A. (2021). Estimation of arsenic leaching from Zn–Pb mine tailings under environmental conditions. *Journal of Cleaner Production*, 295. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126477>
- Almeida, J., Ribeiro, A. B., Santos Silva A., & Faria, P. (2020). Overview of mining residues incorporation in construction materials and barriers for full-scale application. *Journal of Building Engineering*, 29. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101215>
- Amphos 21. (2022). *Uso alternativo de los pasivos ambientales de la ex unidad minera Santa Bárbara*.
- Andrews, A., Nyarko, E. F., Adjaottor, A. A., Nsiah-Baafi, E., & Adom-Asamoah, M. (2022). Reuse and stabilization of sulphide mine tailings as fine aggregate for construction mortar. *Journal of Cleaner Production*, 357(April). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131971>
- Argane, R., Benzaazoua, M., Hakkou, R., & Bouamrane, A. (2016). A comparative study on the practical use of low sulfide base-metal tailings as

aggregates for rendering and masonry mortars. *Journal of Cleaner Production*, 112, 914–925. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.004>

Balegamire, C., Nkuba, B., & Dable, P. (2022). Production of gold mine tailings based concrete pavers by substitution of natural river sand in Misisi, Eastern Congo. *Cleaner Engineering and Technology*, 7(100427). <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100427>

Banco Mundial. (2021, October 27). *Diagnóstico del Sector Minero - Perú*. Diagnóstico Del Sector Minero - Perú. <https://www.bancomundial.org/es/country/peru/publication/diagnostico-del-sector-minero-peru>

Batchelor, B. (2006). Overview of waste stabilization with cement. *Waste Management*, 26(7), 689–698. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.01.020>

Boussen, S., Soubrand, M., Bril, H., Ouerfelli, K., & Abdeljaouad, S. (2013). Transfer of lead, zinc and cadmium from mine tailings to wheat (*Triticum aestivum*) in carbonated Mediterranean (Northern Tunisia) soils. *Geoderma*, 192(1), 227–236. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.08.029>

Cerón, A., & Gutiérrez, C. (2019). Elaboración de unidades de mampostería perforada de concreto utilizando relaves provenientes de la minería de agregados [Tesis de pregrado, Universidad de Santo Tomás]. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Issue 9). <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/18152/2019andreace ron?sequence=16&isAllowed=y>

- Chen, T., Wen, X.-C., Zhang, L.-J., Tu, S.-C., Zhang, J.-H., Sun, R.-N., & Yan, B. (2022). The geochemical and mineralogical controls on the release characteristics of potentially toxic elements from lead/zinc (Pb/Zn) mine tailings. *Environmental Pollution*, 315. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120328>
- Cordero, C., Marchevsky, N., Chiacchiarini, P., & Giaveno, M. (2022a). Caracterización física, química y mineralógica de un antiguo relave, en busca de alternativas de reutilización. *Minería y Geología*, 38, 70–82. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1993-80122022000100070
- Cordero, C., Marchevsky, N., Chiacchiarini, P., & Giaveno, M. (2022b). Caracterización física, química y mineralógica de un antiguo relave, en busca de alternativas de reutilización. *Minería y Geología*, 38, 70–82. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1993-80122022000100070&lng=es&nrm=iso
- Cornejo, A. (2019). Evaluación comparativa de las características físico - mecánicas de unidades de ladrillo tipo king kong de 18 huecos elaboradas en la ladrillera latesan con arcillas y arenas de las canteras de piñipampa y san jerónimo-cusco según la norma E.070. *Universidades*, 70(80), 98–101. <https://doi.org/10.36888/udual.universidades.2019.80.19>
- Enríquez, A., Hermosa, P., Collahuazo, L., Acosta, F., Feijoo, C., Quezada, M., & Ibarra, D. (2022). Estudio de caso para el aprovechamiento de relaves mineros procedentes de la concesión Campanillas, Zamora Chinchipe-Ecuador, como agregado para la elaboración de adoquines. *GEOLatitud*, 5,

34–43.

<http://geolatitud.geoinvestigacion.gob.ec/ojs/ojs/index.php/GeoLatitud/articloe/view/114/101>

Environmental Protection Agency. (1992). *Method 1311: Toxicity Characteristic Leaching Procedure*. <https://www.epa.gov/hw-sw846/sw-846-test-method-1311-toxicity-characteristic-leaching-procedure>

Fourie, A. (2009). Preventing catastrophic failures and mitigating environmental impacts of tailings storage facilities. *Procedia Earth and Planetary Science*, 1(1), 1067–1071. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2009.09.164>

Helser, J., Perumal, P., & Cappuyns, V. (2022). Valorizing (cleaned) sulfidic mine waste as a resource for construction materials. *Journal of Environmental Management*, 319. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115742>

Hidalgo, D., & Poveda, R. (2013). *Obtención de adoquines fabricados con vidrio reciclado como agregado*. Escuela Politécnica Nacional.

Huang, S., Cai, C., Xu, J., Zhu, S., Pi, Z., & Li, H. (2024). Experimental Investigation on the Performance of Cement Mortar by Partial Replacement of the Standard Sands with Sulfide-Contained Iron Tailings. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 36(6). <https://doi.org/https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-17014>

INACAL. (2017). Unidades de albañilería. Adoquines de concreto para pavimentos. Requisitos (NTP 399.611:2017). *Instituto Nacional de La Calidad*.

Jácome, J., Burbano, D., & Núñez, J. (2022). Desarrollo de adoquines a partir de los relaves de mina. *Perfiles*, 1. <https://doi.org/https://doi.org/10.47187/perf.v1i27.151>

Jaramillo, M. (2018). *Caracterización ambiental del manejo de relaves mineros en la planta de beneficio Reina del Cisne II, sitio el Pache Cantón Portovelo, provincia del Oro* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Loja]. <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/handle/123456789/20977>

Jove, F., & Mamani, M. (2020). Adición de relave triturado no toxico en la mezcla para la producción de adoquines de concreto, Ollachea, Puno ,2022 [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. In *Universidad Andina del Cusco*. http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/47102/Gutierrez_RS-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Julca, D. (2022). La economía circular en la minería peruana. *Comisión Económica Para América Latina*, 1–106. www.cepal.org/apps

Kamal, N. L. M., Beddu, S., Syamsir, A., Mohammad, D., Itam, Z., Hamid, Z. A. A., & Manan, T. S. A. (2019). Immobilization of Heavy Metals for Building Materials in the Construction Industry-an Overview. *Materials Today: Proceedings*, 17, 787–791. www.sciencedirect.comwww.materialstoday.com/proceedings2214-7853

Lopes, M., & Pinedo, M. (2015). *Mejoramiento de las características físico mecánicas de adoquines de cemento para pavimentación, adicionando escoria de horno eléctrico en su proceso de fabricación - nuevo Chimbote – 2015*. Universidad Nacional del Santa.

Manrique, M., & Agurto, A. (2022). *Caracterización geoquímica y mineralógica de relaves mineros La Ciénaga – La Libertad*.
<https://hdl.handle.net/20.500.12544/3702>

Mendiola, L. (2019). *Aplicación de economías circulares en minería*. Pontificia Universidad Católica del Perú.

