

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
Escuela Profesional de Ingeniería Civil



**Evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica
tibia modificada con escoria de acero**

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Civil

Autor:

Bach. Miguel Angel Pucutuni Larico
Bach. Lucy Mabel Ayala Huaman

Asesor:

Mg. Jaulis Palomino Reymundo

Lima, junio de 2024

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD DE TESIS

Yo Reymundo Jaulis Palomino docente de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Civil, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: **“EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA TIBIA MODIFICADA CON ESCORIA DE ACERO”** de los autores Miguel Angel Pucutuni Larico y Lucy Mabel Ayala Huaman tiene un índice de similitud de 12% verificable en el informe del programa Turnitin, y fue realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponde ante cualquier falsedad u omisión de los documentos como de la información aportada, firmo la presente declaración en la ciudad de Lima, a los 17 días del mes de junio del año 2024



Mg. Reymundo Jaulis Palomino

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En Lima, Naña, Villa Unión, a los 26 día(s) del mes de junio del año 2024, siendo las 9:00 horas, se reunieron los miembros del jurado en la Universidad Peruana Unión Campus Lima, bajo la dirección del (de la) presidente(a):

Ing. Fiorella Maira Zapata Antesana, el (la) secretario(a): Ing. David Diaz Garamendi

y los demás miembros: Mg. Armin Quintana Sanchez

y el (la) asesor(a) Mg. Reymundo Taulis Palomino

con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulado:
"Evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica tibia modificada con escoria de acero"

del(los) bachiller(es): a) Miguel Angel Pucutuni Larico

b) Lucy Mabel Ayala Huaman

c) _____

conducente a la obtención del título profesional de:

Ingeniero Civil
(Denominación del Título Profesional)

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Bachiller (a): Miguel Angel Pucutuni Larico

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>17</u>	<u>B+</u>	<u>Muy bueno</u>	<u>Sobresaliente</u>

Bachiller (b): Lucy Mabel Ayala Huaman

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>16</u>	<u>B</u>	<u>Bueno</u>	<u>Muy bueno</u>

Bachiller (c): _____

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	

(*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

 Presidente/a

 Asesor/a

 Miembro

 Miembro

 Bachiller (a)

 Bachiller (b)

 Bachiller (c)

* Esta sustentación fue realizada de manera virtual u online sincrónica según conforme al Reglamento General de Grados y Títulos.

INDICE

RESUMEN	5
INTRODUCCIÓN	6
OBJETIVOS	8
METODOLOGÍA.....	8
Diseño Metodológico	8
Diseño Muestral.....	8
DESARROLLO.....	8
Caracterización Físico – Mecánica de Los Materiales.....	8
Desempeño mecánico de las mezclas asfálticas tibias	11
Beneficio del Empleo de Escoria de Acero en Mezclas Asfálticas Tibias.....	13
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	14
CONCLUSIONES.....	16
REFERENCIAS.....	17
ANEXOS	19

REVISTA INFRAESTRUCTURA VIAL

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA TIBIA MODIFICADA CON ESCORIA DE ACERO

EVALUATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF A WARM ASPHALT MIXTURE MODIFIED WITH STEEL SLAG

Miguel Angel Pucutuni Larico

Universidad Peruana Unión, Perú, miguelpucutuni@upeu.edu.pe

Lucy Mabel Ayala Huaman

Universidad Peruana Unión, Perú, lucyayala@upeu.edu.pe

Reymundo Jaulis Palomino

Universidad Peruana Unión, Perú, reymundojaulis@upeu.edu.pe

RESUMEN

El objetivo de la presente investigación fue la evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica tibia modificada con escoria de acero. El estudio contó con un diseño experimental, de tipo básico, con alcance explicativo y enfoque cuantitativo, donde la muestra estuvo compuesta por 60 briquetas adicionadas con 0%, 5%, 7.5% y 10% de escoria de acero en sustitución parcial del agregado pétreo. Entre los resultados más importantes se mencionan, como parte de la caracterización físico-mecánica de los materiales empleados, una granulometría de tamaños variados, predominando la presencia de partículas de tamaño medio a fino, el porcentaje de absorción fue de 0.88% para el agregado grueso y de 0.33% para el agregado fino, además, los agregados presentaron en su totalidad resultados que cumplen las especificaciones requeridas. El ensayo Marshall determinó que las mezclas cumplen los requerimientos establecidos en las Especificaciones Generales del MTC EG-2013, sin embargo los porcentajes de 5.0 y 10.0% registran valores límites a los requeridos como porcentajes de vacíos 4.1 y 5.0% respectivamente, flujo en 14.6 y 14.7% respectivamente y el más relevante la rigidez (relación estabilidad flujo) con valores de 3366.1 y 3955.8 respectivamente, la mezcla con 7.5% presentó los mejores valores que requiere la Norma establecida, porcentaje de vacíos 4.6%, flujo 13.8%, estabilidad 1091.9 kg y rigidez 3116.9 kg/cm, el análisis estadístico de los resultados mostró que se puede sustituir el agregado por escoria de acero en las proporciones de 5%, 7.5% y 10% sin producir diferencias significativas en las propiedades de la mezcla asfáltica tibia, siendo la mezcla con 7.5% la que presenta propiedades más adecuadas para su uso en casos reales.

Palabras clave: Ensayo Marshall, Estabilidad, Flujo, Porcentaje de vacíos.

