

## Desechos serpentíníticos de la empresa Moa Nickel S.A. como sustituto del polvo de piedra en mezclas asfálticas en caliente

### Serpentine waste from the company Moa Nickel S.A. as a substitute for stone powder in hot asphalt mixes

Ismael Terrero Aguirre [iterrero@ismm.edu.cu](mailto:iterrero@ismm.edu.cu)<sup>(1)</sup>

<https://orcid.org/0009-0002-2426-2035>

Carlos A. Leyva Rodríguez [cleyva@ismm.edu.cu](mailto:cleyva@ismm.edu.cu)<sup>(1)</sup>

<https://orcid.org/0009-0002-9156-5327>

Rafael R. Noa Monjes [moam@ismm.edu.cu](mailto:moam@ismm.edu.cu)<sup>(1)</sup>

<https://orcid.org/0000-0001-8031-0137>

<sup>(1)</sup> Universidad de Moa, Moa, Cuba.

**Resumen:** Este trabajo propone evaluar los residuos serpentíníticos de la empresa Moa Nickel S.A. para ser empleados como árido base en las mezclas asfálticas en caliente. Para el diseño de la mezcla asfáltica se utilizó el Método de Marshall. Se tuvieron en cuenta las propiedades relevantes en una mezcla asfáltica en caliente: estabilidad, durabilidad, flexibilidad, resistencia a la fatiga, resistencia al fracturamiento por bajas temperaturas, resistencia al daño por humedad, resistencia al deslizamiento y trabajabilidad. En el rango de composiciones, granulometrías y condiciones experimentales utilizadas en este estudio los resultados obtenidos indican que la composición de 60 % del desecho serpentínítico resulta la más adecuada. Los desechos serpentíníticos de la empresa Moa Nickel S.A reúnen características y propiedades propicias para ser utilizadas como sustituto al polvo de piedra en mezclas asfálticas en caliente por su similitud con las propiedades de este material, no así como sustitutos del árido grueso.

**Palabras clave:** materiales bituminosos, material de construcción, residuos industriales

**Abstract:** This study proposes to evaluate the solid mining waste from Moa Nickel S.A. for use as base aggregate in hot asphalt mixtures. The Marshall Method was used for the asphalt mixture design. The relevant properties of a hot mix asphalt were considered: stability, durability, flexibility, fatigue resistance, resistance to cracking at

low temperatures, resistance to moisture damage, skid resistance, and workability. Within the range of compositions, particle sizes, and experimental conditions used in this study, the results obtained indicate that a composition of 60 % serpentine waste is the most suitable. The serpentine waste from Moa Nickel S.A. possesses characteristics and properties conducive to its use as a substitute for crushed stone in hot asphalt mixtures, due to its similarity to the properties of this material; however, this is not the case for its use as a substitute for coarse aggregate.

**Keywords:** bituminous materials, construction materials, industrial waste

## Introducción

El buen estado de la red vial de un país, y de sus zonas industriales, que permita la circulación vehicular segura y fluida es fundamental para su desarrollo económico y social (Andrade *et al.*, 2021; Tobar-Insuasty, 2024; Santana & Machado, 2025). Sin embargo, el continuo uso de las avenidas industriales produce al desgaste de la red vial por el incremento del tráfico vehicular (Montoya-Alcaraz *et al.*, 2020; Zambrano-Bastidas & Villacreses-Viteri, 2023) aumentado en zonas usadas por transportes de cargas. Por ello, garantizar el óptimo estado de las carreteras es indispensable para la gestión eficiente de las infraestructuras viales y para el transporte (Deepa & Sivasangari, 2023; Toral *et al.*, 2023, Ibragimov *et al.*, 2024).

El asfalto es un material viscoelástico producido por la refinación del petróleo utilizado en la construcción de los viales (Shtayat, 2000; Beyra-Fernández *et al.*, 2023). Según Diaz-Romero *et al.* (2022) la preparación correcta de las materias primas es fundamental para su elaboración. Los avances en la tecnología del asfalto inducen a la utilización de materiales alternativos, que optimicen sus propiedades y contribuyan al desarrollo sostenible (Bobadilla Peña *et al.* 2022). El uso de materiales de desechos en mezclas asfálticas es una opción que no solo busca el mejoramiento del asfalto sino también ofrece soluciones favorables para la conservación del medio ambiente (Cardona-Moncada *et al.*, 2023; Rybak-Niedziółka, 2023; Zapata Ferrero, 2024; Cobeña Loor *et al.*, 2025; Milad, 2025).

