

Desempeño de la mezcla asfáltica en frío con adición de polímeros de Ichu

Performance of cold asphalt mix with addition of Ichu polymers

Martín Chumpitaz Camarena¹, Jean Piere Cárdenas Flores¹,
Dangelo Moisés Laura Gutierrez¹

¹Universidad Privada San Juan Bautista, Lima, Perú, 150108;

jean.cardenas@upsjb.edu.pe; dangelo.laura@upsjb.edu.pe

*Correspondencia: martin.chumpitaz@upsjb.edu.pe

Citación: Chumpitaz, M.; Cárdenas, J. & Laura, D., (2025). Desempeño de la mezcla asfáltica en frío con adición de polímeros de Ichu. *Novasinerгия*. 8(2). 140-153.

<https://doi.org/10.37135/ns.01.16.08>

Recibido: 03 abril 2025

Aceptado: 29 mayo 2025

Publicado: 02 julio 2025

Novasinerгия

ISSN: 2631-2654

Resumen: El presente estudio analiza el desempeño de una mezcla asfáltica en frío modificada con polímero de Ichu, evaluando su impacto en estabilidad, flujo, desgaste e impermeabilidad. Se determinó la dosificación óptima del asfalto residual en 6.2%, obtenida mediante pruebas experimentales de ensayo. Los resultados indican que el incremento del asfalto residual mejora la densidad de la mezcla hasta un punto óptimo, tras el cual disminuye. Asimismo, se observó que mayores porcentajes de asfalto aumentan el flujo y reducen la humedad absorbida, lo que sugiere una mejor cohesión y menor permeabilidad. Se realizó una correlación de Spearman para validar los resultados, comparándolos con estudios previos sobre asfaltos modificados con polímeros. Se concluye que la adición de polímero de ichu mejora significativamente las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica, ofreciendo una alternativa sostenible para infraestructuras viales.

Palabras clave: Impermeabilidad, Mezcla asfáltica, Polímero de Ichu, Resistencia, Tensión.

Abstract: This study analyzes the performance of a cold asphalt mix modified with ichu polymer, evaluating its impact on stability, flow, wear, and impermeability. The optimal residual asphalt dosage was determined at 6.2% through trial-and-error experimental testing. Results indicate that increasing residual asphalt enhances mix density up to an optimal point, after which it decreases. Additionally, higher asphalt percentages increase flow and reduce absorbed moisture, suggesting improved cohesion and lower permeability. A Spearman correlation was conducted to validate the results, comparing them with previous studies on polymer-modified asphalts. It is concluded that adding ichu polymer significantly improves the mechanical properties of the asphalt mix, providing a sustainable alternative for road infrastructure.

Keywords: Asphalt mixture, Ichu polymer, Impermeability, Resistance, Tension.



Copyright: 2025 derechos otorgados por los autores a Novasinerгия.

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de una licencia de Creative Commons Attribution (CC BY NC). (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introducción

El mejoramiento del desempeño mecánico de mezclas asfálticas ha sido objeto de creciente atención en los últimos años, particularmente mediante el uso de aditivos y polímeros que incrementen su durabilidad y resistencia bajo condiciones de carga intensiva [1]. Dentro de esta tendencia, la incorporación de fibras vegetales naturales, como el ichu, ha despertado interés debido a su potencial para mejorar características clave como la estabilidad, el flujo, la resistencia al desgaste y la impermeabilidad de las mezclas [2]. Esta línea de investigación se desarrolla en el marco de un enfoque de sostenibilidad e innovación tecnológica en la ingeniería de pavimentos, que busca soluciones más resilientes y menos dependientes de recursos no renovables.

El incremento del tráfico vehicular, la carga por eje de transporte pesado y las condiciones climáticas adversas han generado una mayor exigencia sobre las vías pavimentadas, revelando limitaciones importantes en los asfaltos convencionales [3]. Como consecuencia, se ha producido un deterioro prematuro de la infraestructura vial, acompañado de un aumento en los costos de mantenimiento y rehabilitación. Estos desafíos han impulsado el desarrollo de nuevos materiales y metodologías para mejorar el rendimiento estructural de las mezclas asfálticas. Entre las estrategias más prometedoras, la adición de polímeros naturales se posiciona como una alternativa viable tanto técnica como ambientalmente [4].

Los estudios previos han mostrado que la adición de fibras naturales puede mejorar de manera significativa la cohesión interna de la mezcla asfáltica, al tiempo que reduce su susceptibilidad al agrietamiento y al deterioro por humedad. Por ejemplo, [5] encontraron que el uso de aditivos orgánicos favorece la adherencia entre los agregados y el ligante asfáltico, reduciendo así la permeabilidad de la mezcla. Por su parte, [6] documentaron cómo la falta de aditivos en los asfaltos tradicionales incrementa su vulnerabilidad frente a la acción de factores climáticos, lo que acelera el proceso de fatiga del pavimento.

Actualmente, los asfaltos convencionales utilizados en el diseño vial presentan características y propiedades que se han vuelto insuficientes para satisfacer la creciente demanda provocada por el aumento del flujo vehicular [7]. Por lo tanto, se contempla la búsqueda de alternativas que no solo contribuyan a mejorar las propiedades de los asfaltos, sino que también optimicen su desempeño general en condiciones de uso exigentes [8].

Complementariamente, el análisis de [9] sobre el desempeño de mezclas asfálticas convencionales, específicamente la mezcla PEN 85/100 y su contraparte modificada con polímero SBS PG 70-28, revela que la utilización de la combinación asfáltica convencional se ve obstaculizada por diversos factores como el volumen de tránsito, la sobrecarga y las condiciones climáticas adversas. En cambio, la combinación asfáltica modificada con polímero ofrece una respuesta mecánica significativamente superior, aumentando el rendimiento de la carpeta asfáltica y prolongando la vida útil del pavimento, tal como se señala en estudios previos [10].