Meza, J., & Mamani, W. (2020). *Estudio de los relaves mineros para la elaboración de ladrillos eco amigables* [Tesis de pregrado, Universidad Privada del Norte]. <https://hdl.handle.net/11537/24461>

Ministerio de Energía y Minas. (1995). *Guía ambiental para el manejo de relaves mineros. Normas Técnicas Para Diseño Ambiental (Guías)*.
<http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/guias/relaveminero.pdf>

Ministerio del Ambiente del Perú. (2017, December 2). *Estándares de Calidad Ambiental para Suelo. Diario El Peruano*.
<https://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueban-estandares-calidad-ambiental-eca-suelo-0>

Morche, W. (2022). *Investigación ambiental y opciones de remediación para los Pasivos Ambientales Mineros de La Ciénaga*. <https://minsus.net/mineria-sustentable/pam/investigacion-ambiental-y-opciones-de-remediacion-para-los-pasivos-ambientales-mineros-de-la-cienaga.pdf>

Pacco, Y. (2019). *Evaluación del comportamiento mecánico de unidades de albañilería de arcilla en muros portantes utilizados en la ciudad de Juliaca, 2018*. Universidad Peruana Unión.

Peña, V., Duran, C., Palominos, F., Benavides, R., & Carrasco, R. (2021). Towards tailings recycled production technologies. *2021 IEEE CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies, CHILECON 2021*. <https://doi.org/10.1109/CHILECON54041.2021.9702970>

Qi, C., & Fourie, A. (2019). Cemented paste backfill for mineral tailings management: Review and future perspectives. In *Minerals Engineering* (Vol. 144, Issue 106025). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106025>

Romero, J. (2020). *Estabilización de suelos de subrasante usando el relave minero de Ticapampa en la carretera EMP.PE 3n (Catac) – túnel Kahuish – Chavin de Huantar – San Marcos – EMP.PE – 14a (Succha) – 2017* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo]. <https://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/4434>

Romero, M., & Salinas, M. (2020). *Estudio experimental del concreto para adoquines tipo II, adicionando relaves mineros*. Universidad Nacional de San Agustín.

Saavedra, R., & Beingolea, R. (2019). *Diseño y elaboración de concretos de alta resistencia usando relaves mineros y material de socavón mina para diseños de 280 kg/cm², 350 kg/cm² y 450 kg/cm²* [Tesis de pregrado,

Universidad Católica de Santa María].
<https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/9624>

Sant'ana, J., Da Silva, S., Cordeiro, G., Castro, J., & Fiorotti, R. (2017). Technical and Environmental Feasibility of Interlocking Concrete Pavers with Iron Ore Tailings from Tailings Dams. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(9).
[https://doi.org/https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.000193](https://doi.org/https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.000193)

Schreck, S., Mahedi, M., & Cetin, B. (2020). Leaching Behavior of Metals and Sulfate from Taconite Tailings Used in Pavement Construction. *Geo-Congress 2020: Geo-Systems, Sustainability, Geoenvironmental Engineering, and Unsaturated Soil Mechanics*, 159–168.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1061/9780784482827.018>

Simonsen, A. M. T., Solismaa, S., Hansen, H. K., & Jensen, P. E. (2020). Evaluation of mine tailings' potential as supplementary cementitious materials based on chemical, mineralogical and physical characteristics. *Waste Management*, 102, 710–721.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.11.037>

United States Environmental Protection Agency. (2023). *Code of Federal Regulations: Toxicity characteristic (40 CFR 261.24)* (7th–1st–23rd ed., Vol. 28). Office of the Federal Register National Archives and Records Administration as a Special Edition of the Federal Register.
<https://www.ecfr.gov/current/title-40/chapter-I/subchapter-I/part-261/subpart-C/section-261.24>

- Velásquez, J., Schwartz, M., Phipps, L., Restrepo-Baena, O., Lucena, J., & Smits, K. (2022). A review of the environmental and health implications of recycling mine tailings for construction purposes in artisanal and small-scale mining communities. *The Extractive Industries and Society*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2021.101019>
- Vignesh, S., Ramalinga Reddy, B. M., & Sindhu Nachiar, S. (2015). Effect of Partial Replacement of Natural Sand With Gold Mine Tailings on Some Properties of Masonry Mortars. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 4(4), 583–586. <https://www.ijert.org/research/effect-of-partial-replacement-of-natural-sand-with-gold-mine-tailings-on-some-properties-of-masonry-mortars-IJERTV4IS040808.pdf>
- Xie, R., Ge, R., Li, Z., Qu, G., Zhang, Y., Xu, Y., Zeng, Y., & Li, Z. (2023). Synthesis and influencing factors of high-performance concrete based on copper tailings for efficient solidification of heavy metals. *Journal of Environmental Management*, 325. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116469>
- Zamora, G., & Hinojosa, O. (2019). Economía circular en minería – Caso de estudio: Producción minera de concentrados de Pb-Ag-Zn en Bolivia. *Revista de Medio Ambiente Minero y Minería*.
- Zavaleta, A. (1992). *Edafología: El suelo en relación con la producción*. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología - CONCYTEC.

Zhao, R., Wu, X., Zhu, G., Zhang, X., Liu, F., & Mu, W. (2024a). ESP_ Revealing the release and migration mechanism of heavy metals in typical carbonate tailings, East China. *Journal of Hazardous Materials*, 464. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132978>

Zhao, R., Wu, X., Zhu, G., Zhang, X., Liu, F., & Mu, W. (2024b). Revealing the release and migration mechanism of heavy metals in typical carbonate tailings, East China. *Journal of Hazardous Materials*, 464. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132978>

ANEXOS

Anexo 1. Matriz de consistencia

Título: Aprovechamiento de relaves minero de una mina polimetálica como insumo para la elaboración de adoquines de concreto, Tacna

Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	Variables	Dimensiones	Indicadores	Metodología
¿Los relaves mineros de una mina polimetálica pueden ser aprovechados como insumo para la elaboración de adoquines de concreto?	Aprovechar los relaves mineros de una mina polimetálica como insumo para la elaboración de adoquines de concreto.	Los relaves mineros de una mina polimetálica sí pueden ser aprovechados como insumo para la elaboración de adoquines de concreto.	1. Variable dependiente Y1 = Adoquines de concreto	Características físicas-mecánicas	- Resistencia a la compresión (kg/cm ²) - Absorción (%) - Densidad (kg/m ³) - Tolerancia dimensional (mm)	Tipo de investigación: Experimental Nivel de investigación: Aplicada Diseño de la investigación: Diseño completamente aleatorizado (DCA) con cinco tratamientos y tres repeticiones. Población y muestra de la investigación: 80 adoquines de concreto con distintas proporciones de relave Técnica de recolección de datos: Las técnicas de investigación se realizarán mediante la caracterización física, química y mineralógica del relave y el análisis de las propiedades físico-mecánicas y de toxicidad de los adoquines de concreto de los tratamientos. Procesamiento y análisis de los datos: IBM SPSS Statistics 25
				Características de toxicidad	- Toxicidad por lixiviación de metales (mg/l)	
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	2. Variable independiente X1 = Relave minero	Caracterización física	- Densidad (g/ml) - Granulometría (%)	
¿Cuáles son las características físicas, químicas y mineralógicas del relave de una mina polimetálica?	Determinar las características físicas, químicas y mineralógicas del relave de una mina polimetálica	Sí es posible determinar las características físicas, químicas y mineralógicas del relave de una mina polimetálica		Caracterización química	- pH - Metales pesados (mg/kg) - Potencial generador de drenaje ácido - Toxicidad por lixiviación de metales (mg/l)	
¿Cómo se elaborarán los adoquines de concreto con distintos tratamientos de relave en reemplazo del agregado fino?	Elaborar adoquines de concreto con distintos tratamientos de relave en reemplazo del agregado fino.	Los adoquines de concreto sí pueden ser elaborados con distintos tratamientos de relave en reemplazo del agregado fino.		Caracterización mineralógica	- Composición mineralógica (%)	
¿Cuáles son las características físico-mecánicas y de toxicidad de los adoquines de concreto?	Analizar las propiedades físico-mecánicas y de toxicidad de los adoquines de concreto.	El análisis de las características físico-mecánicas y de toxicidad sí permite conocer la calidad de los adoquines de concreto.		Porcentaje de relave minero en sustitución del agregado fino	0 % (Patrón), 25 %, 50 %, 75 % y 100 %	