Por otro lado, estudios demuestran que los residuos de la industria del níquel en Cuba pueden tener múltiples usos (Quintana Puchol *et al.*, 2016; Osorio Ormaza *et al.*, 2024; Pons-Herrera *et al.*, 2024). En este trabajo se propone evaluar, desde el punto de vista

tecnológico, los residuos serpentiniticos de la empresa Moa Nickel S.A. para ser empleados como áridos base en las mezclas asfálticas en caliente.

## Materiales y métodos

Para la investigación se utilizó el residuo serpentinitico de la empresa Moa Nickel S.A.

Se redujo el tamaño de las muestras mediante dos ciclos de trituración. En la primera etapa se utilizó la trituración por impacto con mandarria hasta lograr fragmentos de 100 mm. Para la segunda se utilizó una trituradora de mandíbula TQ hasta obtener una granulometría de entre 10 y 20 mm. En el proceso de molienda se empleó un molino de bolas con diámetro de 198 mm y velocidad de rotación de 70 r.p.m. Para seleccionar las partículas con un diámetro inferior de 0,25 mm se realizó un proceso de cribado.

## Ensayos realizados a la materia prima

Ensayo granulométrico: Se realizó según la NC 178 (2002). Se empleó una estufa con una temperatura constante entre 105 °C - 110 °C, una balanza y un vibrador mecánico de tamices y brochas. Las muestras se obtuvieron por el sistema de cuarteado mecánico (Tabla 1).

Tabla 1. Peso mínimo de la muestra representativa para ensayos según la NC 178 (2002)

Granulometría	Tamaño nominal máximo de las partículas (mm) (tamiz que pasan)	Peso mínimo de la muestra representativa (kg)
Fina	2,00 mm (No.10)	0,1
	4,76 mm (No.4)	0,5
Gruesa	2,00 mm (No.10)	0,1
	4,76 mm (No.4)	0,5
	9,52 mm (3/8 pulg)	1
	12,7 mm (1/2 pulg)	2,5
	19,1 mm (3/4 pulg)	5
	25,4 mm (1 pulg)	10
	38,1 mm (1,5 pulg)	15
	50,8 mm (2 pulg)	20
	65,5 mm (2,5 pulg)	25
	76,2 mm (3 pulg)	30
	88,0 mm (3 ½ pulg)	35

La muestra se separó usando los tamices necesarios de acuerdo con las especificaciones para el uso del material. El procedimiento para fijar la determinación del tamizado se

realizó con una sola capa del material. Las porciones de 4,76 mm fueron retenidas. Estos resultados permitieron calcular el módulo de finura mediante la expresión:

$$\text{Módulo de finura} = \frac{\sum \% \text{ retenidos}}{100} = 3,8 \%$$

Para la determinación del peso volumétrico se calculó la densidad suelta y la densidad compactada con la fórmula:

$$D = \frac{P - \text{Tara}}{V}$$

Dónde:

D: Densidad (suelta o compactada)

P: Peso (suelto o compactado)

Tara: Peso del recipiente

V: Volumen del recipiente

Material más fino que el tamiz 200

Se extrajo una muestra de 500 g y se le agregó agua hasta cubrir todo el material. Se agitó hasta lograr dejar las partículas finas en suspensión para separarlas de las partículas más gruesas pasando el agua a través del tamiz de 0.074 mm. Se secó el material restante del recipiente y del tamiz y se pesó para calcular la pérdida de masa resultante del lavado. La fórmula para calcular el porcentaje de material más fino que pasa por el tamiz de 0.074 mm es:

$$\% \text{ de material que pasa por el tamiz No. 200} = \frac{a - b}{a} 100\%$$

Donde:

a: peso de la muestra original seca

b: peso de la muestra seca después de lavada

### **Propiedades a considerar en el diseño de mezclas asfálticas**

Las propiedades relevantes en una mezcla asfáltica en caliente que se tuvieron en cuenta son: estabilidad, durabilidad, flexibilidad, resistencia a la fatiga, resistencia al fracturamiento por bajas temperaturas, resistencia al daño por humedad, resistencia al deslizamiento y trabajabilidad.

