

Manufacturing of Asphalt Briquettes using Tailings-Derived Filler as

J. Rau, J. Zegarra, P. Pereyra, M. Guzmán, A. Ruiz¹

Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú, jrau@pucp.edu.pe, jorge.zegarra@pucp.edu.pe, ppereyr@pucp.edu.pe, mguzman@pucp.edu.pe, ¹Canadá, Arturo.ruiz@ipdpdperu.com

Abstract- *In the present research, asphalt briquettes were manufactured using tailings-derived filler as an aggregate. The hot mix asphalt (HMA) design corresponds to the MAC-1 type, which is intended for heavy traffic, as the study area is based on roads near mining districts where heavy transport vehicles operate at an altitude exceeding 3,000 meters above sea level. The design follows the Technical Specifications MTC EG-2013 Section 423, which specifies that the mix must be composed of stone materials such as gravel and sand that meet certain requirements. The asphalt binder used is conventional PEN 85-100 asphalt from the company Petróleos del Perú – PETROPERÚ S.A.C., which complies with the requirements of Technical Specifications Section 426. Additionally, tailings-derived filler was incorporated into the mix. The briquettes were manufactured following the methodology of the Marshall Method for hot mix asphalt.*

Keywords: *Tailings, Asphalt Briquettes, Circular Economy, Roads, Radiometry.*

Fabricación de Briquetas Asfálticas con Filler proveniente de Relaves como agregado

J. Rau, J. Zegarra, P. Pereyra, M. Guzmán, A. Ruiz¹

Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú, jrau@pucp.edu.pe, jorge.zegarra@pucp.edu.pe, ppereyr@pucp.edu.pe, mguzman@pucp.edu.pe, ¹Canadá, Arturo.ruiz@ippdperu.com

Resumen- En la presente investigación se ha realizado la fabricación de briquetas asfálticas con filler proveniente de relave como agregado. El diseño de la mezcla asfáltica en caliente es tipo MAC-1 que corresponde a un tráfico pesado, ya que el área de estudio se basa en caminos cercanos a distritos mineros donde se encuentran vehículos de transporte pesado y a una altitud mayor a 3000 m.s.n.m. El diseño se realiza bajo las Especificaciones Técnicas MTC EG-2013 Sección 423, donde se indica que la mezcla debe ser elaborada con materiales pétreos como grava y arena que cumplan ciertos requerimientos, el ligante asfáltico que se ha usado es asfalto convencional de PEN 85-100 procedente de la Empresa Petróleos del Perú-PETROPERÚ S.A.C., el mismo que se halla conforme a los requerimientos de las Especificaciones Técnicas Sección 426, y finalmente la incorporación del filler proveniente de relave minero. Las briquetas han sido elaboradas cumpliendo con la metodología del Método Marshall para mezclas asfálticas en caliente.

Palabras Clave—Relaves, Briquetas Asfálticas, Economía Circular, Carreteras, Análisis radiometría, cemento geopolimérico.

I. INTRODUCCIÓN

La actividad minera en el Perú es de gran relevancia económica y social, pues en el 2022 aportó casi el 14.9% del Producto Bruto Interno (PBI) [1]. Sin embargo, pese a su gran contribución, su proceso de extracción de minerales genera una gran cantidad de residuos en forma de material fino en estanques de relaves [2].

Los desechos representan una fuente de contaminación para zonas aledañas al área de extracción, generando un impacto negativo en el medio ambiente y en la salud de las personas. Su desarrollo intensivo, a lo largo de los años, promovió la acumulación de enormes volúmenes de desechos producto del procesamiento de minerales [3].

Se estima que aproximadamente 7 mil millones de toneladas de relaves mineros son generados anualmente en todo el mundo y se proyecta que para el año 2025 se acumularán 19 mil millones aproximadamente [4].

El uso del relave en la fabricación de briquetas asfálticas consigue dos objetivos fundamentales: eliminar el agente contaminante (relave) y generar pavimentos asfálticos para ser usados en carreteras, esto último es fundamental para el desarrollo social y económico de las comunidades.