Anexo 2. Informe de ensayo del análisis de metales del relave



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL – DA
CON REGISTRO N° LE - 003



INFORME DE ENSAYO N° 1-08623/23

Pág. 2/3

Análisis Metales:

Ensayo	LDM	Unidad	Resultados
Aluminio (Al)	0,05	mg/kg	13 661
Antimonio (Sb)	0,02	mg/kg	<0,02
Arsénico (As)	0,05	mg/kg	10,60
Bario (Ba)	0,015	mg/kg	133,7
Berilio (Be)	0,015	mg/kg	<0,015
(*) Bismuto (Bi)	0,05	mg/kg	<0,05
(*) Boro (B)	1,0	mg/kg	2,66
Cadmio (Cd)	0,02	mg/kg	7,18
Calcio (Ca)	5,0	mg/kg	23 198
Cobalto (Co)	0,03	mg/kg	9,49
Cobre (Cu)	0,03	mg/kg	3 486
Cromo (Cr)	0,05	mg/kg	28,03
(*) Estaño (Sn)	0,025	mg/kg	1,230
(*) Estroncio (Sr)	0,045	mg/kg	223,8
(*) Fósforo (P)	1,0	mg/kg	1 603
Hierro (Fe)	1,0	mg/kg	25 418
(*) Litio (Li)	0,025	mg/kg	6,65
Magnesio (Mg)	1,0	mg/kg	2 682
Manganeso (Mn)	0,025	mg/kg	2 058
(*) Mercurio (Hg)	0,01	mg/kg	<0,01
(*) Molibdeno (Mo)	0,02	mg/kg	1,118
Níquel (Ni)	0,035	mg/kg	<0,035
Plata (Ag)	0,005	mg/kg	<0,005
Plomo (Pb)	0,02	mg/kg	1 198
Potasio (K)	1,0	mg/kg	1 185
Selenio (Se)	0,05	mg/kg	<0,05
(*) Silicio (Si)	1,0	mg/kg	384
Sodio (Na)	1,0	mg/kg	1 956
Talio (Tl)	0,025	mg/kg	<0,025
(*) Teluro (Te)	0,05	mg/kg	<0,05
(*) Titanio (Ti)	0,05	mg/kg	801
(*) Uranio (U)	0,005	mg/kg	3,647
Vanadio (V)	0,05	mg/kg	79,9
(*) Wolframio (W)	0,05	mg/kg	<0,05
Zinc (Zn)	0,05	mg/kg	1 239

LDM: Límite de detección del método

(*) Los resultados obtenidos corresponden a métodos que no han sido acreditados por el INACAL - DA

Análisis Ambiental:

Ensayos	LDM	Unidad	Resultados
(*) Cianuro Libre	0,5	mg/kg	<0,5
(*) Cromo Hexavalente (VI)	0,4	mg/kg	<0,4

LDM: Límite de detección del método

INFORME DE ENSAYO N° 1-08623/23

Pág. 3/3

MÉTODOS

Metales por ICP-MS: EPA Method 6020B (Preparación de muestra: EPA Method 3051A, 2007). 2014. Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils)

(*)Cianuro Libre: EPA 9013A (Método de preparación) Cyanide Extraction Procedure for Solids and Oils/ SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500 CN F. 23 rd. Ed. 2017. Cyanide extraction procedure for solids and oils /Cyanide. Cyanide-Ion Selective Electrode Method

(*)Cromo Hexavalente (VI): EPA Method 7196A (Preparación de muestra EPA: Method 3060A. Alkaline Digestion for Hexavalent Chromium 1996). 1992. Chromium, Hexavalent (Colorimetric)

OBSERVACIONES

Prohibida la reproducción parcial de este informe, sin la autorización escrita de CERPER S.A.

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de la calidad de la entidad que lo produce.

Callao, 07 de julio de 2023
AA

CERTIFICACIONES DEL PERU SA



FLOR E. SAN MARTÍN BERROCAL
C. O. P. N° 1339
COORDINADOR DE CALIDAD
MEDIO AMBIENTE

DO. CONFORME A LA LEY. POR LA AUTORIDAD. COMPETENTE

Anexo 3. Informe de ensayo del análisis ABA y pH

AGQ Labs		INFORME DE ENSAYO		IAS ACCREDITED Según Resolución R. 002	
Nº de Referencia:	MN-23/014756	Registrada en:	AGQ Perú	Cliente (*):	UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE
Análisis:	GEO-PR-0002	Centro Análisis:	AGQ Perú	Domicilio (*):	AV. MIRAFLORES NRO. 5N CERCADO
Tipo Muestra:	SUELO (MN)	Fecha Recepción:	02/10/2023	Contrato:	QMT-PE230900501
Fecha Inicio:	02/10/2023	Fecha Fin:	09/10/2023	Cliente 3º(*):	---
Descripción(*):	R-01				
Fecha/Hora Muestreo:	24/05/2023 10:00	Muestreado por:	*Cliente (*)		
Lugar de Muestreo:	Unidad Minera Tacaza			Coordenadas x,y:	315110 8271514
Punto de Muestreo:	R-01				

A continuación se exponen el Informe de Ensayo y Anexo Técnico asociados a la muestra, en los cuales se pueden consultar toda la información relacionada con los ensayos realizados.

Los resultados reflejados en el presente informe se refieren únicamente a la muestra tal como es recibida en el laboratorio y sometida a ensayo. Queda prohibida la reproducción parcial de este informe sin la aprobación por escrito del laboratorio. AGQ no se hace responsable de la información proporcionada por el cliente, tanto la asociada a la toma de muestras realizada por él como a otros datos descriptivos, marcados con (*) y que se encuentran fuera de nuestro alcance de Acreditación.