## Diseño de la mezcla asfáltica

En el diseño de la mezcla asfáltica se utilizó el Método de Marshall para lo cual fue necesario preparar una serie de probetas con mezcla de áridos de composición y granulometría determinada y diferentes contenidos de asfalto. El contenido óptimo de asfalto depende de la granulometría y la capacidad de absorción del agregado. Este contenido varía de 5 a 6 % de la masa total del hormigón bituminoso.

Para la combinación de áridos para la mezcla se utilizó el Método por tanteo. Se empleó material proveniente de la cantera Cerro Calera Bariay como árido base para la elaboración del hormigón asfáltico en caliente, con dos granulometrías, grava 3/8 con fracción de 5-10 mm (60 %) y como agregado fino el polvo de piedra con fracción de 0,075-4,75 mm (40 %). Se agregó el desecho serpentínítico proveniente de la Empresa Moa Nickel S.A. en dos variantes, la primera propone la sustitución del polvo de piedra por el desecho serpentínítico y la otra el remplazo de la grava 3/8, respetando en ambos casos, la cantidad y granulometría del árido inicial, por lo que se empleó la misma cantidad de este material con iguales características granulométricas que las del material proveniente de la cantera.

## Preparación de probetas

Las probetas de diámetro de  $101.6 \pm 0.25$  mm con altura de  $65 \pm 3,2$  mm, se ubicaron en 6 bandejas por cada porcentaje de asfalto. Se agregó el árido previamente secado y enfriado para obtener su peso, y se colocaron en la estufa a temperatura de 170 °C a 190 °C. Se calentó el asfalto sobre la plancha de calentamiento, a una temperatura de entre 145 °C y 160 °C. No se debe mantener el asfalto a esa temperatura más de una hora y no se empleará asfalto recalentado. El asfalto dentro de recipiente se agitó frecuentemente para evitar los sobrecalentamientos locales. Se agitó la mezcla de áridos hasta formar un cráter en el centro. Se colocó el recipiente con los áridos en la balanza marcando el peso total (Tara + Peso árido + Peso asfalto).

Se añadió la cantidad necesaria de asfalto, determinándose la cantidad por diferencia de peso. La temperatura de los áridos estuvo comprendida entre 140 y 155 °C, en caso de ser inferior es necesario aumentar la temperatura del asfalto a un rango de 5 a 10 °C. Se mezclaron los áridos con el asfalto, hasta conseguir una mezcla de composición homogénea. Al terminar el mezclado, la temperatura de la mezcla dispuesta para la

compactación no debe ser inferior a 120 °C, en caso de ser más baja se desecha la amasada. Para lograr resultados uniformes fue conveniente mantener una misma temperatura de la mezcla.

Antes de preparar la mezcla, el conjunto del molde y la base de la masa de compactación se calentaron a una temperatura de entre 100 °C y 150 °C, en baño de agua hirviendo. Se situó un disco de papel de filtro de 10 cm de diámetro sobre la superficie de la base del molde y se vertió la mezcla recién amasada, evitando las segregaciones de material y distribuyendo bien la mezcla dentro del molde por medio de una espátula, dando al final una forma redondeada a la superficie. En estas condiciones se aplicó el número de golpes especificados con la masa. Después de comprimir la primera cara se desmontó el collar, se invirtió el molde con la probeta, se puso nuevamente el collar y se aplican los golpes por la otra cara. Se aplicaron 75 golpes por cada cara en la compactación de mezclas proyectadas para tráficos medio a pesado. Terminada la compactación se desmontó el collar, la base y se sumergió el molde con la probeta en agua a temperatura ambiente durante 2 min. La muestra se retiró del molde por medio del gato extractor.

### **Ensayos realizados al hormigón bituminoso**

#### **Determinación de la estabilidad y la deformación**

El valor de Estabilidad Marshall es una medida de carga bajo la cual una probeta cede o falla. Cuando la carga se aplicada lentamente, los cabezales superior e inferior del aparato se acercan y la carga sobre la briqueta aumenta al igual que la lectura en el indicador del cuadrante. Una vez obtenido el valor máximo, se suspende la carga. La carga máxima indicada por el medidor es el valor de Estabilidad Marshall según NC 261 (2005).