ABSTRACT

The objective of the present investigation was the evaluation of the mechanical properties of a warm asphalt mixture modified with steel slag. The study had a basic experimental design, with an explanatory scope and quantitative approach, where the sample was composed of 60 briquettes added with 0%, 5%, 7.5% and 10% of steel slag in partial replacement of the stone

aggregate. Among the most important results are mentioned, as part of the physical-mechanical characterization of the materials used, a granulometry of varied sizes, predominating the presence of medium to fine sized particles, the absorption percentage was 0.88% for the coarse aggregate. and 0.33% for fine aggregate; in addition, all aggregates presented results that meet the required specifications. The Marshall test determined that the mixtures meet the requirements established in the General Specifications of the MTC EG-2013, however the percentages of 5.0 and 10.0% register limit values to those required as percentages of voids 4.1 and 5.0% respectively, flow at 14.6 and 14.7% respectively and the most relevant the rigidity (flow stability relationship) with values of 3366.1 and 3955.8 respectively, the mixture with 7.5% presented the best values required by the established Standard, percentage of voids 4.6%, flow 13.8%, stability 1091.9 kg and stiffness 3116.9 kg/cm, The statistical analysis of the results showed that up to 7.5% of aggregate can be replaced by steel slag without producing significant differences in the properties of the warm asphalt mixture, the mixture with 7.5% being the one that presents the most suitable properties for use in real cases.

Keywords: Marshall test, Stability, Flow, Percentage of voids.

INTRODUCCIÓN

La infraestructura vial es uno de los ejes centrales que contribuyen de manera positiva al desarrollo socioeconómico de una región, sin embargo, esta actividad genera efectos negativos en el medio ambiente particularmente, en el proceso de producción de mezclas asfálticas en caliente (Córdoba et al., 2020). En tal sentido, se ha investigado sobre diferentes materiales para ser incorporados en mezclas asfálticas, entre ellos, las fibras de polímeros, fibras naturales y fibras de acero. Uno de estos subproductos más empleados es la escoria de acero que, además de ser ampliamente usados como agregados de cemento y morteros, también ha sido empleado como agregado para elaboración de concreto asfáltico (Rojas et al., 2021).

Adicional a ello, el crecimiento en la demanda de infraestructura, industria y consumos, propiciados por el desmedido aumento poblacional y, el avance de la tecnología ha generado una mayor exigencia en volúmenes de tráfico y cargas para la infraestructura vial. Estas condiciones, combinadas por la acción de factores climáticos, provocan un envejecimiento prematuro de la carpeta de rodadura de mezclas asfálticas tradicionales (Vásquez y Flórez, 2020). Es así que, incluso las carreteras de superficie bituminosa bien diseñadas, experimentan fallas estructurales que afectan la transitabilidad y su tiempo de vida útil (Kar et al., 2019).

Dentro de las fallas más recurrentes en superficies asfálticas se tienen los hundimientos o provocados por la tensión aglomerada en el cemento asfáltico, la forma y el entrelazado de los áridos, fallas que aceleran el deterioro de los pavimentos, sumando costos por reparación y mantenimiento, respecto a la construcción (Al-Sabaei et al., 2022). Otra falla muy frecuente, es la generada por agrietamiento por fatiga, producto de micro y macro grietas provocadas por el flujo vehicular, siendo afectada también, por cambios de temperaturas, humedad y envejecimiento, siendo una de las principales causantes de la pérdida de vida útil de mezcla asfáltica (Usman et al., 2019). Por tales motivos ha venido surgiendo el empleo de nuevas tecnologías para reducir las temperaturas de calentamiento del cemento asfáltico y los agregados pétreos sin comprometer el desempeño, de allí se originan las mezclas asfálticas tibias, con una temperatura inferior en comparación con las tradicionales (Córdoba et al., 2020).

En vista de lo anterior, resalta la conveniencia de optimizar el uso de materiales en el diseño de mezclas asfálticas tibias, para conseguir mayores prestaciones, no solo desde el punto de vista

práctico y ecológico, sino también, desde un punto de vista técnico. A lo anterior se suma el hecho de que las mezclas asfálticas tibias no son comúnmente utilizadas debido a la falta de conocimiento y experiencia generalizada, lo que impide que los contratistas e ingenieros empleen esta técnica a mayor escala (Sukhija & Saboo, 2021). En este sentido, la presente investigación apunta a fundamentar las ventajas de emplear este tipo de mezclas en particular, proponiendo además la sustitución parcial del agregado pétreo por escoria de acero, lo que puede traer ventajas adicionales y motivar en mayor medida el uso de esta tecnología.

En este contexto, una investigación realizada por Alnadish et al. (2021) evaluó una mezcla asfáltica tibia incorporando agregado grueso de escoria de acero; la misma se produjo a diferentes temperaturas más bajas que las mezclas asfálticas de control en 10, 20 y 30 °C. Los hallazgos del estudio revelaron que, las mezclas asfálticas tibias producida a 150°C exhibieron mejor resultado en la resistencia al daño por humedad; así mismo, se determinó que todas las mezclas asfálticas tibias experimentaron mayor módulo de rigidez y resistencia a la deformación permanente en comparación con los agregados naturales incorporados con las mezclas asfálticas de control (en caliente). Por su parte, Goli et al. (2022), realizaron una comparación de las características de humedad entre mezclas asfálticas tibias que contenían pavimento asfáltico recuperado (RAP) y escoria de acero (SS). Los resultados obtenidos muestran que las mezclas SS-WMA mostraron un mejor desempeño contra la humedad frente a las mezclas RAP-WMA y, por lo tanto, pueden recomendarse como sustituto de RAP-WMA en regiones donde prevalece el daño por humedad.