En cuanto a los aditivos sintéticos, como los polímeros SBS (estireno-butadieno-estireno) y los polímeros acrílicos, se ha demostrado que mejoran sustancialmente las propiedades reológicas del asfalto, incrementando su elasticidad, resistencia al envejecimiento y

desempeño bajo cargas cíclicas [11]. Sin embargo, el elevado costo de estos materiales y su impacto ambiental han llevado a considerar alternativas de origen natural.

En este contexto, el ichu (*Stipa ichu*), una gramínea autóctona de los Andes ha sido objeto de investigaciones recientes por sus propiedades mecánicas y disponibilidad regional [12], [13]. Esta fibra vegetal se caracteriza por su alta resistencia a la tracción, bajo peso específico y buena estabilidad dimensional, atributos que resultan útiles para su aplicación como modificador en mezclas asfálticas [14]. Además, su uso promueve la valorización de recursos locales, fortaleciendo la economía regional y reduciendo la huella de carbono asociada al transporte de materiales de construcción.

En esta línea, el desempeño de la mezcla asfáltica en frío, particularmente aquella que incorpora polímeros derivados de ichu, se manifiesta de manera notable a través de diversas propiedades que mejoran la funcionalidad y sustentabilidad de las infraestructuras viales [15].

En primer lugar, es relevante destacar que la composición de esta mezcla está constituida por una cuidadosa selección de agregados que, al ser combinados con un ligante asfáltico y los mencionados polímeros, contribuyen a la robustez del material. El ichu, planta nativa de los Andes, aporta valiosas características fibrosas y una notable resistencia, elementos que se integran durante un proceso de fabricación meticuloso, donde se asegura que los polímeros se dispersan adecuadamente en la mezcla asfáltica [16].

En términos de propiedades físicas y mecánicas, la adición de estos polímeros incrementa significativamente la elasticidad y flexibilidad de la mezcla, lo que le permite adaptarse eficientemente a las tensiones y deformaciones generadas por el tráfico y las variaciones climáticas, una característica esencial en regiones que experimentan cambios de temperatura extremos [17]. Además, la capacidad de estas mezclas para resistir el agrietamiento, tanto por fatiga como térmico, se traduce en una disminución en la formación de fisuras, prolongando así la vida útil de las carreteras y reduciendo la necesidad de reparaciones frecuentes. Asimismo, la mejora en la adherencia entre los agregados y el ligante asfáltico, facilitada por los polímeros, promueve una cohesión superior, lo que resulta en una mezcla más resistente a la erosión y al desgaste [18]. Por último, debemos considerar la durabilidad de estas mezclas, las cuales, debido a su resistencia a las condiciones ambientales adversas, tales como la lluvia, el hielo y la radiación ultravioleta, requieren menos intervenciones de mantenimiento, lo que no solo representa un ahorro sustancial en costos de reparación y rehabilitación de carreteras, sino que también contribuye a la sostenibilidad y eficiencia en la gestión de infraestructura vial [19].

Este método implica múltiples beneficios económicos a largo plazo; a pesar de que la inversión inicial en estos materiales puede resultar más elevada que la de las mezclas convencionales, los ahorros subsecuentes en mantenimiento, así como la prolongación significativa de la vida útil de las estructuras viales, aportan un argumento sólido para su consideración, particularmente en el contexto de proyectos de infraestructura pública en los que el manejo eficiente del presupuesto es un aspecto crucial. En este sentido, la utilización de materiales naturales como el ichu no solo eleva el desempeño técnico de las mezclas, sino que también fomenta prácticas más sostenibles en la construcción, ofreciendo una

alternativa que respeta el medio ambiente al reducir los recursos no renovables implicados en la producción de asfalto convencional.

Además de sus beneficios técnicos y económicos, la aplicabilidad del polímero de ichu ha sido explorada en diferentes contextos de infraestructura vial. Con respecto a las aplicaciones prácticas de estas mezclas, su idoneidad para vías de bajo tránsito, donde las características de flexibilidad y resistencia al agrietamiento son esenciales, resulta evidente, así como su utilidad en situaciones que requieren reparaciones rápidas, dado que pueden ser aplicadas sin el calentamiento del asfalto, lo que acelera el proceso de curado y permite una pronta reapertura al tránsito vehicular [20].

La validez de estos enfoques se encuentra respaldada por investigaciones científicas que han corroborado que las mezclas modificadas con polímeros de ichu superan las propiedades mecánicas de sus contrapartes convencionales en una variedad de ensayos de resistencia [21]. Además, la implementación de proyectos piloto en algunos países andinos ha demostrado la efectividad y durabilidad de esta tecnología, fomentando un creciente interés hacia su adopción.

No obstante, es importante reconocer que existen desafíos inherentes a esta transición, como la variabilidad en la calidad de la materia prima que puede influir en el desempeño del producto final, lo cual subraya la necesidad de un control riguroso en los procesos de producción y en la formulación de estándares que garanticen la homogeneidad y calidad del material.

En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo general evaluar el desempeño de una mezcla asfáltica en frío con adición de polímero de ichu, desde una perspectiva experimental que abarque aspectos como la dosificación óptima, la estabilidad, el flujo, el desgaste e impermeabilidad de la mezcla. Este análisis permitirá determinar el grado de eficacia del ichu como aditivo en condiciones de laboratorio, generando evidencia técnica que pueda orientar futuras aplicaciones a escala real. A partir de este objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos: a) evaluar el desempeño de la mezcla asfáltica en frío con la adición del polímero de ichu, considerando su impacto en estabilidad, flujo, desgaste e impermeabilidad; b) determinar la dosificación óptima del polímero de ichu en la mezcla; c) analizar la influencia del polímero en la estabilidad y el flujo de la mezcla; d) examinar el efecto de la adición del polímero en la resistencia al desgaste; y e) evaluar la influencia del polímero de ichu en la impermeabilidad de la mezcla.

2. Metodología

Se adoptó una estrategia de ensayo y error controlado para evaluar el efecto de la adición progresiva de polímero de ichu sobre diversas propiedades mecánicas y funcionales de una mezcla asfáltica en frío, tales como estabilidad, flujo, resistencia al desgaste e impermeabilidad [22].