II. OBJETIVOS

Objetivo general:

- Evaluar la viabilidad técnica del uso de relave minero en mezclas asfálticas.

Objetivos específicos:

- Realizar pruebas mecánicas de laboratorio para comparar el rendimiento de las briquetas asfálticas con filler de relave minero como agregado frente a las mezclas tradicionales.
- Evaluar la viabilidad económica al comparar el costo de producción de filler de relave minero versus el convencional (cemento).
- Determinar el impacto social y ambiental en el rubro minero del uso del filler proveniente de relave.

III. MATERIALES Y METODOLOGÍA

La investigación se refiere al uso de relaves mineros en caminos que comunican las minas, se consideran los requisitos que corresponden a tráfico pesado y a minas en la cordillera: altitud mayor a 3000 msnm y climas fríos, donde se alcanza temperaturas promedio de entre 5 a 15 °C. Resaltar que el enfoque es la reutilización de relave minero que, mediante un proceso de desulfuración, sedimentación, drenado y secado de la pulpa de relaves se obtiene el filler (Ver Figura 1), este será usado para la elaboración de briquetas asfálticas en reemplazo del relleno tradicional como lo es el cemento, polvo de roca y cal.

Los ensayos se realizaron en el laboratorio de la Pontificia Universidad Católica del Perú, ya que cuenta con todo el equipamiento necesario para la elaboración de briquetas asfálticas mediante el Método Marshall.

A. Método de análisis

1. Filler

Se utilizó filler proveniente de relave minero de una mina de oro ubicada en la región Cajamarca, Perú. El filler se emplea para rellenar vacíos y mejorar la adherencia entre los agregados y el asfalto. Este agregado deberá de carecer de

materias extrañas y objetables, estarán perfectamente secos para poder fluir libremente y no contendrán grumos. Ver Figura 2.



Fig. 1: a) Contenedor de relave. b) Drenado de parte líquida. c) Porción sólida de muestra antes del secado. d) Porción sólida después del secado



Fig. 2: Filler

A continuación, se muestra la granulometría del filler en la Figura 3 y se presenta la Tabla 1 con los requerimientos físicos de la especificación técnica MTC EG-2013 tabla 425-04 [6].

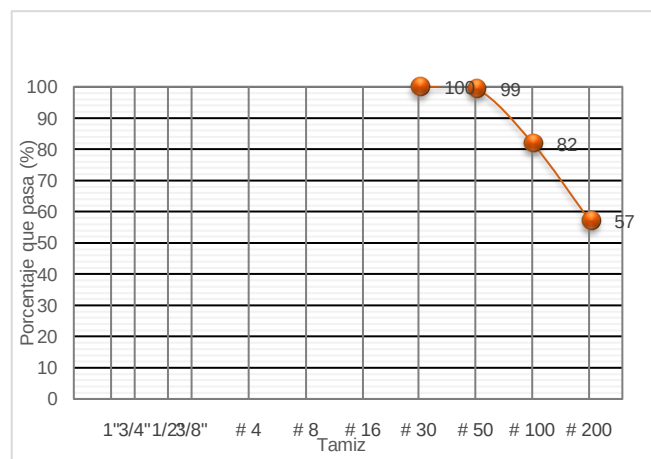


Fig. 3: Curva granulométrica del filler

TABLA 1
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS SOLICITADAS POR LA NORMA Y SU VERIFICACIÓN CON LA GRANULOMETRÍA DEL FILLER.

Tamiz	% que pasa	% que pasa requerido	Resultado
N° 30	100	100	Si cumple
N° 50	99	95-100	Si cumple
N° 200	57	70-100	No cumple

2. Grava

La grava usada en la presente investigación es limpia, compacta y durable, tal como se puede apreciar en la Figura 4. El agregado grueso utilizado para la mezcla bituminosa posee una naturaleza tal, que al aplicar una capa de material asfáltico ésta no se desprenda por la acción del agua y del tránsito.