De manera similar, se tienen los aportes de Amelian et al. (2018), quienes estudiaron la sensibilidad a la humedad y el desempeño mecánico de mezclas asfálticas tibias incorporadas con subproducto escoria de acero en dosis de 1.55 y 2.5% y, aditivo químico Sasobit. Los resultados evidenciaron que la combinación de agregados de escoria de acero y el aditivo, produjeron resultados satisfactorios, al obtenerse tasas de TSR (pruebas de estabilidad de Marshall) y RMS (prueba de modulo elástico) en las mezclas asfálticas tibias superiores en 80%, en cuanto a la fracción de pérdida en la prueba de ebullición, solo fue 4.4% hasta 2.5% de sasobit. Por su parte, Ziaee y Behnia (2020) estudiaron el efecto de la escoria de acero de horno de arco eléctrico en el comportamiento mecánico y dinámico de mezclas asfálticas tibias; donde emplearon especímenes de prueba de 0, 25%, 50% y 75% de la escoria de acero como sustituto parcial de la piedra caliza natural; las mismas también fueron modificadas con aditivo sasobit en 1.5% en peso de betún. Los autores determinaron que, el uso de estos materiales mejora las propiedades mecánicas, observándose el mayor resultado en hasta 343% en la prueba de fluencia dinámica y una mejora más leve de hasta 17% en la resistencia a tracción.

Finalmente, se tienen los aportes de Parra y Bautista (2018), quienes se plantearon el diseño de una mezcla asfáltica tibia (WMA) reciclada sustituyendo parcialmente los agregados pétreos en 7.5%, 14% y 22.5% por escoria de alto horno (BFS). Adicionalmente, empleo un aditivo HUSIL en 1%. Se concluye que las mezclas de control MDC aumentan su contenido de vacíos con aire cuando es sustituido el agregado pétreo natural por BFS, particularmente para las dosis de 7.5% y 14%. Así mismo, la incorporación del aditivo, disminuye los vacíos dando lugar a un aumento de la resistencia bajo carga monotónica, una reducción en 30°C de la temperatura de fabricación alcanzando resistencias en el ensayo de Marshall similares o superiores a la de la mezcla de control.

Partiendo de las experiencias anteriores, en la presente investigación se busca indagar sobre el resultado de emplear escoria de acero como sustituto parcial del agregado pétreo en una mezcla asfáltica tibia y su efecto en sus propiedades mecánicas.

OBJETIVOS

La investigación tiene como objetivo general: Evaluar las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica tibia modificada con escoria de acero. De allí se desprenden los siguientes objetivos específicos: OE1: Determinar la caracterización físico mecánicas de los materiales empleados para la elaboración de las mezclas asfálticas tibias; OE2: Comparar el desempeño mecánico entre las mezclas asfálticas tibias modificadas con diferentes dosificaciones de escoria de acero y una mezcla asfáltica tibia no modificada; OE3: Evaluar el beneficio de emplear escoria de acero en mezclas asfálticas tibias.

METODOLOGÍA

Diseño Metodológico

La investigación se enmarcó en un diseño experimental, ya que se modificó una variable independiente (porcentaje de escoria de acero), observando su efecto en otra variable dependiente (propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica); el alcance fue explicativo, ya que se contó con abundante información al respecto para comprender las causas de la variación en las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica como función de la proporción de escoria de acero en la misma; el estudio tuvo un enfoque cuantitativo, ya que se realizaron mediciones sobre variables obteniendo resultados numéricos, lo que requirió del uso de la estadística para el procesamiento de datos (Hernández & Mendoza, 2018).

Diseño Muestral

La población consistió en cuatro diseños de mezclas: tres con diferentes porcentajes de escoria de acero y una sin escoria, que sirvió como patrón de comparación. El total de escoria de acero se varió entre 5%, 7.5% y 10% como sustituto parcial del agregado pétreo, donde el número de muestras a emplear por cada dosificación se señala en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Número de muestras por método Marshall

Porcentaje de escoria de acero	Método Marshall
0%	15
5%	15
7.5%	15
10%	15
Total	60

DESARROLLO

Caracterización Físico – Mecánica de Los Materiales

Para determinar las características granulométricas de los agregados empleados en la mezcla asfáltica, se realizaron ensayos granulométricos (Figura 1) de acuerdo con la norma del Ministerio de Transporte y Comunicaciones (MTC).



Figura 1. Ejecución de ensayo granulométrico

En el Cuadro 2 se muestran los resultados obtenidos para la muestra de grava chancada, donde se puede observar que la mayor parte del material queda retenido en los tamices 3/8", 1/4" y N° 4, indicando que la muestra cuenta con una cantidad significativa de partículas de tamaño medio a fino.

Cuadro 2. Granulometría de la grava chancada

Tamiz	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	% Pasante
3/4"				100.0
1/2"	344.0	11.3	11.3	88.7
3/8"	1110.0	36.3	47.6	52.4
1/4"	642.0	21.0	68.6	31.4
N° 4	731.0	23.9	92.5	7.5
N° 6	92.0	3.0	95.5	4.5
N° 8	126.0	4.1	99.7	0.3
N° 10	8.0	0.3	99.9	0.1
N° 16	2.0	0.1	100.0	0.0
% de humedad: 1.10		Limite liquido (%): --		
% de grava: 92.5		Limite plástico (%): --		
% de arena: 7.5		Índice de plasticidad (%): --		

Por su parte, la arena empleada se encuentra compuesta por una variedad de tamaños de partículas, tal como se puede observar en los diferentes porcentajes retenidos del Cuadro 3. De acuerdo con esto, la muestra cuenta con una proporción sustancial de partículas de tamaño fino, de acuerdo con el porcentaje retenido en el tamiz N° 200 y la bandeja. De igual manera, se obtuvo un contenido de humedad de 2.10%, el cual es considerado como moderadamente medio.