Edwin Aucapiña Ramos

FECHA EMISIÓN: 10/10/2023

OBSERVACIONES (*):

Nº de Referencia: MN-23/014756
 Descripción(*): R-01

Tipo Muestra: SUELO (MN)
 Fecha Fin: 09/10/2023

RESULTADOS ANALITICOS

Parámetro	Resultado	Unidades	Incert	CMA
Test ABA				
Azufre Total	0,22	%	±0,018	
Grado de Efervescencia	3		-	
pH	8,03	Unidades de pH	±0,16	
Potencial de Acidez Maximo (MPA)	4,690	Kg CaCO3/Ton	±0,38	
Potencial de Neutralización Neto (PNN)	28,1	Kg CaCO3/Ton	±8%	
Potencial Neutralización Lawrence	32,8	Kg CaCO3/Ton	±2%	
Ratio Potencial de Neutralización (RNP)	6,99		±8%	
Sulfato Total	0,07	% S	±8%	
Sulfuro Total	0,15	%	±0,012	

Nota. A: Ensayo subcontratado y acreditado. N: Ensayo subcontratado y no acreditado. RE: Recuento en placa estimado. Los resultados emitidos, no han sido corregidos con valores de recuperación. Las incertidumbres de los parámetros acreditados están calculadas y a disposición del cliente. La Incertidumbre aplicada al resultado no aplica para valores menores al Límite de Cuantificación (LC). La Incert Exp (U) ha sido reportada con un Factor de Cobertura k= 2, para un nivel de confianza aprox del 95%.

(* Ensayo No cubierto por la Acreditación nº TL-502 emitida por IAS.


Nº de Referencia: MN-23/014756
 Descripción(*): R-01

Tipo Muestra: SUELO (MN)
 Fecha Fin: 09/10/2023

ANEXO TECNICO

Parámetro	PNT	Técnica	Ref. Norma.	Lim Cuantif/ Detec (#)
Test ABA				
Azufre Total	PE-4408	Anal. Elemental		0,01 %
Grado de Efervescencia	PE-4409	Inspec Visual		0,0
pH	PE-4416	Electrometría		2,00 Unidades de pH
Potencial de Acidez Maximo (MPA)	PE-4407	Calculado		0,3125 Kg CaCO3/Ton
Potencial de Neutralización Neto (PNN)	PE-4407	Calculado		-500 Kg CaCO3/Ton
Potencial Neutralización Lawrence	PE-4403	Volumetría		-500 Kg CaCO3/Ton
Ratio Potencial de Neutralización (RNP)	PE-4407	Calculado		-161
Sulfato Total	PE-4005	Anal. Elemental		0,01 % S
Sulfuro Total	PE-4016	Anal. Elemental		0,01 %

Anexo 4. Informe de ensayo del análisis mineralógico del relave

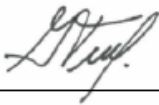
		INFORME DE ENSAYO	IL-001MI-2317 Rev. 0 06/10/2023
III. ANALISIS MINERALÓGICO POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X			
Muestra R-01			
Nombre del mineral	Fórmula general	Resultado Aproximado (%)	
Cuarzo	SiO ₂	32	
Feldespato - K (Ortoclasa)	KAISi ₃ O ₈	29	
Plagioclasa (Andesina)	(Ca,Na)(Al,Si) ₄ O ₈	21	
Clorita (Clinocloro)	(Mg,Fe) ₅ Al(Si ₃ Al)O ₁₀ (OH) ₈	4	
Mineral Laminar*	----	4	
Calcita	CaCO ₃	2	
Siderita	FeCO ₃	2	
Magnetita	Fe ₃ O ₄	< L. D.	
Yeso	CaSO ₄ ·2(H ₂ O)	< L. D.	
Zeolita (Heulandita)	(Ca,Na) ₂ -3Al ₃ (Al,Si) ₂ Si ₁₃ O ₃₆ ·12(H ₂ O)	< L. D.	
Cristobalita	SiO ₂	< L. D.	
Pirita	FeS ₂	< L. D.	

() Mineral de la familia que se encuentra con mayor grado de certeza.

* Mineral laminar: Fase probable de mica y/o arcilla, que requiere de otra técnica complementaria para ser determinada.

Aprobado por:

Gerente General: Erika Gabriel




Informe de Ensayo No: IL-001MI-2317			
REV	EDICION	EMITIDO PARA	FECHA
0	Primera	Información	06-Oct-2023

Descargo de Responsabilidad: Los resultados de los ensayos pertenecen solo a las muestras ensayadas y no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con Normas del Producto o como certificado del Sistema de Calidad de la entidad que lo produce.

Anexo 5. Resultados de la resistencia a la compresión (kg/cm²) de los adoquines de concreto

N° de repeticiones	Tratamiento	Resistencia a la compresión (kg/cm²)
1	M1 (sin relave)	654
2	M1 (sin relave)	616
3	M1 (sin relave)	441
1	M2 (25 % de relave)	300
2	M2 (25 % de relave)	399
3	M2 (25 % de relave)	359
1	M3 (50 % de relave)	514
2	M3 (50 % de relave)	445
3	M3 (50 % de relave)	357
1	M4 (75 % de relave)	509
2	M4 (75 % de relave)	424
3	M4 (75 % de relave)	559
1	M5 (100 % de relave)	411
2	M5 (100 % de relave)	436
3	M5 (100 % de relave)	527

Anexo 6. Informes de ensayo de la resistencia a la compresión (kg/cm²) de los adoquines de concreto



Universidad Privada de Tacna
Sin Fines de Lucro

**LABORATORIO DE MECÁNICA
DE SUELOS, CONCRETOS Y
PAVIMENTOS**

INFORME DE ENSAYO Número de Páginas: 2

CÓDIGO 2448C-099-1-2023
MÉTODOS DE MUESTREO Y ENSAYO DE UNIDADES DE ALBAÑILERÍA DE CONCRETO
NTP 399.604 2002 (revisada el 2015)

Proyecto (*) : APROVECHAMIENTO DE RELAVES MINEROS COMO INSUMO PARA LA ELABORACIÓN DE ADOQUINES DE CONCRETO, TACNA

Cliente (*) : UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE G.

RUC/DNI (*) : 20147796834 **Correo (*):** andreamosm15@gmail.com **Teléf. / Celular (*):** 935090121

Fecha de ensayo: 2023-10-27 **Hora del ensayo:** 11:23 Hrs. **Fecha de emisión del informe:** 2023-10-30

Temperatura ambiente: 24,9 °C **Humedad:** 45, % **Ensayo realizado en:** Ambiente del Laboratorio de Ensayos especiales con acceso restringido.