Fig. 4: Grava

A continuación, se muestra la granulometría de la grava en la Figura 5 y se presenta la Tabla 2 con los requerimientos de la especificación técnica MTC EG-2013 tabla 423-01.

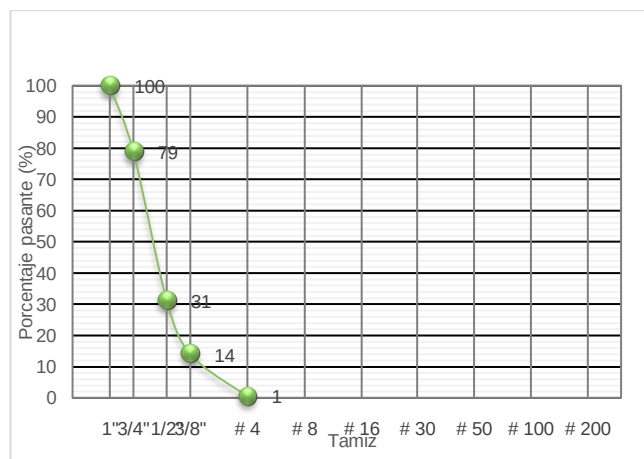


Fig. 5: Curva granulométrica de la grava

TABLA 2
 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS SOLICITADAS POR LA NORMA
 PARA LA GRAVA Y SU VERIFICACIÓN CON LOS ENSAYOS DE
 LABORATORIO

Grava o agregado grueso				
Ensayos	Norma	Requerimiento Altitud >3000 m.s.n.m	Resultado de laboratorio	Resultado
Durabilidad al Sulfato de Magnesio	MTC E 209	Máx. 15 %	0.20%	Si cumple
Abrasión Los Ángeles	MTC E 207	Máx. 35 %	13.60%	Si cumple
Adherencia	MTC E 507	95	95	Si cumple
Índice de Durabilidad	MTC E 214	Mín. 35 %	82%	Si cumple
Partículas Chatas y Alargadas	MTC E 221	Máx. 10 %	0.60%	Si cumple
Caras Fracturadas	MTC E 210	Mín. 90/70 %	98.90%	Si cumple
Sales Solubles	MTC E 219	Máx. 0.5 %	0.70%	No cumple
Absorción	MTC E 206	Máx. 1.0 %	0.63%	Si cumple

3. Arena

La arena usada en la presente investigación es limpia y compacta, tal como se puede apreciar en la Figura 6.



Fig. 6: Arena

A continuación, se muestra la granulometría de la arena en la Figura 7 y se presenta la Tabla 3 con los requerimientos de la especificación técnica MTC EG-2013 tabla 423-02.

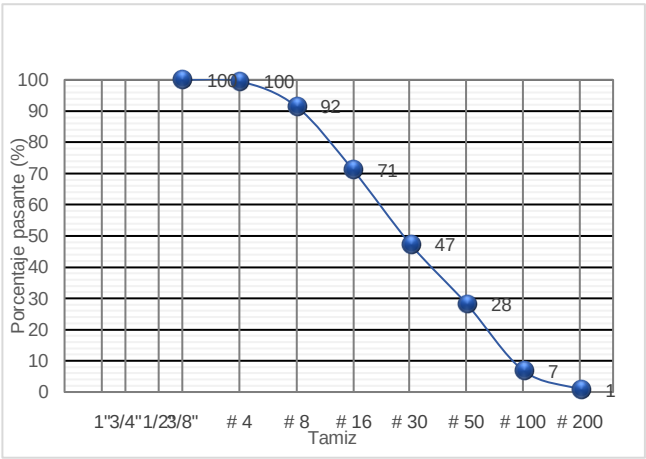


Fig. 7: Curva granulométrica de la arena

TABLA 3
 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS SOLICITADAS POR LA NORMA
 PARA LA ARENA Y SU VERIFICACIÓN CON LOS ENSAYOS DE
 LABORATORIO