Se elaboraron un total de 27 especímenes (briquetas) de mezcla asfáltica. Esta cantidad fue determinada con base en un diseño factorial simple: 9 briquetas con un porcentaje de dosificación con polímeros de ichu de 1%, 2% y 3%, con tres réplicas por grupo para cada ensayo mecánico, garantizando la reproducibilidad estadística de los resultados. Las 18

briquetas restantes correspondieron a mezclas sin ichu, utilizadas como grupo control en pruebas paralelas. Se realizaron pruebas con especímenes elaborados bajo condiciones controladas de compactación y curado, siguiendo los procedimientos establecidos en normativas técnicas para mezclas asfálticas.

2.1. *Materiales utilizados*

Los agregados utilizados fueron clasificados como gruesos y finos, de origen natural, cumpliendo con la granulometría especificada en la norma ASTM C136. Se caracterizaron por una absorción de agua promedio de 1.6% y una densidad aparente de 2.61 g/cm³. Se empleó una emulsión asfáltica catiónica de rompimiento lento tipo CSS-1H, con un contenido de cemento asfáltico residual de 6.2%. Esta elección se basó en su compatibilidad con el método de aplicación en frío y su comportamiento adecuado en condiciones de curado sin calentamiento.

Adicional, el polímero natural utilizado fue el ichu (*Stipa ichu*), recolectado en zonas altoandinas. Se trató mediante un proceso de limpieza, secado y fibrilación mecánica para mejorar su dispersión. Sus propiedades físico-mecánicas se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades físico-mecánicas del polímero de ichu

Propiedad	Valor promedio	Norma de referencia
Densidad aparente	1.24 g/cm ³	ISO 1183
Módulo de elasticidad (E)	1.3 GPa	ASTM D3039
Absorción de agua	8.1%	ASTM D570
Longitud promedio de fibra	10-15 mm	Medición directa

Se definieron cuatro mezclas con porcentajes crecientes de ichu (0%, 1%, 2%, y 3% respecto al peso total de los agregados), manteniendo constante el contenido de emulsión en 6.2%. La elección de este rango se fundamenta en estudios previos que demuestran que el intervalo de 1% a 3% de fibras naturales es efectivo para lograr mejoras estructurales sin comprometer la trabajabilidad de la mezcla [15].

2.2. *Procedimiento experimental*

Cada mezcla fue homogeneizada manualmente y compactada en moldes cilíndricos mediante un martillo Marshall de 75 golpes por cara, de acuerdo con la norma ASTM D6926. Se permitió un curado a temperatura ambiente (13.5°C) durante 72 horas antes del ensayo. Las briquetas fueron evaluadas en laboratorio según los siguientes procedimientos:

- Estabilidad y flujo Marshall: siguiendo ASTM D6927.
- Humedad absorbida e impermeabilidad: según ASTM D7064, adaptado para mezclas en frío.
- Resistencia al desgaste: ensayo de abrasión con carga rotacional según procedimiento interno validado, con 500 revoluciones a 5 kg.
- Peso específico y vacíos: con base en ASTM D2041.

2.3. Análisis estadístico

Los datos fueron procesados utilizando estadística descriptiva y correlación de Pearson, con un nivel de significancia de 0.05. Además, se aplicaron pruebas de comparación de medias (ANOVA) para identificar diferencias significativas entre los grupos.

3. Resultados

3.1. Determinación del diseño patrón de mezcla asfáltica

La identificación de la dosificación óptima de asfalto residual se realizó mediante el análisis de la densidad bulk seca (g/cm^3) en función del porcentaje de emulsión asfáltica tipo CSS. Los resultados, graficados en la Figura 1, muestran un comportamiento parabólico, donde la densidad máxima se alcanza con un contenido de 6.2% de asfalto residual, correspondiente al punto de mayor compactación sin sobreflujo de ligante.

Este valor fue adoptado como diseño patrón para las siguientes etapas experimentales, al representar la condición estructural más eficiente en términos de compacidad, trabajabilidad y comportamiento mecánico esperado. Se observa el valor óptimo de densidad bulk seca alcanzado en esta dosificación, marcado con línea discontinua.

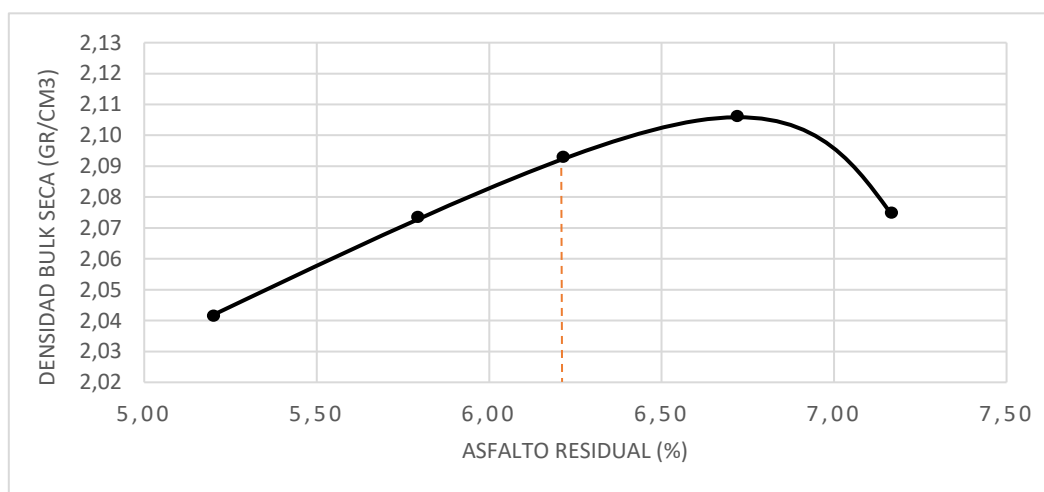


Figura 1. Determinación del diseño patrón de emulsión asfáltica tipo CSS

3.2. Diseño patrón de mezcla asfáltica en frío

Con base en la dosificación óptima previamente identificada (6.2% de asfalto residual), se procedió a caracterizar integralmente los parámetros de la mezcla patrón, conforme a los criterios establecidos en el método Marshall para mezclas en frío compactadas con 75 golpes por cara.