1. TABLA DE DATOS DEL ENSAYO

N°	CÓDIGO DE LA MUESTRA	AREA SUPERIOR			AREA INFERIOR			AREA BRUTA (mm ²)	CARGA MÁXIMA kN	RESISTENCIA A LA COMPRESION	
		Largo (mm.)	Ancho (mm.)	Area (mm ²)	Largo (mm.)	Ancho (mm.)	Area (mm ²)			MPa	kg/cm ²
1	2448-099-M1	199,0	100,0	19 900	200,0	99,5	19 900	1 277,10	64,2	654	
2	2448-099-M2	200,0	100,0	20 000	200,0	100,0	20 000	1 209,10	60,5	616	
3	2448-099-M3	199,5	99,5	19 850	199,2	99,9	19 900	860,50	43,3	441	

Los resultados presentados son válidos únicamente para las muestras ensayadas

2. DE LA IDENTIFICACIÓN DE MUESTRAS

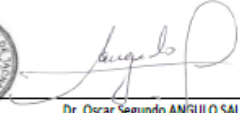
Código Asignado por el Cliente (*)	Observación	Código asignado Por el Laboratorio	Fecha de Recepción (**)
M1-1	Adoquín de concreto	2448C-099-M1	2023-10-27
M1-2		2448C-099-M2	2023-10-27
M1-3		2448C-099-M3	2023-10-27

Consideraciones

- (*) Datos brindados por el cliente.
- (**) Fecha en la que las muestras se internaron en el Laboratorio.
- Las muestras fueron proporcionadas por el cliente.
- Las muestras fueron recibidas a las 16:35
- El ensayo fue realizado por el Técnico II del Laboratorio: Isidro Barrios Herrera.
- El ensayo fue solicitado por Andrea Pamela Ramos medina identificada con DNI 72960109, consignando como cuenta de correo: andreamosm15@gmzal.com

Está prohibida la reproducción total o parcial del informe de ensayo sin la autorización por escrito del Laboratorio de Mecánica de Suelos, Concretos y Pavimentos de la Universidad Privada de Tacna

- (fin del Informe) -



Dr. Oscar Segundo ANGULO SALAS
Jefe del Laboratorio de Mecánica de Suelos, Concretos y Pavimentos
Universidad Privada de Tacna



INFORME DE ENSAYO

Número de Páginas: 2

CÓDIGO 2448C-099-2-2023
MÉTODOS DE MUESTREO Y ENSAYO DE UNIDADES DE ALBAÑILERÍA DE CONCRETO
NTP 399.604 2002 (revisada el 2015)

Proyecto (*)	: APROVECHAMIENTO DE RELAVES MINEROS COMO INSUMO PARA LA ELABORACIÓN DE ADOQUINES DE CONCRETO, TACNA		
Cliente (*)	: UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE G.		
RUC/DNI (*)	: 20147796634	Correo (*)	: andreamosm15@gmail.com
		Teléf. / Celular (*)	: 935090121
Fecha de ensayo:	2023-10-27	Hora del ensayo:	11:23 Hrs.
Temperatura ambiente:	24,9 °C	Humedad:	45, %
		Fecha de emisión del informe:	2023-10-30
		Ensayo realizado en:	Ambiente del Laboratorio de Ensayos especiales con acceso restringido.

1. TABLA DE DATOS DEL ENSAYO

N°	CÓDIGO DE LA MUESTRA	AREA SUPERIOR			AREA INFERIOR			AREA BRUTA (mm²)	RESISTENCIA A LA COMPRESION		
		Largo (mm.)	Ancho (mm.)	Area (mm²)	Largo (mm.)	Ancho (mm.)	Area (mm²)		kN	MPa	kg/cm²
1	2448-099-M4	198,0	98,0	19 404	198,0	98,0	19 404	19 404	570,15	29,4	300
2	2448-099-M5	198,0	98,4	19 483	198,2	98,3	19 483	19 483	783,10	39,2	399
3	2448-099-M6	198,0	99,0	19 602	199,0	98,5	19 602	19 602	690,20	35,2	359

Los resultados presentados son válidos únicamente para las muestras ensayadas

2. DE LA IDENTIFICACIÓN DE MUESTRAS

Código Asignado por el Cliente (*)	Observación	Código asignado Por el Laboratorio	Fecha de Recepción (**)
M2-1	Adoquín de concreto con 25% de relave	2448C-099-M4	2023-10-27
M2-2		2448C-099-M5	2023-10-27
M2-3		2448C-099-M6	2023-10-27

Consideraciones

- (*) Datos brindados por el cliente.
- (**) Fecha en la que las muestras se internaron en el Laboratorio.
- Las muestras fueron proporcionadas por el cliente.
- Las muestras fueron recibidas a las 10:35
- El ensayo fue realizado por el Técnico II del Laboratorio: Isidro Barrios Herrera.
- El ensayo fue solicitado por Andrea Pamela Ramos medina identificada con DNI 72960109, consignando como cuenta de correo: andreamosm15@gmzal.com

Está prohibida la reproducción total o parcial del informe de ensayo sin la autorización por escrito del Laboratorio de Mecánica de Suelos, Concretos y Pavimentos de la Universidad Privada de Tacna

-(fin del Informe) -



Dr. Oscar Segundo ANGULO SALAS
Jefe del Laboratorio de Mecánica de Suelos, Concretos y Pavimentos
Universidad Privada de Tacna



INFORME DE ENSAYO

Número de Páginas: 2

CÓDIGO 2448C-099-3-2023
MÉTODOS DE MUESTREO Y ENSAYO DE UNIDADES DE ALBAÑILERÍA DE CONCRETO
NTP 399.604 2002 (revisada el 2015)

Proyecto (*)	: APROVECHAMIENTO DE RELAVES MINEROS COMO INSUMO PARA LA ELABORACIÓN DE ADOQUINES DE CONCRETO, TACNA		
Cliente (*)	: UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE G.		
RUC/DNI (*)	: 20147796634	Correo (*):	andreamosm15@gmail.com
		Teléf. / Celular (*):	935090121
Fecha de ensayo:	2023-10-27	Hora del ensayo:	11:23 Hrs.
Temperatura ambiente:	24,9 °C	Humedad:	45, %
		Fecha de emisión del informe:	2023-10-30
		Ensayo realizado en:	Ambiente del Laboratorio de Ensayos especiales con acceso restringido.

1. TABLA DE DATOS DEL ENSAYO

N°	CÓDIGO DE LA MUESTRA	AREA SUPERIOR			AREA INFERIOR			AREA BRUTA (mm²)	CARGA MÁXIMA (kN)	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	
		Largo (mm.)	Ancho (mm.)	Area (mm²)	Largo (mm.)	Ancho (mm.)	Area (mm²)			MPa	kg/cm²
1	2448-099-M7	196,0	98,0	19 208	196,3	97,9	19 218	19 213	968,40	50,4	514
2	2448-099-M8	198,0	98,0	19 404	198,0	98,0	19 404	19 404	846,40	43,6	445
3	2448-099-M9	198,0	98,0	19 404	198,0	98,0	19 404	19 404	678,70	35,0	357

Los resultados presentados son válidos únicamente para las muestras ensayadas

2. DE LA IDENTIFICACIÓN DE MUESTRAS

Código Asignado por el Cliente (*)	Observación	Código asignado Por el Laboratorio	Fecha de Recepción (**)
M3-1	Adoquín de concreto con 50% de relave	2448C-099-M7	2023-10-27
M3-2		2448C-099-M8	2023-10-27
M3-3		2448C-099-M9	2023-10-27

Consideraciones

- (*) Datos brindados por el cliente.
- (**) Fecha en la que las muestras se internaron en el Laboratorio.
- Las muestras fueron proporcionadas por el cliente.
- Las muestras fueron recibidas a las 18:35
- El ensayo fue realizado por el Técnico II del Laboratorio: Isidro Barrios Herrera.
- El ensayo fue solicitado por Andrea Pamela Ramos medina identificada con DNI 72980109, consignando como cuenta de correo: andreamosm15@gmzal.com.