Arena o agregado fino				
Ensayos	Norma	Requerimiento Altitud >3000 m.s.n.m	Resultado de laboratorio	Resultado
Equivalente de Arena	MTC E 114	Mín. 70 %	82%	Si cumple
Angularidad del agregado fino	MTC E 222	Min. 40 %	37.0%	No cumple
Azul de metileno Índice	AASHTO TP 57	Máx. 8%	0.35%	Si cumple
Plasticidad (malla N°40)	MTC E 111	NP	NP	Si cumple
Durabilidad al Sulfato de Magnesio	MTC E 209	Máx. 18 %	26.70%	No cumple
Índice de Durabilidad	MTC E214	Mín. 35 %	75%	Si cumple
Plasticidad (malla N°200)	MTC E 111	NP	NP	Si cumple
Sales Solubles	MTC E 219	Máx. 0.5 %	0.17%	Si cumple
Absorción	MTC E 206	Máx. 0.5 %	0.33%	Si cumple
Contenidos de Partículas menores que la malla # 200	MTC E 202	1% - 3 %	2.45%	Si cumple

4. Cemento Asfáltico

El cemento asfáltico o ligante se emplea según las características climáticas de la zona o región, basado en la especificación técnica MTC EG-2013 tabla 415-01, como se presenta en la Tabla 4.

TABLA 4
SELECCIÓN DEL TIPO DE CEMENTO ASFÁLTICO

Temperatura media anual			
24 °C a más	24 °C - 15 °C	15 °C - 5 °C	5 °C a menos
40-50 60-70 Asfalto modificado	60-70	85-100 120-150	Asfalto modificado

A partir de la Tabla 4, se puede escoger dos tipos de cemento asfáltico PEN 85-100 y PEN 120-150, en este estudio académico se usará el tipo PEN 85-100 bajo las especificaciones técnicas de la empresa PETROPERÚ S.A.C. [7]

B. Mezcla de agregados

1. Gradación pétrea de la mezcla

La gradación de la Mezcla Asfáltica en Caliente (MAC) deberá responder a algunos de los Husos granulométricos que se presenta en la especificación técnica MTC EG-2013 tabla 423-03 [6]. Ver Tabla 5.

TABLA 5
HUSOS GRANULOMÉTRICOS PARA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE

Tamiz	Porcentaje que pasa		
	MAC - 1	MAC - 2	MAC - 3
1"	100		
3/4"	80-100	100	
1/2"	67-85	80-100	
3/8"	60-77	70-88	100
N° 4	43-54	51-68	65-87
N° 10	29-45	38-52	43-61
N° 40	14-25	17-28	16-29
N° 80	8-17	8-17	9-19
N° 200	4-8	4-8	5-10

2. Dosificación de Materiales

Conocido las propiedades de los materiales como grava, arena y filler, se procede a la combinación de estos en base a las granulometrías obtenidas.

La combinación de agregados debe estar dentro del huso granulométrico propuesto en las Especificaciones Técnicas, para la presente investigación se usará el requerimiento MAC-1 que corresponde a un tráfico pesado.

Siendo el siguiente la combinación de agregados que mejor se ajusta, tal como se muestra en la Tabla 6.

TABLA 6
PROPORCIÓN EN PORCENTAJE DE PESO DE LOS AGREGADOS

Material	Proporción en peso
Grava (G)	48.0 %
Arena (A)	47.0 %
Filler (F)	5.0 %

3. Muestras de referencia - Método Marshall

El método de diseño de mezcla en caliente que se describe a continuación es el denominado Método de Diseño Marshall, cuyo procedimiento de ensayo ha sido normalizado por la MTC E 504 [6].

Este método tiene por objetivo determinar el contenido óptimo de asfalto mediante una combinación de agregados que cumpla con los requerimientos de gradación y calidad establecidos por las especificaciones técnicas a partir de medidas de estabilidad y resistencia al flujo plástico ante la aplicación de carga a briquetas previamente moldeadas, según el método estandarizado.

De acuerdo a los criterios del método Marshall, se elabora una serie de mezclas con porcentajes de cemento asfáltico variable, que en la presente investigación será a partir de 4.0% a 5.5% con incrementos de 0.5 % del mismo y así obtener las curvas de estabilidad y flujo para posterior a ello determinar el contenido óptimo del cemento asfáltico a utilizar.