Cuadro 3. Granulometría de la arena

Tamiz	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	% Pasante
1/4"				100.0
N.º 4	93.0	8.5	8.5	91.5
N.º 6	112.0	10.2	18.7	81.3
N.º 8	88.0	8.0	26.7	73.3
N.º 10	40.0	3.6	30.3	69.7
N.º 16	79.5	7.2	37.6	62.4
N.º 20	75.0	6.8	44.4	55.6
N.º 30	108.0	9.8	54.3	45.7

Tamiz	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	% Pasante
N.º 40	102.0	9.3	63.5	36.5
N.º 50	64.7	5.9	69.4	30.6
N.º 80	121.0	11.0	80.5	19.5
N.º 100	38.0	3.5	83.9	16.1
N.º 200	81.0	7.4	91.3	8.7
Bandeja	95.4	8.7	100.0	0.0
% de humedad: 2.10		Limite liquido (%): 21		
% de grava: 8.5		Limite plástico (%): NP		
% de arena: 82.8		Índice de plasticidad (%): NP		
% tamiz 200: 8.7		Índice de plasticidad (%) #200: NP		

Finalmente, de acuerdo con el análisis granulométrico, la escoria de acero empleada cuenta con una distribución de tamaños de partículas de medianas a pequeñas, quedando retenidas en mayor proporción en los tamices de 3/8", 1/4" y N°4, como se puede apreciar en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Granulometría de la escoria de acero

Tamiz	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	% Pasante
3/4"				100.0
1/2"	167.0	4.0	4.0	96.0
3/8"	479.0	11.5	15.6	84.4
1/4"	496.0	12.0	27.5	72.5
N.º 4	623.0	15.0	42.5	57.5
N.º 6	289.0	7.0	49.5	50.5
N.º 8	251.0	6.0	55.5	44.5
N.º 10	206.0	5.0	60.5	39.5
N.º 16	250.6	6.0	66.5	33.5
N.º 20	187.0	4.5	71.1	28.9
N.º 30	205.8	5.0	76.0	24.0
N.º 40	217.0	5.2	81.2	18.8
N.º 50	269.0	6.5	87.7	12.3
N.º 80	145.2	3.5	91.2	8.8
N.º 100	206.2	5.0	96.2	3.8
N.º 200	158.2	3.8	100.0	0.0
Bandeja				
% de humedad: 1.10		Limite liquido (%): --		
% de grava: 42.5		Limite plástico (%): --		
% de arena: 57.5		Índice de plasticidad (%): --		

Por otra parte, en el cuadro 5 se presentan los resultados de los ensayos realizados para conocer las propiedades mecánicas de los agregados correspondiente a la Cantera Portillo - Carapongo sometido a diversos ensayos como: Durabilidad al sulfato de Magnesio, abrasión de los Ángeles, Adherencia, partículas chatas y alargadas, caras de fracturas, Sales solubles y absorción de agregados gruesos, ensayo de la máquina de Los Ángeles para evaluar la resistencia a la abrasión e impacto. Equivalente de arena, angularidad de agregados, azul de Metileno, Índice de plasticidad, sales solubles y absorción de agregados finos de acuerdo con los requerimientos de las Especificaciones Generales del MTC EG-2013.

Cuadro 5. Propiedades mecánicas de los agregados.

Agregado grueso		Agregado fino	
Ensayo	Resultado	Ensayo	Resultado
Durabilidad al Sulfato de Magnesio	3.56%	Equivalente de arena	63%
Abrasión de los Ángeles	23.50%	Angularidad del agregado fino	48.13%
Adherencia	+ 95	Azul de Metileno	5%
Partículas chatas y alargadas	7.00%	Índice de plasticidad (malla N° 40)	NP
Caras fracturadas	85/70	Durabilidad al Sulfato de Magnesio	4.94%
Sales solubles totales	0.10%	Índice de plasticidad (malla N° 200)	NP
Absorción	0.88%	Sales solubles totales	0.10%
		Absorción	0.33%

Así mismo los agregados fueron dosificados en proporción de 40% de piedra Chancada y 60% de arena chancada es por ello que en el Cuadro 6 se observa que los agregados cumplen con los requerimientos de mezcla MAC 2 para mezcla asfáltica.

Cuadro 6. Granulometría de la mezcla.

Tamiz	% Retenido	% Pasante	MAC 2	
			Min.	Max.
3/4"		100	100	
1/2"	4.5	95.5	80	100
3/8"	14.5	81.0	70	88
N.º 4	14.7	57.9	51	68
N.º 10	2.4	41.8	38	52
N.º 40	5.5	22.0	17	28
N.º 80	6.6	11.8	8	17
N.º 200	4.4	5.3	4	8

Desempeño mecánico de las mezclas asfálticas tibias

Para evaluar el desempeño mecánico de las diferentes mezclas asfálticas se fabricaron especímenes para ser ensayados por el método Marshall, los cuales pueden ser observados en la Figura 2.



Figura 2. Especímenes de prueba

Luego de realizado los ensayos a cada tipo de mezcla, los resultados obtenidos de cada propiedad evaluada pueden ser observados en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Resultados promedio del ensayo Marshall.

Contenido de escoria de acero	Peso específico (gr./cm. ³)	% vacíos (%)	Porcentaje óptimo de asfalto (%)	Flujo (0.01")	Estabilidad (kg)	Relación estabilidad/flujo (kg/cm)
0.0%	2.365	4.0	6.0	13.0	977.3	2961.4
5.0%	2.328	4.1	6.4	14.6	1245.5	3366.1
7.5%	2.377	4.6	7.0	13.8	1091.9	3116.9
10.0%	2.280	5.0	7.1	14.7	1463.6	3955.8

En relación con el peso específico de la mezcla, la Figura 3 muestra los resultados obtenidos, los cuales no presentan una tendencia clara respecto al contenido de escoria, no obstante, se observa un incremento significativo en la mezcla con 7.5% de escoria de acero, indicando una mayor densidad para esta proporción específica.