Las probetas se sumergieron en baño de agua a  $60 \pm 5$  °C durante 30 min, antes del ensayo. Se engrasaron las varillas de guía con una película de aceite de manera que la mordaza superior pueda deslizarse libremente. Se retiró la probeta del baño y se colocó centrada sobre la mordaza inferior. Se aplicó la carga a la probeta sobre su superficie lateral empleando el equipo Marshall, a una velocidad constante de 50.8 mm/min hasta que se produjo la rotura. El punto de rotura viene definido por la carga máxima obtenida. La estabilidad Marshall se define por la fórmula:

$$E = Q \cdot Fc \cdot k$$

Donde:

Q: Lectura del anillo dinamométrico

Fc: Factor de corrección por altura

K: Constante del anillo (kg/mm o kN/mm)

La carga máxima tiene lugar en el instante de producirse la primera parada o máximo instantáneo observado en el comparador del anillo dinamométrico. Todo el proceso de ensayo de estabilidad y deformación que comienza al sacar la probeta del baño de agua debe ser completado en un periodo de 30 s.

### Determinación de la densidad aparente de las probetas

La densidad aparente de una mezcla asfáltica compactada se determina a partir de la masa de la probeta y de su volumen. El volumen de la probeta se obtiene por la relación de su masa en el aire y su masa en el agua. La densidad del agua a 30 °C debe ser 994.3 kg/m<sup>3</sup>. La densidad aparente de las probetas se puede realizar tan pronto como los tubos recién compactados se han enfriado a temperatura ambiente. Para su determinación se utilizó el Método de la Muestra Impermeabilizada. Se recubrió toda la superficie de la muestra con una capa del material impermeabilizante, de espesor suficiente para asegurar el cierre de todos los huecos superficiales (parafina a 58 °C). La muestra recubierta se dejó enfriar al aire durante unos 30 minutos y se determinó su masa, designando este valor D. Posteriormente se determinó la masa de la muestra impermeabilizada en el agua, sumergiéndola dentro del cestillo de la balanza y se otorgó el valor E. La densidad de la parafina es de 1,12 g/cm<sup>3</sup> (F). La densidad se calculó por la expresión:

$$D_a = \frac{A}{\left(\frac{D-E}{\delta}\right)\left(\frac{D-A}{F}\right)}$$

### Determinación de los parámetros volumétricos

Para todos los cálculos donde se requiera determinar el volumen ocupado por los áridos, se utilizará su peso específico corriente. Con el objeto de facilitar los cálculos del porcentaje de huecos, se determina el valor del peso específico de los áridos combinados (PEcomb) con el uso de la ecuación:

$$PE_{comb} = \frac{100}{\left(\frac{P_1}{PEC_1}\right) + \left(\frac{P_2}{PEC_2}\right) + \left(\frac{P_3}{PEC_3}\right) + \dots + \left(\frac{P_n}{PEC_n}\right)}$$

Donde:

P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub>: Porcentaje de los áridos 1,2,3...con relación al peso total de áridos (%)

PEC<sub>1</sub>, PEC<sub>2</sub>, PEC<sub>3</sub>, PEC<sub>n</sub>: Peso específico corriente de los áridos 1, 2, 3..., n (g/cm<sup>3</sup>)

Si se desconocen los valores del peso específico efectivo, se puede asumir la absorción de asfalto como el 50 % de la absorción al agua en los áridos calizos y del 30 % para los áridos de origen ígneos (serpentinita). El porcentaje de agua absorbida por la muestra seca se calcula:

$$\% \text{ absorción} = \frac{B - A}{A} 100$$

Donde:

A: Peso de la muestra secada en la estufa, (g)

B: Peso de la muestra saturada con superficie seca

Proporción de asfalto absorbido (Pba), en %

$$P_{ba} = \frac{A_b P_a}{100}$$

Proporción de asfalto efectivo (Pbe), en %

$$P_{be} = P_b - P_{ba}$$

Densidad máxima teórica de las muestras compactadas (DMT)

$$DMT = \frac{100}{\frac{P_a}{PE_{comb}} + \frac{P_b}{PE_b} - \left( \frac{A_b P_a}{100 \cdot PE_b} \right)}$$

Donde:

Pa: Porcentaje de áridos referidos al peso de la mezcla, (%)

Pb: Porcentaje de asfalto total referido al peso de la mezcla, (%)

PEb: Peso específico del asfalto, (g/cm<sup>3</sup>)

## Porcentaje de huecos en los áridos compactados

$$HA = 100 - \frac{P_a D_a}{PE_{comb}}$$

## Porcentaje de huecos en la mezcla compactada

$$HA = 100 - \frac{100 \cdot D_a}{PE}$$

## Determinación del peso específico del asfalto

El peso específico es la relación del peso de un volumen determinado de material y el peso de igual volumen de agua, estando ambos materiales a temperaturas específicas. Para fijar condiciones determinadas aplicables a un valor dado del peso específico, debe indicarse la temperatura del material y del agua. Este es uno de los factores para la determinación de los huecos en las mezclas asfálticas, válido para hacer las correcciones de volumen cuando se mide a temperaturas elevadas.