Está prohibida la reproducción total o parcial del informe de ensayo sin la autorización por escrito del Laboratorio de Mecánica de Suelos, Concretos y Pavimentos de la Universidad Privada de Tacna

-(fin del Informe)-



Dr. Oscar Segundo ANGULO SALAS

Jefe del Laboratorio de Mecánica de Suelos, Concretos y Pavimentos
Universidad Privada de Tacna



INFORME DE ENSAYO

Número de Páginas: 2

CÓDIGO 2448C-099-4-2023
MÉTODOS DE MUESTREO Y ENSAYO DE UNIDADES DE ALBAÑILERÍA DE CONCRETO
NTP 399.604 2002 (revisada el 2015)

Proyecto (*)	APROVECHAMIENTO DE RELAVES MINEROS COMO INSUMO PARA LA ELABORACIÓN DE ADOQUINES DE CONCRETO, TACNA		
Cliente (*)	UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE G.		
RUC/DNI (*)	20147796634	Correo (*):	andreamosm15@gmail.com
		Teléf. / Celular (*):	935090121
Fecha de ensayo:	2023-10-27	Hora del ensayo:	11:23 Hrs.
Temperatura ambiente:	24,9 °C	Humedad:	45, %
		Fecha de emisión del informe:	2023-10-30
		Ensayo realizado en:	Ambiente del Laboratorio de Ensayos especiales con acceso restringido.

1. TABLA DE DATOS DEL ENSAYO

N°	CÓDIGO DE LA MUESTRA	AREA SUPERIOR			AREA INFERIOR			AREA BRUTA (mm²)	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN		
		Largo (mm.)	Ancho (mm.)	Area (mm²)	Largo (mm.)	Ancho (mm.)	Area (mm²)		CARGA MÁXIMA (kN)	MPa	kg/cm²
1	2448-099-M10	198,0	100,0	19 800	198,0	99,0	19 802	19 801	977,50	49,9	509
2	2448-099-M11	199,0	99,0	19 701	199,5	98,8	19 711	19 706	820,00	41,6	424
3	2448-099-M12	199,0	99,6	19 820	199,6	99,3	19 820	19 820	1 087,10	54,8	559

Los resultados presentados son válidos únicamente para las muestras ensayadas

2. DE LA IDENTIFICACIÓN DE MUESTRAS

Código Asignado por el Cliente (*)	Observación	Código asignado Por el Laboratorio	Fecha de Recepción (**)
M4-1	Adoquín de concreto con 75% de relave	2448C-099-M10	2023-10-27
M4-2		2448C-099-M11	2023-10-27
M4-3		2448C-099-M12	2023-10-27

Consideraciones

- (*) Datos brindados por el cliente.
- (**) Fecha en la que las muestras se internaron en el Laboratorio.
- Las muestras fueron proporcionadas por el cliente.
- Las muestras fueron recibidas a las 16:35
- El ensayo fue realizado por el Técnico II del Laboratorio: Isidro Barrios Herrera.
- El ensayo fue solicitado por Andrea Pamela Ramos medina identificada con DNI 72960109, consignando como cuenta de correo: andreamosm15@gmzal.com

Está prohibida la reproducción total o parcial del informe de ensayo sin la autorización por escrito del Laboratorio de Mecánica de Suelos, Concretos y Pavimentos de la Universidad Privada de Tacna

-(fin del Informe) -



Dr. Oscar Segundo ANGULO SALAS
Jefe del Laboratorio de Mecánica de Suelos, Concretos y Pavimentos
Universidad Privada de Tacna



INFORME DE ENSAYO

Número de Páginas: 2

CÓDIGO 2448C-099-5-2023
MÉTODOS DE MUESTREO Y ENSAYO DE UNIDADES DE ALBAÑILERÍA DE CONCRETO
NTP 399.604 2002 (revisada el 2015)

Proyecto (*)	APROVECHAMIENTO DE RELAVES MINEROS COMO INSUMO PARA LA ELABORACIÓN DE ADOQUINES DE CONCRETO, TACNA		
Cliente (*)	UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE G.		
RUC/DNI (*)	20147796634	Correo (*):	andreamosm15@gmail.com
		Teléf. / Celular (*):	935090121
Fecha de ensayo:	2023-10-27	Hora del ensayo:	11:23 Hrs.
Temperatura ambiente:	24,9 °C	Humedad:	45, %
		Fecha de emisión del informe:	2023-10-30
		Ensayo realizado en:	Ambiente del Laboratorio de Ensayos especiales con acceso restringido.

1. TABLA DE DATOS DEL ENSAYO

N°	CÓDIGO DE LA MUESTRA	AREA SUPERIOR			AREA INFERIOR			AREA BRUTA (mm²)	CARGA MÁXIMA kN	RESISTENCIA A LA COMPRESION	
		Largo (mm.)	Ancho (mm.)	Area (mm²)	Largo (mm.)	Ancho (mm.)	Area (mm²)			MPa	kg/cm²
1	2448-099-M13	196,0	100,0	19 600	196,0	100,0	19 600	19 600	789,90	40,3	411
2	2448-099-M14	199,0	99,0	19 701	199,0	99,0	19 701	19 701	842,30	42,8	436
3	2448-099-M15	199,0	99,0	19 701	199,0	99,0	19 701	19 701	1 018,20	51,7	527

Los resultados presentados son válidos únicamente para las muestras ensayadas

2. DE LA IDENTIFICACIÓN DE MUESTRAS

Código Asignado por el Cliente (*)	Observación	Código asignado Por el Laboratorio	Fecha de Recepción (**)
M5-1	Adoquín de concreto con 100% de relave	2448C-099-M13	2023-10-27
M5-2		2448C-099-M14	2023-10-27
M5-3		2448C-099-M15	2023-10-27

Consideraciones

- (*) Datos brindados por el cliente.
- (**) Fecha en la que las muestras se internaron en el Laboratorio.
- Las muestras fueron proporcionadas por el cliente.
- Las muestras fueron recibidas a las 16:35
- El ensayo fue realizado por el Técnico II del Laboratorio: Isidro Barrios Herrera.
- El ensayo fue solicitado por Andrea Pamela Ramos medina identificada con DNI 72960109, consignando como cuenta de correo: andreamosm15@gmzal.com

Está prohibida la reproducción total o parcial del informe de ensayo sin la autorización por escrito del Laboratorio de Mecánica de Suelos, Concretos y Pavimentos de la Universidad Privada de Tacna

-(fin del Informe) -



Dir. Oscar Segundo ANGULO SALAS

Jefe del Laboratorio de Mecánica de Suelos, Concretos y Pavimentos
Universidad Privada de Tacna