De acuerdo con la normativa, el valor de estabilidad requerido debe ser inferior a 815 kg, sin embargo, la mezcla evaluada alcanzó una estabilidad modificada en condición seca de 928 kg, superando dicho umbral. En condición húmeda, la estabilidad fue de 670 kg, mientras que el flujo registrado fue de 13.7×0.01 pulgadas (equivalente a 0.137 pulgadas), ubicándose dentro del rango permitido ($8\text{--}14 \times 0.01$ pulgadas).

La Tabla 2 resume los principales parámetros obtenidos para esta mezcla patrón. La dosificación óptima de 6.2% de asfalto residual se corresponde con una emulsión asfáltica total del 10.3%, a la que se añadió 2.0% de agua para el recubrimiento de los agregados y 2.8% de agua adicional para facilitar la compactación. La temperatura ambiente durante el proceso de elaboración y curado fue de 13.5 °C.

La mezcla, compactada bajo la norma ASTM D6926 con 75 golpes por cara, alcanzó una densidad seca promedio de 2.095 g/cm³. Además, presentó una humedad absorbida del 4.4% y un contenido de vacíos del 13.8%, lo cual evidencia un comportamiento adecuado en términos de impermeabilidad y cohesión interna. Estos resultados fueron adoptados como referencia para las fases experimentales posteriores, al representar una configuración mecánica y estructuralmente balanceada.

Tabla 2. Parámetros físico-mecánicos del diseño patrón de mezcla asfáltica en frío (6.2% de asfalto residual)

Parámetros físico-mecánicos del diseño patrón de mezcla asfáltica en frío (6.2% de asfalto residual)	
% Asfalto residual: %emulsión asfáltica	10.3
% de agua para recubrimiento	2.0
% contenido de agua para compactación (2% a 6%)	2.8
Temperatura ambiente (°C)	13.5
N° de golpes	75
% cemento asfáltico residual (en peso de los agregados)	6.2
Densidad seca (g/cm ³)	2.095
Estabilidad modificada seca (Kg)	928
Estabilidad modificada húmeda (Kg)	670
Flujo (0.01 pulg)	13.7
Humedad absorbida (%)	4.4
Temperatura de mezcla (°C)	13.5
% vacíos	13.8

3.3. Evaluación del desempeño mecánico según el contenido de asfalto

Se analizó el comportamiento de la mezcla asfáltica en frío modificando el contenido de asfalto residual entre 4.5% y 6.5%. Se evaluaron tres variables fundamentales: estabilidad, flujo y variación de estabilidad. Se observa en la Figura 2 un incremento en la estabilidad hasta un pico en 5.5%, mientras que el flujo se incrementa de forma progresiva. La variación de estabilidad mostró una inflexión a partir del 6.0%, indicando el punto de máxima rigidez relativa.

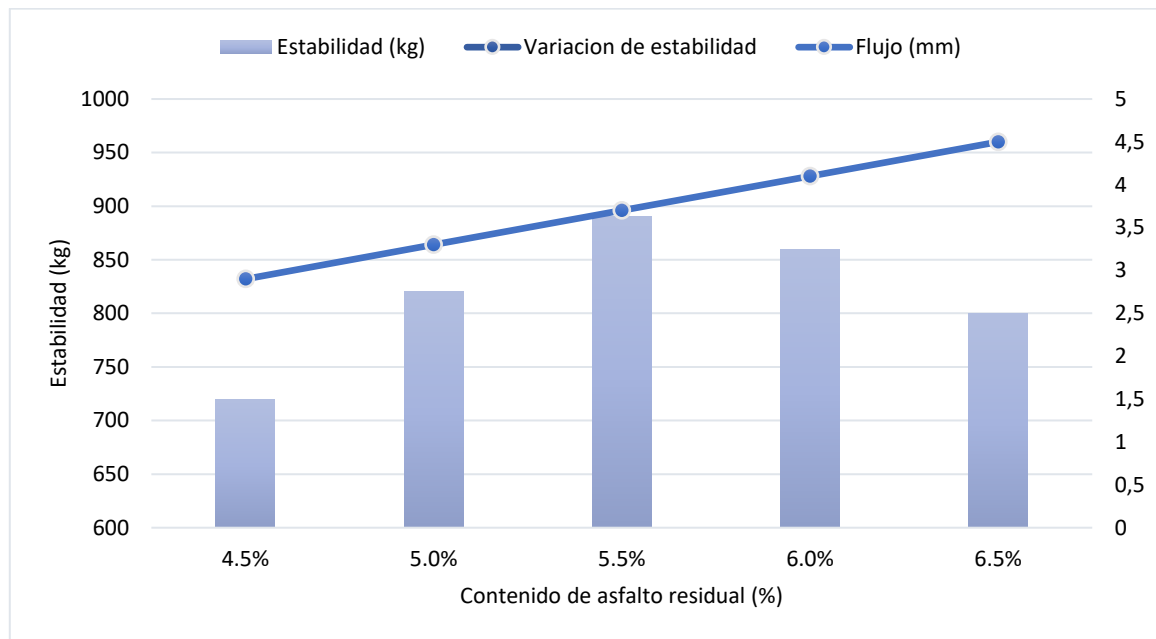


Figura 2. Desempeño mecánico de la mezcla asfáltica según el contenido de asfalto residual

3.4. Comportamiento físico: humedad absorbida y porcentaje de vacíos

Se estudió la relación entre el contenido de asfalto residual y dos propiedades físicas relacionadas con la durabilidad: la humedad absorbida y el porcentaje de vacíos totales. Ambos indicadores disminuyeron conforme aumentó el contenido de asfalto hasta 6.0%, lo que refleja una mejora en la compactación y en la impermeabilidad. A partir de 6.5%, ambas variables experimentaron un ligero aumento. En la Figura 3 se observa una tendencia descendente común en ambas variables hasta el 6.0%, con una leve reversión en la última dosificación, lo que sugiere un punto óptimo técnico.