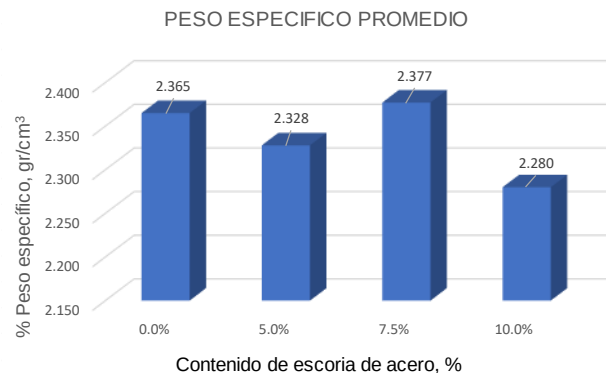


Figura 3. Peso específico promedio de la mezcla asfáltica

En cuanto al porcentaje de vacíos de la mezcla, los resultados muestran una variación ascendente. Por su parte, la mezcla con 10.0% de escoria de acero presentó un mayor porcentaje de vacíos entre las mezclas evaluadas, como se muestra en la Figura 4. Esto puede tener efectos negativos en las propiedades mecánicas y durabilidad de la mezcla, dado que un mayor contenido de vacíos aumenta la susceptibilidad a la infiltración de agua conduciendo a problemas como la deformación permanente y formación de grietas

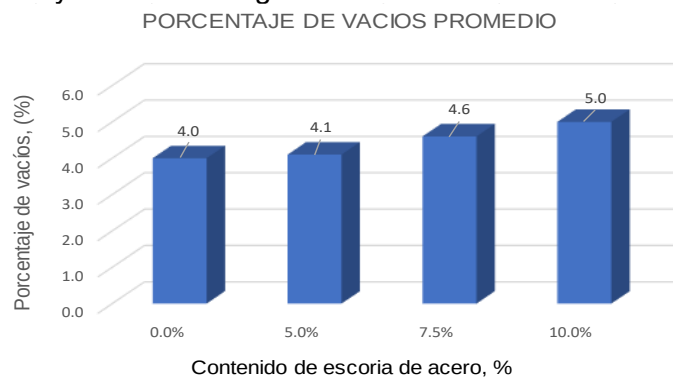


Figura 4. Porcentaje de vacíos de la mezcla asfáltica

Con relación al flujo de la mezcla, en la Figura 5 se puede observar que al agregar un 5% y 10% los incrementos están al límite de lo permitido, sin embargo, a 7.5% el resultado es más aceptable.

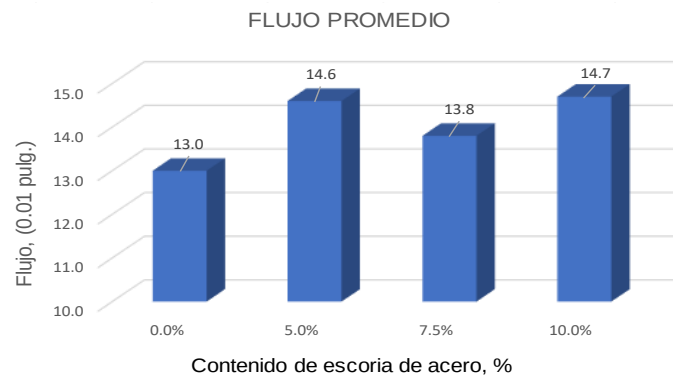


Figura 5. Flujo de la mezcla

Finalmente, en la Figura 6 se puede apreciar que, la estabilidad de las mezclas con diferentes porcentajes de escoria de acero presenta una tendencia general al aumento, mostrando su mayor incremento en la mezcla con 10.0% de escoria de acero, sin embargo, esto perjudica en la rigidez.

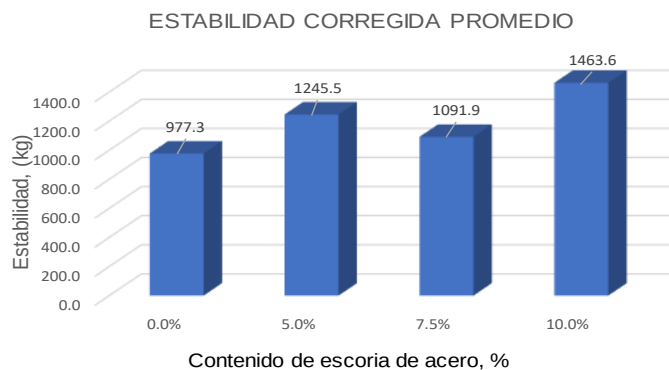


Figura 6. Estabilidad de la mezcla

Beneficio del Empleo de Escoria de Acero en Mezclas Asfálticas Tibias

En relación con el peso específico de la mezcla asfáltica, se observó un incremento en la mezcla con 7.5% de escoria de acero. Este incremento da lugar a diversos beneficios, entre los que se menciona:

- Mejoramiento de la resistencia estructural de la capa asfáltica, puesto que, se asocia con una mayor compactación de la mezcla y genera un incremento de la capacidad de carga y resistencia al desgaste.
- Proporciona mayor durabilidad de la capa asfáltica, ya que reduce la susceptibilidad a la deformación permanente.
- Reducción de la permeabilidad de la mezcla, lo que disminuye la penetración de agua en la estructura de la carretera y, por lo tanto, reduce el riesgo de daños relacionados con el agua, como la erosión del subsuelo y la formación de baches

Por su parte, el porcentaje de vacíos presentó un incremento ascendente, sin embargo, no salen del límite permitido por las especificaciones. La disminución de los vacíos en una mezcla asfáltica

tiene beneficios asociados con la resistencia y permeabilidad de la mezcla, entre ellos se mencionan:

- Incremento en la capacidad de carga y la resistencia a la deformación permanente de la carpeta asfáltica.
- Disminución de la permeabilidad de la mezcla y reducción de la entrada de agua.

En relación con el flujo, la mezcla con 7.5% de escoria de acero presenta una tendencia a incrementarse en relación con la mezcla patrón. Este incremento se asocia a:

- Mayor trabajabilidad de la mezcla, facilitando su colocación y compactación.
- Mayor plasticidad, lo que permite una mayor adaptación a las deformaciones y variaciones de las condiciones del tráfico.