Anexo 7. Resultados de la absorción (%) de los adoquines de concreto

N° de repeticiones	Tratamiento	Absorción (%)
1	M1 (sin relave)	4,23
2	M1 (sin relave)	2,99
3	M1 (sin relave)	3,79
1	M2 (25 % de relave)	5,57
2	M2 (25 % de relave)	5,91
3	M2 (25 % de relave)	8,07
1	M3 (50 % de relave)	8,49
2	M3 (50 % de relave)	7,77
3	M3 (50 % de relave)	7,31
1	M4 (75 % de relave)	8,56
2	M4 (75 % de relave)	6,63
3	M4 (75 % de relave)	7,81
1	M5 (100 % de relave)	8,85
2	M5 (100 % de relave)	7,61
3	M5 (100 % de relave)	8,46

Anexo 8. Resultados de la densidad (kg/m³) de los adoquines de concreto

N° de repeticiones	Tratamiento	Densidad (kg/m³)
1	M1 (sin relave)	2182,22
2	M1 (sin relave)	2167,02
3	M1 (sin relave)	2175,10
1	M2 (25 % de relave)	2056,40
2	M2 (25 % de relave)	2142,31
3	M2 (25 % de relave)	2106,91
1	M3 (50 % de relave)	2009,14
2	M3 (50 % de relave)	2054,99
3	M3 (50 % de relave)	2087,89
1	M4 (75 % de relave)	1983,78
2	M4 (75 % de relave)	2079,28
3	M4 (75 % de relave)	2031,50
1	M5 (100 % de relave)	2040,66
2	M5 (100 % de relave)	2020,54
3	M5 (100 % de relave)	1984,17

Anexo 9. Resultados del dimensionamiento (largo, ancho y espesor) de los adoquines de concreto

N° de repeticiones	Tratamiento	Largo (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)
1	M1 (sin relave)	199	99,31	59,06
2	M1 (sin relave)	198	99,82	59,23
3	M1 (sin relave)	199	99,45	60,14
1	M2 (25 % de relave)	198	99,26	59,28
2	M2 (25 % de relave)	198	98,32	59,44
3	M2 (25 % de relave)	199	99,65	59,79
1	M3 (50 % de relave)	198	98,72	59,82
2	M3 (50 % de relave)	199	98,35	60,07
3	M3 (50 % de relave)	198	98,89	59,39
1	M4 (75 % de relave)	198	99,32	58,80
2	M4 (75 % de relave)	198	98,79	59,14
3	M4 (75 % de relave)	199	99,22	58,39
1	M5 (100 % de relave)	199	100,33	59,69
2	M5 (100 % de relave)	199	99,70	58,73
3	M5 (100 % de relave)	200	99,38	59,21

Anexo 10. Informe de ensayo del análisis TCLP del relave y tratamientos



**INFORME DE ENSAYO
N° NOV1073.R23**

SOLICITANTE :	UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE G.
DOMICILIO LEGAL :	Av. Miraflores N° S/N Cercado, Tacna, Tacna, Tacna
SOLICITADO POR :	Andrea Ramos
SOLICITUD DE SERVICIO AMBIENTAL:	Cadena de Custodia N° 3267-23/CERTIMIN
REFERENCIA :	Proyecto: "Aprovechamiento de relaves mineros de una mina polimetálica como Insumo para la elaboración de adoquines de concreto" Tacna
FECHA DE MUESTREO :	2023/05/24
MUESTRA TOMADA POR :	EL CLIENTE
PROTOCOLO :	--
TIPO DE MUESTRA:	Roca
NÚMERO DE ESTACIONES DE MUESTREO :	6
PRESENTACIÓN DE LAS MUESTRAS :	Bolsas Selladas
CONDICIÓN DE LAS MUESTRAS : RECEPCIONADAS	Según se Indica
FECHA DE RECEPCIÓN :	lunes, 30 de Octubre de 2023
IDENTIFICACIÓN DE LAS MUESTRAS :	Segun se Indica
FECHA DE EJECUCIÓN DE ENSAYO :	2023-10-30 al 2023-11-09
FECHA DE REPORTE :	Jueves, 09 de Noviembre de 2023
PERIODO DE CUSTODIA :	Hasta un mes. De acuerdo a las recomendaciones de la metodología o norma empleada

EDGAR NINA VELÁSQUEZ
Jefe Ambiental
CQP. 729

Lima, 9 de Noviembre de 2023



INFORME DE ENSAYO
N° NOV1073.R23

RESULTADOS

Muestras				Ensayos																
N°	Código de Servicio	Fecha	Tipo	MA1000	MA1000	MA1000	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122
	Ensayo	Muestreo	Muestra	Nor	Altitud	Est	Ag (t)	Al (t)	As (t)	B (t)	Ba (t)	Be (t)	Bi (t)	Ca (t)	Cd (t)	Ce (t)	Co (t)	Cr (t)	Cu (t)	Cu (t)
	Unidad			WGS-84	msnm	WGS-84	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
	Unidad						0.002	0.02	0.008	0.003	0.001	0.0003	0.02	0.05	0.001	0.02	0.002	0.004	0.003	0.003
	Unidad																			
	Unidad																			
1	R-01	2023-05-24 10:00	Relave	8271514	4200	315110	<0.002	6.67	<0.008	0.064	0.046	0.0103	<0.02	723.20	0.145	0.10	0.029	0.009	63.529	
2	M1	--	Roca	--	--	--	<0.002	4.88	<0.008	0.120	0.876	<0.0003	<0.02	1480.45	0.001	0.11	0.009	0.024	0.038	
3	M2	--	Roca	--	--	--	<0.002	0.19	<0.008	0.097	0.722	<0.0003	<0.02	2436.26	<0.001	0.13	0.004	0.012	0.048	
4	M3	--	Roca	--	--	--	<0.002	0.38	0.009	<0.003	0.588	<0.0003	<0.02	2348.24	<0.001	0.13	0.003	0.048	0.036	
5	M4	--	Roca	--	--	--	<0.002	0.11	0.013	0.061	0.564	<0.0003	<0.02	2252.67	<0.001	0.13	<0.002	0.006	0.016	
6	M5	--	Roca	--	--	--	<0.002	0.09	<0.008	0.080	0.497	<0.0003	<0.02	2277.91	<0.001	0.14	<0.002	0.008	0.010	

Las Coordenadas, Altitud* son datos proporcionados por el cliente.
El código de servicio MA1089 corresponde a Prueba TCLP (Toxicity characteristic leaching procedure) que incluye los parámetros de Metales Por ICP OES
LD: Límite de Detección (Límite Reportable) que es tomado en base al Límite de Cuantificación del Método LCM.