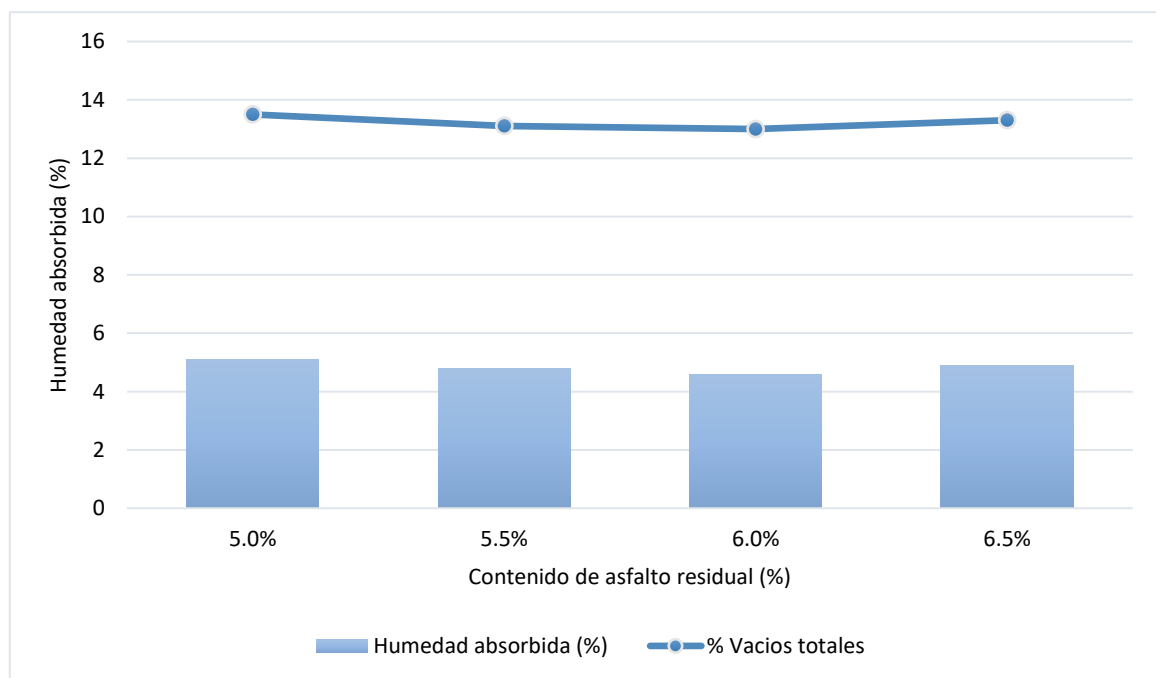


Figura 3. Efecto del contenido de asfalto residual en la humedad absorbida y porcentaje de vacíos.

3.5. Estabilidad según contenido de humedad

Se realizó una prueba para determinar cómo varía la estabilidad de la mezcla en función del contenido de humedad utilizado para la compactación. Los resultados mostraron un comportamiento parabólico: la estabilidad aumenta hasta alcanzar un máximo con 4.0% de agua y disminuye posteriormente, lo cual valida la existencia de un rango óptimo de humedad para mejorar la cohesión sin comprometer la estructura. En la Figura 4 se aprecia un comportamiento optimizado en torno al 4.0%, después del cual el exceso de humedad reduce la resistencia mecánica de la mezcla.

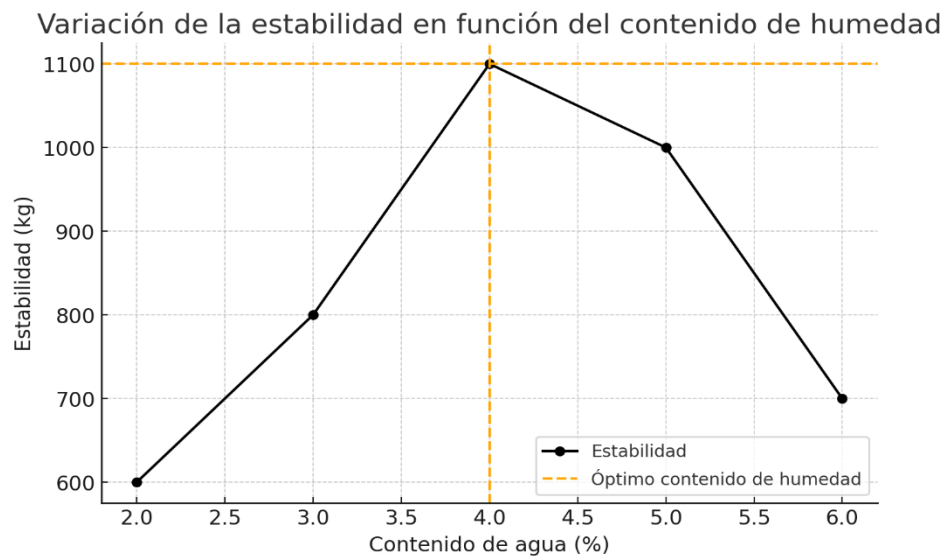


Figura 4. Variación de la estabilidad mecánica de la mezcla asfáltica en función del contenido de agua de compactación.

3.6. Resultados estructurales del diseño patrón

Se elaboraron mezclas modificadas con 0%, 1%, 2% y 3% de polímero de ichu, todas con 6.2% de emulsión. La Tabla 3 resume los efectos del contenido creciente de polímero de ichu (0% a 3%) sobre cuatro propiedades clave de la mezcla asfáltica: estabilidad, flujo, desgaste y absorción de agua. Se observa que la estabilidad disminuye progresivamente desde 928 kg (0%) hasta 647 kg (3%), indicando que el aumento de fibras reduce la rigidez estructural de la mezcla. Por otro lado, el flujo experimenta un incremento proporcional, alcanzando un máximo de 4.83 mm con el 3% de ichu, lo que refleja una mayor deformabilidad. En cuanto al desgaste por abrasión, se advierte un aumento significativo del 12.15% al 30.59%, lo que sugiere una menor cohesión interna a medida que se incrementa la dosificación de fibras. No obstante, un resultado destacable es la notable mejora en la impermeabilidad, evidenciada por la reducción de la absorción de agua desde 31.67 g hasta valores mínimos de 5.73 g con 1% de ichu. Este efecto puede atribuirse al relleno y bloqueo de poros gracias a la inclusión del polímero natural. Las propiedades fueron obtenidas bajo condiciones estándar, manteniendo un contenido fijo de 6.2% de emulsión asfáltica. Los valores representan promedios de tres muestras por grupo y se reportan con base en peso específico bulk para mayor uniformidad comparativa.