## Resultados y discusión

### Ensayos realizados a las materias primas

Se obtuvo un 7 % de material pasado por el tamiz No. 200.

### Análisis del ensayo granulométrico

Se tomó una muestra de desechos de serpentina de 2000 g. Se tamizó la muestra seleccionando 6 tamices desde el de 4.76 mm hasta el 0.074 mm. A los 10 min en la tamizadora se pesó el contenido retenido y se calculó la equivalencia al porcentaje acumulado y al porcentaje que pasa por el tamiz (Tabla 2).

Tabla 2. Resultados de la muestra de desechos de serpentinita

Tamiz (mm) Pasado-Retenido	Masa retenida (g)	Retenido (%) Parcial	Acumulado (%)	Acumulado (%)
2,38	232,7	11,635	11,635	88,365
0,63	547,9	27,395	39,03	60,97
0,315	430,7	21,535	60,565	39,435
0,149	327,8	16,39	76,955	23,045
0,074	230,6	11,53	88,485	11,515
Fondo	230,3	11,515	100	0

Según la NC 253 (2005) el material no cumple con la granulometría para filler, debido a que el porciento (0.074) que pasa el tamiz 200 es muy pequeño, sin embargo, pudiera aplicarse si se somete a un proceso de trituración. Por otra parte, sí cumple para árido fino al igual que para la norma referente al polvo de piedra.

### Peso volumétrico

Para la realización de este ensayo se utilizó un recipiente de masa 1194 g con un volumen de 2720 cm<sup>3</sup>, y una pesa. Se rellenó vertiendo el material ligeramente apuntando hacia el centro del mismo, se separó el material sobrante hasta quedar al nivel del envase. Se obtuvo un peso suelto de 1580,4 g. Para determinar el peso compactado el envase se dividió en 3 fracciones iguales, que se convirtieron en tres capas, al ser vertido el material. Cada capa recibió 25 golpes sin afectar la anterior hasta completar el recipiente, luego se pesó y se obtuvo un peso compactado de 4458 g. Partiendo de los pesos obtenidos se calculó la densidad suelta y la compactada. Se obtuvo: D suelta=1.02 g/cm<sup>3</sup>; D compactada = 1.12 g/cm<sup>3</sup>

### Resultados para de las variantes propuestas

La tabla 3 muestra los resultados de los ensayos realizados al asfalto con desechos serpentíníticos como agregado pétreo en ambas variantes.

Tabla 3. Resultados de los ensayos realizados a los residuos

Variantes	Asfalto (%)	Densidad real (g/cm <sup>3</sup> )	Estabilidad (KN)	Deformación(mm)	% vacío
1	6	2.22	7.51	2.04	6.3
2	5,4	2.57	11.43	3.16	4.8

Las especificaciones vigentes propuestas en las normas NC 253-2005 y NC 261-2005 para los diferentes ensayos realizados a la mezcla densa son:

Porcentaje de asfalto: 5-6

Estabilidad: 9,25-11

Deformación: 2-3

Vacio en la mezcla: 4-6

Densidad: 2,30-2,32

La primera variante cumple con la norma en todos los aspectos excepto en el porcentaje de vacíos cuyo resultado excede en 0,3 % a lo estipulado, un valor pequeño que puede

no afectar de manera considerable la mezcla pero que es necesario señalar. La segunda variante, si bien no cumple con lo establecido en la norma, los valores se acercan de manera considerable, lo cual demuestra que pueden ser utilizadas ambas variantes tomando prioritariamente la Variante 1.

Teniendo en cuenta los resultados de la mezcla asfáltica, así como los ensayos al desecho de serpentinita, se propone como dosificación más acertada la Variante 1 (5.8 % de cemento asfáltico, + 60 % de desecho serpentínítico, + 34.2 % de granito).