Para cada porcentaje de cemento asfáltico se confeccionaron 3 briquetas, con las dimensiones de acuerdo con lo estipulado por el procedimiento Marshall. Las temperaturas óptimas de mezclado y compactación de las mezclas asfálticas están en función de la viscosidad del cemento asfáltico y de acuerdo a las recomendaciones del proveedor en la carta de viscosidad. Según el Manual del Instituto del Asfalto (2014) [5], sugiere que la mezcla para el tipo PEN 85-100 sea entre el rango de 121 °C a 149 °C, por lo cual se escogió una temperatura de 140 °C y de esta manera se asegura que la temperatura de compactación se encuentre dentro del rango.

Se elaboraron tres briquetas para cada contenido de cemento asfáltico. Se presenta la Tabla 7 con los pesos de cada briketa y se muestra la Figura 8 con las briquetas elaboradas [7].

TABLA 7
PORCENTAJE VARIABLE DE CEMENTO ASFÁLTICO

Peso de agregados (g)	% Cemento Asfáltico (C.A.)			
	4.0%	4.5%	5.0%	5.5%
48% Grava (G)	552.96	550.08	547.2	544.32
47% Arena (A)	541.44	538.62	535.8	532.98
5% Filler (F)	57.6	57.3	57	56.7
Cemento asfáltico	48	54	60	66
Peso total briketa (g)	1200	1200	1200	1200



Fig. 8: Briquetas asfálticas bajo el Método Marshall

IV. RESULTADOS

A. Caracterización física

La curva granulométrica de la combinación de agregados, de acuerdo con las proporciones señaladas es la siguiente de la Tabla 8 y Figura 9.

TABLA 8
COMBINACIÓN DE AGREGADOS Y LAS ESPECIFICACIONES
TÉCNICAS SOLICITADAS POR LA NORMA

Tamiz	Porcentaje que pasa		Resultado
	Combinación = 0.48G+0.47A+0.05F	MAC - 1	
1"	100	100	Si cumple
3/4"	90	80-100	Si cumple
1/2"	67	67-85	Si cumple
3/8"	59	60-77	No cumple
N° 4	52	43-54	Si cumple
N° 10	46	29-45	No cumple
N° 40	23	14-25	Si cumple
N° 80	10	8-17	Si cumple
N° 200	3	4-8	No cumple

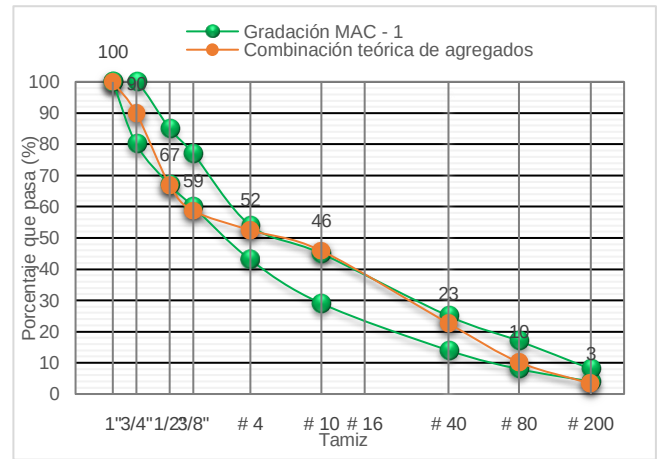


Fig. 9: Curva granulométrica de combinación de agregados grava, arena y filler

B. Caracterización mecánica

La presente investigación de mezcla asfáltica en caliente considera al filler proveniente del relave como una solución alternativa al filler tradicional obteniéndose los siguientes resultados de flujo y estabilidad por el método Marshall como se muestra en la Tabla 9.