INFORME DE ENSAYO
N° NOV1073.R23

Muestras			Ensayos																		
N°	Código de Servicio	Ensayo	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122
	Unidad	Unidad	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
	Unidad	Unidad	0.01	0.01	0.004	0.02	0.001	0.004	0.01	0.002	0.06	0.01	0.008	0.02	0.02	0.007	0.0007	0.01	0.05	0.003	0.005
1	R-01		0.70	13.00	<0.004	5.13	40.803	<0.004	34.71	0.020	0.37	50.06	<0.008	0.05	37.00	<0.007	2.6912	<0.01	<0.05	<0.003	9.500
2	M1		1.58	61.87	0.015	24.63	0.443	<0.004	46.12	<0.002	<0.06	0.06	<0.008	<0.02	169.52	<0.007	2.8007	0.06	<0.05	0.008	0.089
3	M2		0.14	62.57	0.050	18.84	0.036	<0.004	43.46	<0.002	<0.06	0.10	<0.008	0.03	52.68	<0.007	3.7294	<0.01	<0.05	0.043	0.024
4	M3		0.03	72.98	0.024	0.48	0.019	0.029	49.99	<0.002	<0.06	0.07	<0.008	0.03	15.60	<0.007	4.0514	<0.01	<0.05	0.005	0.023
5	M4		0.04	73.27	0.035	6.01	0.010	0.015	41.23	<0.002	<0.06	<0.01	<0.008	<0.02	45.96	<0.007	3.5857	<0.01	<0.05	0.028	0.009
6	M5		0.04	64.89	0.025	9.80	0.005	0.030	37.03	<0.002	<0.06	0.04	<0.008	0.05	55.37	<0.007	3.3381	<0.01	<0.05	0.043	0.015



INFORME DE ENSAYO
N° NOV1073.R23

MÉTODOS DE ENSAYO Y CODIGOS DE SERVICIO

N°	Ensayo	Denominación	Cod.Serv	Descripción
1	Nor	Norte	MA1000	--
2	Altitud	Altitud	MA1000	--
3	Est	Este	MA1000	--
4	Metales Totales Por ICP OES	Metales Totales Por ICP OES	MA0122	EPA Method 200.7. Revisión 4 4 1994. Determination of metals and trace elements in water and wastes by Inductively Coupled Plasma- Atomic. Emission Spectrometry.
5	prueba TCLP	prueba TCLP	MA1089	EPA 1311 Toxicity characteristic leaching procedure
6	Metales Por ICP MS/ICP OES	Metales Por ICP MS/ICP OES	MA1124	EPA Method 3050B Rev 2 1996/EPA Method 6010D Rev.5 2018/EPA Method 6020 B Rev.2. 2014/Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Soils/Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry/inductively coupled Plasma-Mass Spectrometry.

(1) SMEWW: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.
APHA: American Public Health Association.
AWWA: American Water Works Association.
WEF: Water Environment Federation.
EPA: Environmental Protection Agency.
ASTM: American Society for Testing and Materials.
ISO: International Organization for Standardization.
NTF: Norma Técnica Peruana.
NIOSH: The National Institute for Occupational Safety and Health.

Anexo 11. Panel fotográfico del trabajo experimental

Figura 7

Obtención de una muestra representativa del relave



Figura 8

Análisis de densidad y granulometría del relave



Figura 9

Pesado de insumos de los adoquines de concreto

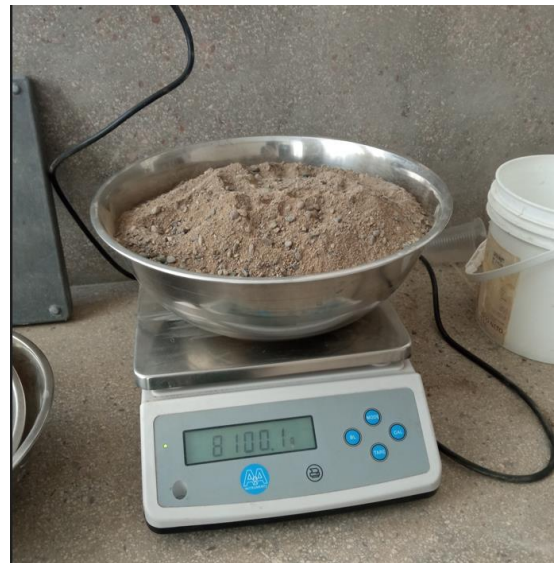
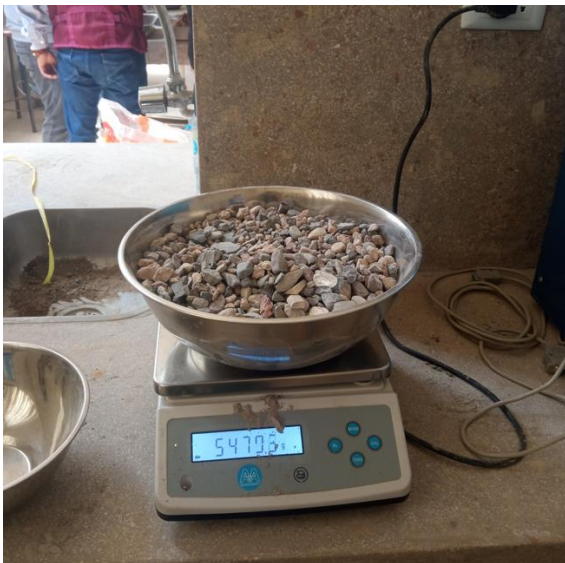
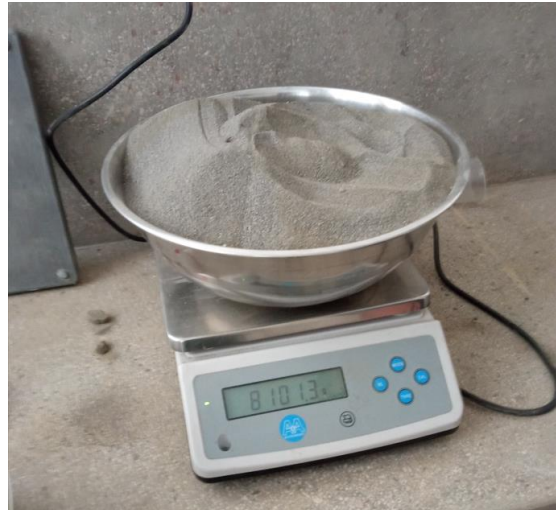


Figura 10

Elaboración de los adoquines de concreto



Figura 11

Curado de los adoquines de concreto



Figura 12

Adoquines de concreto a los 28 días de curado



Figura 13

Ensayo de resistencia a la compresión de los adoquines de concreto



Figura 14

Ensayo de absorción de los adoquines de concreto

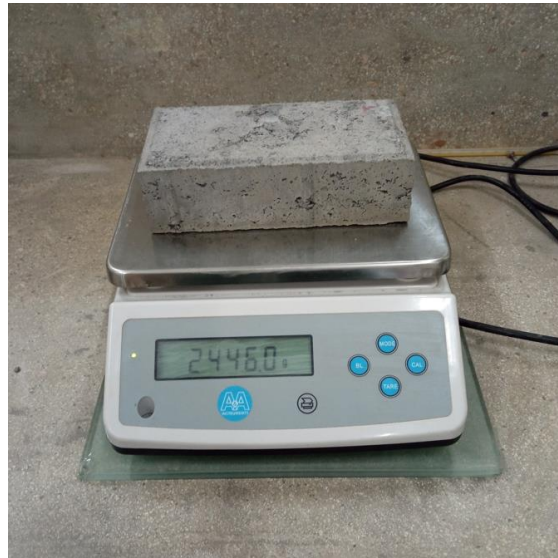


Figura 15

Ensayo de densidad de los adoquines de concreto



Figura 16

Medición de las dimensiones de los adoquines de concreto



Figura 17

Muestras aleatorias de los adoquines de concreto