Tabla 3. Influencia del contenido de polímero de ichu sobre propiedades mecánicas y de durabilidad de la mezcla asfáltica en frío.

% Ichu	Estabilidad (kg)	Flujo (mm)	Desgaste (%)	Absorción de agua (g)
0%	928	3.47	12.15	31.67
1%	845.7	4.06	18.23	5.73
2%	760.7	4.40	24.97	6.13
3%	647	4.83	30.59	7.43

Todas las mezclas contienen un 6.2% de emulsión, Peso específico: bulk de la briqueta promedio de 3 muestras.

3.7. Correlación entre las variables

La Tabla 4 presenta los coeficientes de correlación de Pearson entre el polímero de Ichu y diversas propiedades mecánicas y funcionales de la mezcla asfáltica en frío. Se observa una correlación positiva significativa entre la presencia del polímero de ichu y todas las variables analizadas ($p < 0.001$). En particular, la mayor correlación se evidencia con la estabilidad de la mezcla ($r = 0.602$), lo que sugiere que la adición del polímero refuerza la resistencia estructural del material. Asimismo, se encuentra una correlación moderada con la impermeabilidad ($r = 0.568$) y el desgaste ($r = 0.518$), lo que indica que el polímero contribuye a mejorar la cohesión de la mezcla, reduciendo su vulnerabilidad a la filtración de agua y al deterioro mecánico. Finalmente, el desempeño general de la mezcla también muestra una correlación positiva ($r = 0.310$), aunque en menor medida en comparación con las otras variables. Estos resultados respaldan la eficacia del polímero de Ichu como un aditivo que optimiza la calidad y durabilidad de las mezclas asfálticas.

Tabla 4. Coeficientes de correlación de Pearson entre el contenido de ichu y propiedades funcionales de la mezcla asfáltica en frío.

Variables	R de Pearson	p
Polímero de Ichu -Desempeño	0.310	<0.001
Polímero de Ichu -Estabilidad	0.602	<0.001
Polímero de Ichu- Desgaste	0.518	<0.001
Polímero de Ichu-Impermeabilidad	0.568	<0.001

4. Discusión

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar el comportamiento de una mezcla asfáltica en frío modificada con polímero de ichu, analizando su influencia sobre variables clave como estabilidad, flujo, desgaste e impermeabilidad. Los resultados obtenidos permiten discutir la eficacia de este aditivo natural dentro de un enfoque técnico y sostenible en el contexto de infraestructura vial.

La determinación del diseño patrón mediante el análisis de la densidad bulk seca permitió establecer el 6.2% de asfalto residual como la dosificación óptima. Esta elección, sustentada por el comportamiento parabólico evidenciado en la Figura 1, asegura una compactación eficiente sin exceso de ligante, condición ideal para garantizar cohesión y estabilidad estructural. Este resultado coincide con lo planteado por [4] y [8] quienes destacan que una

dosificación equilibrada permite maximizar la densidad sin comprometer la trabajabilidad ni inducir fallas prematuras.

El análisis conjunto de la estabilidad, flujo y variación de estabilidad (Figura 2) demostró que la resistencia mecánica de la mezcla se incrementa hasta un punto óptimo (5.5%), a partir del cual disminuye. A la par, el flujo aumenta progresivamente con el contenido de asfalto, indicando una mayor deformabilidad. Estos hallazgos corroboran lo señalado por [1], quienes advierten que el incremento del contenido de ligante mejora la flexibilidad, pero puede debilitar la estructura si no se controla adecuadamente. La variación de estabilidad reafirma este comportamiento, evidenciando la pérdida relativa de rigidez cuando se sobrepasa el punto de máxima cohesión interna.

En cuanto a la respuesta física de la mezcla, los resultados sobre humedad absorbida y vacíos totales (Figura 3) revelan una disminución sostenida hasta una dosificación de 6.0%, lo cual indica una mejora en la compacidad e impermeabilidad del sistema. Este comportamiento es consistente con los hallazgos de [5], quienes sostienen que una adecuada proporción de ligante permite un empaquetamiento más cerrado de los agregados, reduciendo significativamente la permeabilidad. Sin embargo, el ligero repunte de estas variables a 6.5% sugiere que un exceso de ligante puede generar sobrellenado, disminuyendo la eficiencia volumétrica de la mezcla.

La estabilidad en función del contenido de humedad (Figura 4) mostró una curva parabólica, con un máximo en torno al 4.0% de agua. Esta observación es clave, ya que confirma que el agua actúa como facilitador de la compactación inicial, pero su exceso puede inducir pérdida de adherencia y resistencia. Esta tendencia es congruente con lo descrito por [7], quien plantea que en mezclas en frío el balance hídrico es un factor determinante para alcanzar resultados óptimos en términos de resistencia mecánica.

Respecto al efecto del polímero de ichu, los resultados consolidados en la Tabla 3 indican que su adición reduce la estabilidad de la mezcla a medida que aumenta su proporción. Esto puede deberse a una disminución de la rigidez general del sistema por la presencia de fibras que interrumpen la continuidad de la matriz asfáltica, tal como han explicado [13] y [14]. No obstante, se identificó una mejora destacable en la impermeabilidad, especialmente con 1% de ichu, lo que concuerda con los aportes de [15], quien subraya el rol del ichu como un agente natural de bloqueo de poros.