TABLA 9
RESULTADOS DE FLUJO Y ESTABILIDAD DE LAS BRIQUETAS

%C.A.	4.0%	4.5%	5.0%	5.5%
Flujo (mm)	11.4	8.9	8.5	8.8
Estabilidad (kN)	1818	1361	1280	1214

Se muestra la Figura 10 con la gráfica de flujo vs porcentaje de asfalto, asimismo se presenta la Figura 11 con la gráfica de estabilidad vs porcentaje de asfalto. A partir de estas gráficas se determina el contenido óptimo de asfalto.

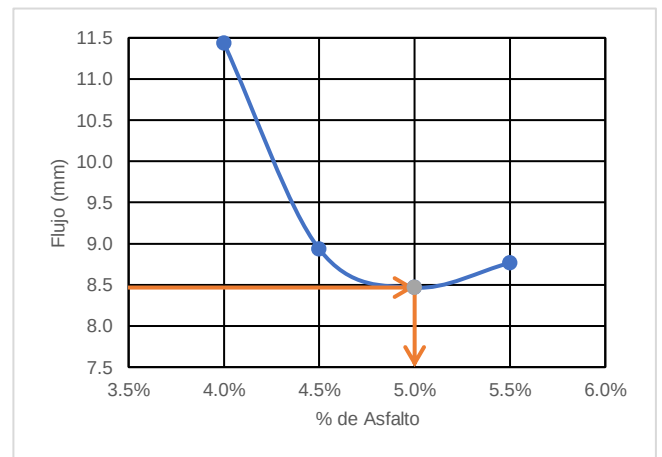


Fig. 10: Gráfico de flujo vs porcentaje de asfalto

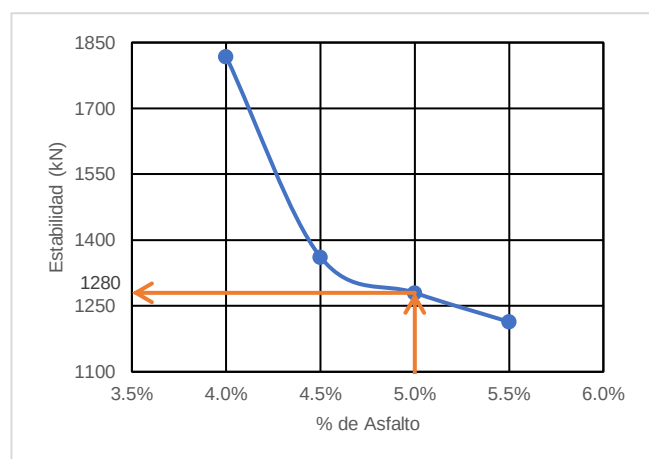


Fig. 11: Gráfico de estabilidad vs porcentaje de asfalto

El contenido óptimo de cemento asfáltico se obtiene considerando que la briqueta ensayada en el equipo Marshall presente el menor flujo o menor deformación. Según el gráfico de flujo el menor valor alcanzado es 8.5 mm que corresponde a un 5.0% de cemento asfáltico (Ver Figura 10); por ende, el contenido óptimo de asfalto tiene el valor de 5.0%.

Seleccionado el contenido óptimo que es 5% de asfalto, se verifica que cuente con una estabilidad adecuada, según el gráfico de estabilidad se determina un valor 1280 Kn. Ver Figura 11.

Por último, se realiza la verificación de cumplimiento de las especificaciones mínimas del MTC EG-2013 para briquetas mediante el Método Marshall con el contenido óptimo de cemento asfáltico. Ver Tabla 10.

TABLA 10
ESPECIFICACIONES SOLICITADAS POR LA NORMA Y SU VERIFICACIÓN DE RESULTADOS DE LAS BRIQUETAS

Parámetros de diseño	Resultados de laboratorio	Especificación MTC EG-2013	Resultado
Cemento asfáltico óptimo (%)	5.0	Mezcla A	
Compactación, número de golpes por lado	75	75	Si cumple
Estabilidad (kN)	1280	Mín. 8.15	Si cumple
Flujo (mm)	8.5	8-14	Si cumple

C. Caracterización económica de filler de relave vs el tradicional (cemento)

Por un lado, el relave es un material gratuito, pero para su uso y manipulación se necesita realizar un proceso de desulfuración para equilibrar el PH, sedimentación, drenado y secado para obtener el filler en polvo.