Finalmente, la mezcla con 7.5% de escoria de acero presento un incremento en el valor de estabilidad, dicho incremento puede tener los siguientes impactos beneficiosos:

- Mayor resistencia a la deformación por carga, dando lugar a una carretera más duradera.
- Incremento de la vida útil, debido a su capacidad para soportar mejor las cargas del tráfico.
- Disminución de la frecuencia de mantenimiento, dado que la carretera resultante es menos propensa a agrietarse o deformarse.

En el aspecto económico, la sustitución del agregado por escoria de acero da lugar a ciertos beneficios, entre los que se incluyen:

- Disminución en los costos de adquisición de materiales.
- Disminución de costos de mantenimiento a largo plazo debido a un mejor desempeño mecánico de la mezcla y el pavimento.
- Reducción de la frecuencia de mantenimiento y reparación de la carretera.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos en los ensayos de caracterización de materiales fueron comparadas con las indicaciones señaladas en el Manual de carreteras en la sección de especificaciones técnicas generales para construcción (MTC, 2013), con lo cual se construyó los Cuadros 8 y 9, en la que se observa que los materiales utilizados son aptos para el diseño de mezclas asfálticas.

Cuadro 8. Requisitos normativos para el agregado grueso

Ensayos	Valores límites	Valor obtenido	Cumplimiento
Durabilidad al Sulfato de Magnesio	18% máx.	3.56%	Si
Abrasión de los Ángeles	40% máx.	23.5%	Si
Adherencia	+95	+95	Si
Partículas chatas y alargadas	10% máx.	7.0%	Si
Caras fracturadas	85/50 mín.	85/70	Si
Sales solubles totales	0.5% max.	0.1%	Si
Absorción	1.0% max.	0.88%	Si

Nota. Valores referenciales según Manual de carreteras por el MTC (2013).

Cuadro 9. Requisitos normativos para el agregado fino

Ensayos	Valores limites	Valor obtenido	Cumplimiento
Equivalente de arena	60% mín.	63%	Si
Angularidad del agregado fino	30% mín.	48.13%	Si
Azul de Metileno	8% máx.	5%	Si
Índice de plasticidad (malla N° 40)	NP	NP	Si
Durabilidad al Sulfato de Magnesio	-	4.94%	Si
Índice de plasticidad (malla N° 200)	4% máx.	NP	Si
Sales solubles totales	0.5% máx.	0.1%	Si
Absorción	0.33% máx.	0.88%	Si

Nota. Valores referenciales según Manual de carreteras por el MTC (2013).

De manera similar, se realizó una comparación de los resultados obtenidos para cada una de las mezclas asfálticas con las indicaciones señaladas en el Manual de carreteras en la sección de especificaciones técnicas generales para construcción (MTC, 2013), dicha comparación puede ser observada en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Requisitos normativos para la mezcla asfáltica

Parámetro	Valores limites	Valor obtenido				Cumplimiento
		0%	5.0%	7.5%	10.0%	
Porcentaje óptimo de asfalto	N.A.	6.0	6.4	7.0	7.1	N.A.
Porcentaje de vacíos	3 – 5	4.0	4.1	4.6	5.0	Si
Flujo Marshall 0.01"	8 – 14	13.0	14.6	13.8	14.7	Si
Estabilidad Marshall (mínimo) (kg)	831	977.3	1245.5	1091.9	1463.6	Si
Relación Estabilidad/Flujo, kg/cm	1700 – 4000	2961.4	3366.1	3116.9	3955.8	Si

Nota. Valores referenciales según Manual de carreteras por el MTC (2013).

Como se puede notar en el Cuadro 10, las mezclas asfálticas con diferentes proporciones de escoria de acero cumplen con los requerimientos normativos del MTC en cuanto a la estabilidad y flujo Marshall, lo que significa que, las diferentes mezclas cuentan con las propiedades mecánicas necesarias para resistir las cargas del tráfico y las condiciones ambientales, así como la maleabilidad requerida para ser colocada y compactada adecuadamente en el sitio de construcción. Sin embargo, se observa que el porcentaje de vacíos incrementa de manera ascendente al incremento de escoria de acero. En lo referente al porcentaje óptimo de asfalto, se observó un incremento gradual del porcentaje de asfalto requerido en la mezcla conforme se incrementa el porcentaje de escoria de acero, lo cual sugiere que, la escoria de acero puede estar influyendo en la capacidad de absorción del ligante asfáltico por parte de la mezcla, esto puede deberse a las características superficiales de la escoria de acero, lo que hace necesario una mayor cantidad de asfalto para lograr la cohesión necesaria en la mezcla.

Por otra parte, para comprobar estadísticamente en las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica tibia modificada con escoria de acero respecto a la muestra patrón, se llevaron a cabo pruebas inferenciales mediante el análisis de varianza ANOVA para detectar que existen diferencias significativas entre los valores obtenidos en cada tipo de mezcla (p -valor < 0.05) y establecer si la adición de escoria de acero produjo mejoras o no en las propiedades evaluadas.

Con base en los resultados obtenidos con el programa SPSS, se comprobó que el uso de escoria de acero produce los efectos mostrados en el cuadro 11.