### Análisis técnico

Con los resultados del ensayo Marshall, se puede realizar un análisis para verificar la calidad técnica que presenta el desecho serpentínítico para sustituir al polvo de piedra en el diseño de mezclas asfálticas en caliente. Para lograr este análisis se comparan los resultados de los ensayos correspondientes practicados al material y se evalúa su conformidad de acuerdo a lo planteado por la NC-759:2010. Al realizar la comparación, se determina que el desecho serpentínítico, se pueden utilizar como sustituto del polvo de piedra (Variante No.1). Entre las ventajas se destacan:

1. El desecho serpentínítico cumple con la granulometría normada superando, en ocasiones, los estándares de calidad, por lo que se considera que pueden ser una opción alternativa.
2. A diferencia del polvo de piedra, cumple con lo requerido en el ensayo de material más fino que el tamiz 200, lo que contribuye al ahorro del asfalto, aumento de la calidad y disminución de los gastos.
3. Presenta similitud al polvo de piedra en cuanto al porcentaje de huecos (aunque logra minimizarlo en un pequeño %)
4. El material se manifiesta conforme además con respecto al módulo de finura, dándole ventaja sobre el polvo de piedra, de esta manera se considera que contribuye en la disminución del porcentaje de vacíos.

## Conclusiones

Los desechos serpentíníticos de la empresa Moa Nickel S.A. reúnen características y propiedades propicias para ser utilizadas como sustituto al polvo de piedra en mezclas asfálticas en caliente, por su similitud con las propiedades de este material, no así para el caso de sustitutos del árido grueso.

Se realizó una propuesta de dosificación que permite obtener resultados ventajosos desde los puntos de vista medioambiental, económico y técnico con respecto a una mezcla común.

En el rango de composiciones, granulometrías y demás condiciones experimentales utilizadas en este estudio los resultados obtenidos indican que la composición 60 % del desecho serpentínítico resulta la más adecuada.

## Referencias bibliográficas

- Andrade, A., Castillo, G., & Chacater, C. (2021). Efecto de la variabilidad de los datos iniciales en el índice de condición del pavimento y predicción de su deterioro. *Novasinergia*, 4(1). <https://doi.org/10.37135/ns.01.07.06>
- Beyra-Fernández, D.M., Ruiz-Quintana, J., Ramírez-Pérez, M.C., Pons-Herrera, J., & Beira-Fontaine, E. (2023). Escenarios probables en la producción de asfaltos a partir de crudos pesados en refinerías cubanas. *Minería y Geología*, 39(2), 108-117. <https://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamq/article/view/2403>
- Bobadilla Peña, J.R., Tigre Acosta, J.J., Tesen Muñoz, F.L., & Muñoz Pérez, S.P. (2022). Uso de polímeros en asfalto: una revisión. *Revista Gaceta Técnica. Ensayo*, 23(1), 94-109. <https://doi.org/10.51372/gacetatecnica231.7>
- Cardona-Moncada, V.H., López-Lara, T., Horta-Rangel J. M., & Hernández-Zaragoza, J.B. (2023). Estabilidad y flujo en una mezcla asfáltica con sustitución parcial en el agregado pétreo por desechos de toba volcánica. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 24(1), 1-10. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2023.24.1.003>
- Cobeña Loor, W.D., Quiroz, F.N., Moreira, J.J., Vera, J.A., & Delgado, J.A. (2025). Uso de materiales reciclados en la construcción de pavimentos urbanos. *Estudios y*

perspectivas. *Revista científica y académica*, 5(3), 4165-4178.  
<https://doi.org/10.61384/r.c.a..v5i3.14.56>

Deepa, D., & Sivasangari, A. (2023). An effective detection and classification of road damages using hybrid deep learning framework. *Multimedia Tools and Applications*, 82(12), 18151-18184. <https://doi.org/10.1007/s11042-022-14001-9>

Díaz-Romero, P., Braham, A., & Andrew, F. (2022). Especificación de tamaño de partículas de refino para emulsión asfáltica. *Construction and Building Materials*, 350. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4087429>

Ibragimov, E., Kim, Y., Lee, J.H., Cho, J. & Lee, J.J. (2024). Automated Pavement Condition Index Assessment with Deep Learning and image Analysis: An End-to-End Approach. *Sensors*, 24(7). <https://doi.org/10.3390/s24072333>

Milad, A. (2025). Recycled and upcycled materials in contemporary architecture and civil engineering: Their applications, benefits, and challenges. *Cleaner Waste Systems*, 10 <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2025.100203>