El proceso mencionado tiene un costo de operación, costo de equipos y costo de energía; según la investigación

“Economic cost of conceptual plant of geopolymers based on mine tailing of cooper in the north of Peru” se tiene que la producción de un ladrillo a base de relave tiene un costo de 1.30 USD y haciendo un símil para efectos de la investigación, si cada ladrillo pesa 2.7 kg entonces la producción de filler en polvo de 1kg tendría un costo de 0.50 USD, realizando la conversión con tipo de cambio de 3.70 se obtiene el costo de 1.85 soles por cada kilogramo de filler de relave. Por otro lado, el costo promedio de una bolsa de cemento de 42.5 kg es de 30 soles, entonces el costo por 1 kg de cemento es de 0.71 soles. Se muestra la comparación en la Tabla 11.

TABLA 11
COSTO DE PRODUCCIÓN DE FILLER DE RELAVE Y FILLER TRADICIONAL(CEMENTO)

Filler	Costo directo (S/.) /kg
Filler de relave	1.85
Filler tradicional (cemento)	0.71

V. ECONOMÍA CIRCULAR EN EL RUBRO MINERO UTILIZANDO BRIQUETAS DE ASFALTO

La economía circular y la sostenibilidad son conceptos fundamentales en la actualidad, especialmente en sectores industriales que tradicionalmente han generado residuos nocivos para el medio ambiente, como es el caso de la industria minera.

Los relaves mineros son subproductos de la actividad minera, compuestos por residuos sólidos y líquidos que quedan después del proceso de extracción y tratamiento del mineral. Estos relaves representan un desafío ambiental significativo debido a su potencial para contaminar suelos y aguas cercanas. Por otro lado, el pavimento asfáltico es un material ampliamente utilizado en la construcción de carreteras y calles. Tradicionalmente, se utiliza filler mineral (generalmente polvo de roca) para mejorar las propiedades del asfalto y reducir costos.

La utilización de relaves mineros como filler para la producción de pavimento asfáltico presenta varias ventajas. En primer lugar, la reducción de residuos ya que al utilizar relaves mineros como filler proporciona una forma de reciclar un subproducto de la actividad minera que de otro modo sería considerado residuo. En segundo lugar, ayuda a la reducción de costos pues al utilizar relaves mineros en lugar de filler mineral convencional, las empresas podrían disminuir sus costos de producción, lo que podría traducirse en precios más competitivos para el pavimento asfáltico. En tercer lugar, al reutilizar los relaves mineros, se evita la necesidad de disponer de ellos en vertederos, lo que reduce el impacto ambiental negativo asociado con su almacenamiento y gestión.

La utilización de relaves mineros como filler para la producción de pavimento asfáltico representa una oportunidad prometedora para promover la economía circular y la sostenibilidad en la industria minera y de la construcción. Sin embargo, se requiere una evaluación cuidadosa de los aspectos técnicos, ambientales y económicos para garantizar el éxito de esta iniciativa. Con el adecuado desarrollo y aplicación, esta práctica podría contribuir significativamente a la reducción de residuos mineros y al fomento de prácticas más sostenibles en ambos sectores industriales.

A. Impacto Social

- Reducción de conflictos Sociales: Al encontrar una utilidad para los relaves mineros, se puede reducir la percepción negativa que tienen las comunidades sobre los desechos mineros, lo que podría disminuir los conflictos sociales y mejorar las relaciones entre las empresas mineras y las comunidades locales.
- Desarrollo Comunitario: Proyectos de infraestructura mejorada pueden surgir a partir de estas iniciativas, beneficiando a las comunidades locales con mejores caminos y servicios.
- Generación de Empleo: La reutilización de relaves mineros puede generar empleo en las comunidades cercanas a las minas, ya que se requieren trabajadores para procesar y transportar los relaves hacia las plantas de asfalto.