El incremento del flujo y el desgaste con mayores porcentajes de ichu sugiere un aumento de la flexibilidad, pero también una reducción de la cohesión interna. Esto implica que, si bien las mezclas modificadas con ichu pueden ser más adaptables a deformaciones térmicas o dinámicas, podrían no ser ideales para contextos de carga estructural elevada. Esta interpretación coincide con los hallazgos de [17], quienes recomiendan el uso de fibras naturales en vías de bajo tránsito o con requerimientos de alta adaptabilidad térmica.

Las correlaciones entre variables, expuestas en la Tabla 4, refuerzan estas conclusiones. La relación positiva entre el contenido de ichu y la impermeabilidad confirma su efecto como agente impermeabilizante. Por su parte, la correlación con la estabilidad, aunque positiva en términos generales, refleja un comportamiento no lineal, indicando que más allá de cierto punto la presencia de fibras compromete la resistencia. La relación con el desgaste es

igualmente significativa, lo cual sugiere la necesidad de utilizar el ichu con criterios de dosificación precisos para evitar efectos contraproducentes en la durabilidad.

Finalmente, los resultados permiten concluir que el uso del polímero de ichu representa una alternativa técnicamente viable en contextos específicos, principalmente en condiciones de bajo tránsito, zonas altoandinas o climas extremos. La mezcla con 1% de ichu se perfila como la más equilibrada en cuanto a impermeabilidad, deformabilidad y estabilidad aceptable, lo que la convierte en una formulación prometedora desde una perspectiva de sostenibilidad, eficiencia y valorización de recursos locales.

5. Conclusiones

El estudio permitió evaluar el desempeño de una mezcla asfáltica en frío modificada con polímero natural de ichu, identificando los efectos técnicos de su incorporación en distintas proporciones. Se determinó que una dosificación del 6.2% de asfalto residual representa el punto óptimo en términos de densidad y comportamiento mecánico general, constituyendo un diseño patrón técnicamente estable para condiciones operativas similares. Asimismo, se verificó que la humedad de compactación influye directamente en la estabilidad, identificándose un valor óptimo cercano al 4.0%, más allá del cual la mezcla pierde resistencia.

La adición progresiva del polímero de ichu generó una disminución de la estabilidad y un aumento del flujo y del desgaste, aunque se observó una mejora significativa en la impermeabilidad, particularmente con el 1% de adición, lo cual refuerza su potencial como modificador natural en mezclas donde la durabilidad frente a la humedad es prioritaria. El análisis de correlaciones mostró que la presencia del ichu tiene efectos relevantes, aunque no lineales, sobre las propiedades físicas y mecánicas de la mezcla, siendo necesario establecer dosificaciones óptimas según el tipo de proyecto.

Desde un enfoque de sostenibilidad, el ichu se posiciona como un aditivo prometedor, accesible y compatible con las exigencias de mezclas en frío aplicadas en contextos andinos. Su uso racional, en proporciones técnicamente justificadas, puede aportar soluciones efectivas en vías de bajo tránsito, entornos climáticamente exigentes o procesos de mantenimiento vial que requieran rapidez, flexibilidad y menor impacto ambiental. Se recomienda que investigaciones futuras profundicen en su comportamiento bajo condiciones reales de servicio y ciclos de carga repetida.

Contribuciones de los autores

Conceptualización, M.C.C., J.P.C.F. y D.M.L.G.; metodología, J.P.C.F. y D.M.L.G.; software, D.M.L.G.; validación, M.C.C., J.P.C.F. y D.M.L.G.; análisis formal, J.P.C.F.; investigación, M.C.C., J.P.C.F. y D.M.L.G.; recursos, M.C.C.; curación de datos, D.M.L.G.; redacción—preparación del borrador original, M.C.C. y J.P.C.F.; redacción—revisión y edición, M.C.C. y D.M.L.G.; visualización, D.M.L.G.; supervisión, M.C.C.; administración del proyecto, J.P.C.F.; adquisición de financiamiento, M.C.C. Todos los autores han leído y aprobado la versión publicada del manuscrito.

Conflicto de Interés

Los autores no reportan conflictos de interés relacionados con esta investigación.

Declaración sobre el uso de Inteligencia Artificial Generativa

En la preparación de este artículo, se utilizó inteligencia artificial generativa, específicamente la herramienta Open IA, con fines de apoyo en la corrección de borradores y para realizar revisiones menores de gramática y ortografía. Todo el contenido fue cuidadosamente revisado, editado y aprobado por los autores, quienes asumen plena responsabilidad por la integridad y precisión del manuscrito final.