Montoya-Alcaraz, M., Mungaray-Moctezuma, A., & García, L. (2020). Sustainable road maintenance planning in developing countries based on pavement management systems: Case study in Baja California, México. *Sustainability*, 12(1). [https://doi.org/10.3390/su120\\_10036](https://doi.org/10.3390/su120_10036)

Moradi, M., & Assaf, G.F. (2023). Designing and Building an Intelligent Pavement management System for Urban Road Networks. *Sustainability*, 15(3). <https://doi.org/10.3390/su15021157>

Oficina Nacional de Normalización. (2002). NC 178. *Análisis granulométrico*. <https://ftp.isdi.co.cu/Biblioteca/BIBLIOTECA UNIVERSITARIA DEL ISDI/COLECCION DIGITAL DE NORMAS CUBANAS/2002>

Oficina Nacional de Normalización. (2005). NC 253:2005. Carreteras-Materiales Bituminosos-Hormigón Asfáltico Caliente. Especificaciones. <https://ftp.isdi.co.cu>

Oficina Nacional de Normalización. (2005). NC 261:2005. Determinación del contenido óptimo de asfalto empleando el equipo Marshall. <https://ftp.isdi.co.cu>

Osorio-Ormaza, L.M., Borda, J., & Torres, R. (24-27 de septiembre de 2024). *Efecto de la temperatura de lixiviación sobre la disolución de níquel contenido en escorias residuales de mineral de níquel empleando un reactivo orgánico* (Ponencia). Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería, ACOFI, Colombia. <https://doi.org/10.26507/paper.3854>

Pons-Herrera, J.A., Ramírez Pérez, M.C., Perdomo-González, L., Cruz-Crespo, A., Angulo-Palma, J., & Legrá, A. (2024). Obtención de ferro-cromo-níquel a partir de materias primas de la región de Moa, Cuba. *INFOMIN* 16. <https://cu-id.com/2144/v16e11>

Quintana Puchol, R., Rodríguez Sosa, E., Perdomo González, L., Paumier Castañeda, Y., & Yanes Sierra, I. (2016). Concepción novedosa de la reutilización de los residuos sólidos de la industria hidrometalúrgica nikelífera cubana. *Centro Azúcar*, 43(4), 1-15. <http://scielo.sld.cu/pdf/caz/v43n4/caz01416.pdf>

Rybak-Niedziółka, K., Starzyk, A., Lacek, P., Mazur, L., Myszka, I., Stefanska, A., Kurcjusz, M., Nowysz, A., & Langie, K. (2023). Use of waste building materials in architecture and urban planning. A review of select examples. *Sustainability*, 15(16). <https://doi.org/10.3390/su15065047>

Santana, M., & Machado, A. (2025). Gestión de mantenimiento del km 500 al km 505, 2 de la Carretera Central. *Universidad & Ciencia*, 14(2). <https://doi.org/10.5281/zenodo.15345622>

Shtayat, A., Moridpour, S., Best, B., Shroff, A., & Raol, D. (2000). A review of monitoring systems of pavement condition in paved and unpaved roads. *Journal of Traffic and transportation Engineering*, 7(5), 629-638. <https://doi.org/10.16/j.jtte.2020.03.004>

Tobar-Insuasty, C.A. (2024). Impacto de la Inversión en infraestructura vial sobre el crecimiento económico del Departamento de Nariño, Colombia. *Ciencia Latina*, 8(5), 1254-1274. [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcmv8i5.13550](https://doi.org/10.37811/cl_rcmv8i5.13550)

Toral, V., Krushangi, T., & Harishkumar, V.R. (2023). Automated potholes detection using vibration and vision-based techniques. *World Journal de Advanced Engineering Technology and Sciences*, 10(1). <https://doi.org/10.30574/wjaets.2023.10.1.0276>

Zambrano-Bastidas, C.E., & Villacreses-Viteri, C.G. (2023). Gestión de la conservación de la vía de acceso a San Juan del cantón Manta-Ecuador a través del sistema HDM-4. *Revista Científica Multidisciplinaria Arbitrada YACHASUN*, 7(12), 2697-3456. <https://doi.org/10.46296/yc.v7i12.0288>

Zapata Ferrero, I., Rivera, J., & Botasso, G. (2024). Mezclas asfálticas con polvo de neumático fuera de uso como parte de la economía circular. *Innovación y Desarrollo Tecnológico y Social*, 6. <https://doi.org/10.24215/26838559e047>