B Impacto Ambiental

- Reducción de Desechos Mineros: Al utilizar relaves mineros en mezclas asfálticas, se reduce la cantidad de desechos mineros que deben ser almacenados en diques o depósitos, lo que a su vez disminuye el riesgo de contaminación de suelos y aguas.
- Mitigación del Riesgo de Contaminación: Si los relaves mineros contienen metales pesados u otros contaminantes, su uso controlado en mezclas asfálticas podría inmovilizar estos elementos y reducir el riesgo de lixiviación y contaminación del suelo y el agua.
- Emisiones de CO₂: La reutilización de relaves mineros puede contribuir a la reducción de las emisiones de CO₂ al disminuir la necesidad de procesamiento y transporte de nuevos materiales, así como al optimizar la gestión de residuos.

VI. CONCLUSIONES

En este estudio, el filler proveniente de relave minero se utilizó como agregado para la elaboración de briquetas asfálticas. Las briquetas alcanzaron los requerimientos solicitados de la Especificación MTC EG-2013 mediante el Método Marshall, siendo 5% el contenido óptimo de asfalto para la gradación MAC-1, y obteniendo un flujo de 8.5 mm

y una estabilidad de 1280 kN, por lo que puede ser utilizado para pavimentos.

Sin embargo, el filler es demasiado grueso y debiera ser descartado en un proyecto real. Asimismo, se observa en la grava que, a excepción del contenido de sales solubles totales que tiene 0.20% más que lo permitido, la grava cumple con los demás requisitos.

En el caso de la arena, la angularidad es ligeramente inferior al mínimo requerido, y la pérdida por inmersión en sulfato de magnesio es bastante mayor al máximo. La menor angularidad, conlleva a una menor trabazón y “agarre” inter-partículas; sin embargo, la diferencia respecto del mínimo es de 3%, es decir se obtiene 92.5% de la angularidad mínima, lo cual no debe ser crítico. Si resulta preocupante una pérdida por ataque del sulfato de magnesio: este ensayo trata de representar los cambios en los agregados por los ciclos de hielo y deshielo, condición que si se puede presentar en las vías en minas andinas; obteniéndose una pérdida prácticamente 50% mayor que la máxima permitida (26.7/18 es 48.33% mayor). Por esta razón, este agregado debiera ser descartado en un proyecto real de construcción vial.

El filler de relave como agregado ofrece una buena alternativa al filler tradicional ya que ayuda a disminuir los desechos de minería depositados. Sin embargo, el análisis indica que el costo para producir el filler de relave es 62% más elevado, por ende, es evidente que no es viable económicamente.

Por último, el potencial uso de filler como agregado de material de construcción como pavimentos podría apoyar a la reutilización de desechos mineros que va de acuerdo con la economía circular.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de investigación ha sido financiado por la Pontificia Universidad Católica del Perú de los proyectos que realiza anualmente (código: VRI 2022-002/PI 0895).

REFERENCIAS

- [1] Cruz, E. (2022). Minería representa casi el 15% del PBI nacional por la actividad misma e impacto en otros sectores. Rumbo Minero.
- [2] Nikvar-Hassani, A., Vashaghian, H., Hodges, R., Zhang, L. (2022) Production of green bricks from low-reactive copper mine tailings: Chemical and mechanical aspects. Construction and Building Materials, 324, 126695, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126695
- [3] Xu, D. M., Zhan, C. L., Liu, H. X., & Lin, H. Z. (2019). A critical review on environmental implications, recycling strategies, and ecological remediation for mine tailings. Environmental Science and Pollution Research, 26, 35657-35669.
- [4] Marín, O. A., Kraslawski, A., & Cisternas, L. A. (2022). Estimating processing cost for the recovery of valuable elements from mine tailings using dimensional analysis. Minerals Engineering, 184, 107629.
- [5] Asphalt Institute (2014). MS-2 Asphalt Mix Design Methods.
- [6] Manual de Carreteras (2013). Especificaciones técnicas generales para construcción EG-2013. Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
- [7] Manual de Ensayo de Materiales (2016). Ministerio de Transportes y Comunicaciones.