Referencias

- [1] S. P. Muñoz Perez, L. M. Hoyos Diaz, y K. D. C. Puicon Herrera, "Uso del caucho granulado en mezclas asfálticas: Una revisión literaria," *Infraestructura Vial*, vol. 23, no. 41, pp. 11-19, feb. 2021, doi: <https://doi.org/10.15517/iv.v23i41.44410>.
- [2] H. A. Rondón Quintana, M. Muniz de Farias, y F. A. Reyes Lizcano, "Uso de escorias de alto horno y acero en mezclas asfálticas: revisión," *Rev. ing. univ. Medellín*, vol. 17, no. 33, pp. 71-97, dic. 2018, doi: <https://doi.org/10.22395/rium.v17n33a4>.
- [3] E. Llano y G. Restrepo, "Efecto del intemperismo sobre las propiedades fisicoquímicas, el desempeño y la durabilidad de suelos viales aditivados con estabilizantes químicos," *SEES*, vol. 3, no. 1, pp. 2-15, ene. 2022, doi: <https://doi.org/10.54021/seesv3n1-001>.
- [4] K. Vilcas, "Aplicación de geomallas multiaxiales para reducir el fisuramiento del pavimento flexible en la calle Real en la provincia de Huayaco, 2019" Tesis de grado, Universidad César Vallejo, Perú, 2020. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12692/51439>
- [5] P. J. León Torres, J. H. Maila Paucar, y E. W. Albuja Córdova, "Influencia de aditivos (polímeros y polialuminio) en las propiedades físico-mecánicas de mezclas asfálticas en caliente," *FIGEMPA*, vol. 1, no. 1, pp. 60-71, jun. 2020, doi: <https://doi.org/10.29166/revfig.v1i1.1931>.
- [6] J. L. Hernandez, V. M. Sanchez, I. Castillo, S. A. Damián, y R. Telles, "Impacto ambiental de proyectos carreteros. Efectos por la construcción y conservación de superficies de rodamiento: I. pavimentos flexibles," Secretaría de comunicaciones y transportes, 2001. Disponible en: <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt163.pdf>
- [7] J. S. Castro, "Incidencia de la adición de polímeros en los hormigones asfálticos convencionales mezclados en planta para vías en el cantón Ambato, Provincia de Tungurahua," Tesis de grado, Universidad Técnica de Ambato, 2021. Disponible en: <https://repositorio.uta.edu.ec/server/api/core/bitstreams/809f80d4-8db8-41c6-ace7-e23a4e67a702/content>
- [8] J. C. Hernández Moreno, J. B. Hernández Zaragoza, J. M. Horta Rangel, R. Montoya Zamora, y T. López Lara, "Diseño de mezcla asfáltica fría con rellenos cementantes ternarios para reducir la pérdida de estabilidad por humedad," *Infraestructura Vial*, vol. 25, no. 44, pp. 1-9, dic. 2023, doi: <https://doi.org/10.15517/iv.v25i44.55797>.
- [9] N. A. Cajina Cruz, A. Baldi, E. Camacho Garita, y J. P. Aguiar Moya, "Evaluación de desempeño de la mezcla asfáltica modificada con residuos de PVC tipo blíster," *Infraestructura Vial*, vol. 23, no. 42, pp. 13-22, jul. 2021, doi: <https://doi.org/10.15517/iv.v23i42.44688>.
- [10] G. Valdés, F. Pérez-Jiménez, y A. Martínez, "Influencia de la temperatura y tipo de mezcla asfáltica en el comportamiento a fatiga de los pavimentos flexibles," *Revista de la Construcción*, vol. 11, no. 1, pp. 87-100, abr. 2012, doi: <https://doi.org/10.4067/s0718-915x2012000100009>.

- [11] S. Calle y M. Arce, "Estabilización con polímero acrílico de la subrasante de la zona del puente de Añashuayco para su uso como base y comparación frente a un pavimento convencional," Tesis de grado, Universidad Nacional de San Agustín, Arequín, 2018. Disponible en: <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/6118>
- [12] A. Zósimo, M. Surichaqui, M. Huacho, y J. Ronceros, "Diseño de mezcla de concreto $f'c=210$ kg/cm², adicionando cenizas de Stipa Ichu para estructuras de edificación a compresión en Lircay," *Revista Científica Ciencias Ingenieriles*, vol. 2, no. 2, pp. 53-63, jul. 2022, doi: <https://doi.org/10.54943/ricci.v2i2.219>.
- [13] V. Ramos Nazario, C. Parada Quinayá, M. J. Alvan, y E. F. Barreda, "Techno-Economic Assessment of Peruvian Stipa Ichu Microfibres by Steam Explosion," *Journal of Natural Fibers*, vol. 20, no. 2, ago. 2023, doi: <https://doi.org/10.1080/15440478.2023.2248388>.
- [14] M. Frías, L. Caneda-Martínez, M. I. Sánchez de Rojas, C. Tenazoa, y E. Flores, "Scientific and technical studies on eco-efficient binary cements produced with thermally activated ichu grass: Behaviour and properties," *Cement and Concrete Composites*, vol. 111, p. 103613, ago. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103613>.
- [15] V. Cárdenas, "Adición de fibras de polietileno de plástico para mejorar el comportamiento físico - mecánico de mezcla asfáltica en frío, Tacna 2021," Tesis de grado, Universidad Cesar Vallejo, Perú, 2020. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12692/84964>
- [16] C. Tenazoa, H. Savastano, S. Charca, M. Quintana, and E. Flores, "The Effect of Alkali Treatment on Chemical and Physical Properties of Ichu and Cabuya Fibers," *Journal of Natural Fibers*, vol. 18, no. 7, pp. 923-936, oct. 2019, doi: <https://doi.org/10.1080/15440478.2019.1675211>.
- [17] J. Bobadilla Peña, F. L. Tesen Muñoz, J. J. Tigre Acosta, y S. P. Muñoz Pérez, "Uso de polímeros en asfalto: una revisión," *Gaceta Técnica*, vol. 23, no. 1, pp. 94-109, ene. 2022, doi: <https://doi.org/10.51372/gacetatecnica231.7>.
- [18] H. J. Hernández Durán, "Diseño de Mezcla Asfáltica elaborada con agregado de polímeros de Tereftalato de Polietileno (PET)," *revunivo*, vol. 1, no. 12, pp. 27-33, feb. 2023, doi: <https://doi.org/10.5377/revunivo.v12i12.15752>.
- [19] B. Kaa, R. Mogoruzo y I. Anguizola, "Análisis de propiedades de mezclas asfálticas modificadas en Panamá," *Rev-RIC*, vol. 2, no. 1, pp. 48-53, jun. 2016. Disponible en: <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/ric/article/view/600>
- [20] M. J. Sierra-López, P. Partal-López, M. E. Hidalgo-Pérez, y J. Torres-Pérez, "Reutilización de residuos plásticos agrícolas en la fabricación de mezclas bituminosas siguiendo la tecnología por vía seca," *Carreteras*, no. 217, pp. 6-17, 2018. Disponible en: https://www.aopandalucia.es/inetfiles/agencia_innovacion_estructura/852018101124.pdf
- [21] L. Caneda-Martínez, M. Frías, J. Sánchez, N. Rebolledo, E. Flores, y C. Medina, "Durability of eco-efficient binary cement mortars based on ichu ash: Effect on carbonation and chloride resistance," *Cement and Concrete Composites*, vol. 131, p. 104608, ago. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104608>.
- [22] G. Dávila Newman, "El razonamiento inductivo y deductivo dentro del proceso investigativo en ciencias experimentales y sociales," *Revista Laurus*, vol. 12, pp. 180-205, 2006. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=76109911>