Cuadro 11. Resumen de efectos según los resultados inferenciales

Porcentaje de escoria de acero en la mezcla tibia	Cambios en el peso específico	Cambios en el porcentaje de vacíos	Cambios en el flujo Marshall	Cambios en la estabilidad Marshall
5%	No	No	No	Si
7.5%	No	No	No	Si
10%	No	No	Si	Si

En función de los resultados de los ensayos de laboratorio y el análisis inferencial realizado, se deduce que es posible realizar una sustitución del agregado pétreo en proporciones de 5%, 7.5% y 10% de escoria de acero, ya que no afecta significativamente al peso específico ni al porcentaje de vacíos, y, además, muestra una mejora en la estabilidad Marshall. En consecuencia, una sustitución del agregado pétreo por escoria de acero en las diferentes proporciones estudiadas puede ser considerada como una opción viable para la construcción de pavimentos con mezclas asfálticas tibias, pero realizando el análisis para un trabajo real en campo lo recomendable es trabajar con el incremento de escoria de acero de 7.5 %.

CONCLUSIONES

- A partir de los ensayos para la caracterización físico – mecánica de los materiales se encontró que, tanto el agregado grueso como el agregado fino cuentan con una distribución uniforme de partículas. Además, se determinó que los agregados cumplen con los requerimientos para ser usados en mezclas asfálticas, con una durabilidad del agregado grueso de 3.56%, un porcentaje de abrasión de 23.5% y una durabilidad del agregado fino de 4.94%. Por otra parte, mediante el ensayo de peso específico se determinó que, en ambos tipos de agregados, el peso específico bulk saturado es mayor al peso específico Bulk seco, indicando una mayor densidad en estado saturado, además se observa un porcentaje de absorción de 0.88% para el agregado grueso y de 0.33% para el agregado fino, la cual es considerada como moderada.
- Respecto al desempeño mecánico de las mezclas asfálticas de acuerdo al Manual de carreteras por el MTC (2013), se observó que las mezclas modificadas con diferentes porcentajes de escoria de acero cumplen con los estándares de flujo (8 – 14, 0.01”), de estabilidad Marshall con valores superiores a los establecidos (831 kg). Sin embargo, se observó límites máximos de vacíos en comparación a los valores normativos. Finalmente, se evidencia un incremento en la rigidez al límite, en los porcentajes de 5.0 y 10.0 por ciento del contenido de escoria, sin embargo, el mejor comportamiento se registra con 7.5 por ciento del contenido de escoria.
- La sustitución parcial del agregado pétreo en 7.5% por escoria de acero presenta un mejor desempeño al ser comparado con la mezcla tibia patrón, ya que sus propiedades se encuentran entre los valores límites mínimos y máximo permitidos, donde además de los beneficios medioambientales por el uso de una mezcla tibia y la reutilización de la escoria, la sustitución de agregado pétreo implica un ahorro económico que se obtiene en la elaboración de la mezcla, además de disminuir la huella de carbono asociada a las actividades de extracción y transporte de materiales.

REFERENCIAS

- Alnadish, A. M., Aman, M. Y., Katman, H. Y. B., & Ibrahim, M. R. (2021). Characteristics of Warm Mix Asphalt Incorporating Coarse Steel Slag Aggregates. *Applied Sciences*, 11(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/app11083708>
- Al-Sabaei, A. M., Napiyah, M. B., Sutanto, M. H., Alaloul, W. S., Zoorob, S. E., & Usman, A. (2022). Influence of nanosilica particles on the high-temperature performance of waste denim fibre-modified bitumen. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(2), 207-220. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1737060>
- Amelian, S., Manian, M., Abtahi, S. M., & Goli, A. (2018). Moisture sensitivity and mechanical performance assessment of warm mix asphalt containing by-product steel slag. *Journal of Cleaner Production*, 176, 329-337. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.120>
- Córdoba, J. E., Senior, V., & Posada, D. (2020). Mezclas asfálticas tibias: Una alternativa eficaz para la construcción de pavimentos medioambientalmente amigables. *Estudios Iberoamericanos en Ingeniería de Tránsito, Transporte y Logística*, 1. https://www.researchgate.net/profile/Jorge-Cordoba/publication/347468091_Libro-Ingenieria-de-Transito/links/5fdd0e0e299bf14088228d46/Libro-Ingenieria-de-Transito.pdf
- Goli, H., Latifi, M., & Sadeghian, M. (2022). Moisture characteristics of warm mix asphalt containing reclaimed asphalt pavement (RAP) or steel slag. *Materials and Structures*, 55(2), 53. <https://doi.org/10.1617/s11527-022-01893-0>
- Hernández, R., & Mendoza, C. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*.
- Kar, D., Giri, J. P., & Panda, M. (2019). Performance Evaluation of Bituminous Paving Mixes Containing Sisal Fiber as an Additive. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 6(3), 189-206. <https://doi.org/10.1007/s40515-019-00079-6>
- MTC, (2013). https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/MTC%20NORMAS/ARCH_PDF/MAN_10%20EG%202013.pdf
- MTC E 204, (2022). https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/Manual%20Ensayo%20de%20Materiales.pdf
- Parra Prieto, L. F., & Bautista Barón, M. F. (2018). *Medición de la resistencia bajo carga monotónica de una mezcla asfáltica tibia reciclada sustituyendo parte del agregado pétreo por escoria de alto horno* [Tesis de Postgrado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. <http://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/13101>
- Rojas, M. A., Otálvaro, I., Pérez, J. A., Benavides, H., & Ambriz, C. (2021). Uso de las escorias de horno de arco eléctrico (EHAÉ) en la construcción – estado del arte. *Revista UIS Ingenierías*, 20(2). <https://doi.org/DOI:https://doi.org/10.7440/res64.2018.03>
- Sukhija, M., & Saboo, N. (2021). A comprehensive review of warm mix asphalt mixtures-laboratory to field. *Construction and Building Materials*, 274, 121781. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121781>
- Usman, N., Masirin, M. I. M., Ahmad, K. A., & Ali, A. S. B. (2019). Application of Recycled Polyethylene Terephthalate Fiber in Asphaltic Mix for Fatigue Life Improvement. En B. Pradhan (Ed.), *GCEC 2017* (pp. 1401-1413). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-10-8016-6_101
- Vásquez, A. F., & Flórez, J. S. (2020). Resultados de investigaciones acerca del comportamiento físico mecánico y geológico de las mezclas asfálticas MDC-19 modificadas con polipropileno reciclado. *Formación Estratégica*, 1(01), Article 01.

Ziaee, S. A., & Behnia, K. (2020). Evaluating the effect of electric arc furnace steel slag on dynamic and static mechanical behavior of warm mix asphalt mixtures. *Journal of Cleaner Production*, 274, 123092. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123092>

ANEXOS:

Evidencia de sumisión del artículo

1. ENVIO



2. RECEPCION



[IV] Acuse de recibo de envío

1 mensaje

Ana Luisa Elizondo via Po al de revistas académicas de la Universidad de Costa Rica

mié., 15 may. 2024 a la hora 1:41

<revistas@ucr.ac.cr>

p. m.

Responder a: Ana Luisa Elizondo <revistaiv.lanamme@ucr.ac.cr>

Para: Miguel Angel Pucutuni Larico <miguelgdu2020@gmail.com>

Miguel Angel Pucutuni Larico:

Gracias por enviar el manuscrito "EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA TIBIA MODIFICADA CON ESCORIA DE ACERO: EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA TIBIA MODIFICADA CON ESCORIA DE ACERO" a Infraestructura Vial. Con nuestro sistema de gestión de revistas en línea, podrá iniciar sesión en el sitio web de la revista y hacer un seguimiento de su progreso a través del proceso editorial.

URL del manuscrito: <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/vial/authorDashboard/submission/59988>

[Texto citado oculto]

3. LINK DE LA REVISTA – INFRAESTRUTURA VIAL

<https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/vial>

Resolución de inscripción



"AÑO DE LA UNIDAD, LA PAZ Y EL DESARROLLO"

RESOLUCIÓN N° 0517-2023/UPeU-FIA-CF-T

Lima, Ñaña 12 de setiembre de 2023

VISTO:

El expediente de Pucutuni Larico, Miguel Angel, identificado(a) con Código Universitario N° 201520014 y Ayala Huaman, Lucy Mabel, identificado(a) con Código Universitario N° 201520038, de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión;

CONSIDERANDO

Que la Universidad Peruana Unión tiene autonomía académica, administrativa y normativa, dentro del ámbito establecido por la Ley Universitaria N° 30220 y el Estatuto de la Universidad;

Que la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, mediante sus reglamentos académicos y administrativos, ha establecido las formas y procedimientos para la aprobación e inscripción del perfil de proyecto de tesis en formato artículo y la designación o nombramiento del asesor para la obtención del título profesional;

Que Pucutuni Larico, Miguel Angel y Ayala Huaman, Lucy Mabel, han solicitado: la inscripción del perfil de proyecto de tesis titulado " Evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica tibia modificada con escoria de acero" y la designación del Asesor, encargado de orientar y asesorar la ejecución del perfil de proyecto de tesis en formato artículo;

Estando a lo acordado en la sesión del Consejo de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, celebrada el 12 de setiembre de 2023, y en aplicación del Estatuto y el Reglamento General de Investigación de la Universidad;

SE RESUELVE:

Aprobar el perfil de proyecto de tesis en formato artículo titulado " Evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica tibia modificada con escoria de acero" y disponer su inscripción en el registro correspondiente, designar a Mg. Reymundo Jaulis Palomino como ASESOR para que oriente y asesore la ejecución del perfil de proyecto de tesis en formato artículo el cual fue dictaminado por: Ing. David Díaz Garamendi y Ing. Ferrer Canaza Rojas, otorgándoles un plazo máximo de doce (12) meses para la ejecución.

Regístrese, comuníquese y archívese.



Dra. Erika Inés Acuña Salinas
DECANA



Mg. Milda Amparo Cruz Huaranga
SECRETARIA ACADÉMICA (e)

cc:
-Interesado
-Asesor
-Dirección General de Investigación
-Archivo

Acta de donación de escoria de acero

	ACTA DE DONACIÓN DE RESIDUOS	macroproceso Gestión de medio ambiente		
	MAGR06-E001	Fecha de vigencia: 2017/04	Versión: 02	Aprobado por: ALP



Corporación Aceros Arequipa S.A.

ACTA DE DONACIÓN DE RESIDUOS N° 002

Pisco, 05 de setiembre del 2023.

Sr. Miguel Angel Pucutuni Larico
DNI: 76256601

Por el presente documento Corporación Aceros Arequipa S.A, representado por el Ing. **José Alexis Luján Pérez, Jefe de Medio Ambiente**, transfiere gratuitamente en calidad de **donación** 250 kilos de eco gravilla al Sr. Miguel Angel Pucutuni Larico identificado con DNI N° 76256601.

La presente donación tiene como finalidad ser aprovechada en la tesis "Evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica tibia modificada con escoria de acero".

Por lo tanto, cabe indicar bajo ninguna circunstancia esta donación deberá comercializarse ni ser utilizada para otros fines.

En fecha 05 de setiembre del 2023, se firma el presente documento entre el Sr. Miguel Angel Pucutuni Larico y el representante de Corporación Aceros Arequipa S.A.

JOSE ALEXIS LUJAN PEREZ

DONANTE

Miguel Angel Pucutuni Larico

DNI 76256601

BENEFICIARIO

Lima, Av. Antonio Miró Quesada N° 425, Piso 17, Magdalena del Mar, Lima 17 - Perú - Tel (51-01) 517 1800.

Arequipa, Calle Jacinto Ibañez 111, Píscos Industrial - Arequipa - Perú - Tel (51-054) 23 2430.

Pisco, Panamericana Sur Km. 240 - Ica - Perú - Tel (51-056) 58 0830.

Domicinio de Personas Jurídicas del Callao, Partida Electrónica N° 70627037.