

Marshall evaluation of asphalt mixtures modified with recycled PVC for heavy traffic pavements

Denis Gerardo Aguilar Aguilar¹; Julio César Enamorado Herrera¹; Karla Uclés Brevé¹

Julio César López Zerón¹

¹Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Tecnológica Centroamericana (UNITEC), Tegucigalpa, Honduras;
denisaguilar@unitec.edu, erojuliotulio@unitec.edu, karla_ucles@unitec.edu, jclopezeron@unitec.edu

Abstract– *The deterioration of Honduras’ road network and the large share of unpaved roads support the need for technically sound and environmentally beneficial maintenance alternatives. This study evaluated a hot-mix asphalt modified with recycled polyvinyl chloride (PVC), incorporated as a partial aggregate replacement, using the Marshall method. The experimental program included eight 1,200 g Marshall specimens with 5% asphalt binder: three conventional control specimens and five PVC-modified specimens containing 2%, 4%, 6%, 8%, and 10% PVC. Results indicate that all PVC-modified specimens exceeded the adopted minimum Marshall stability threshold for heavy traffic; however, the conventional mixture showed higher corrected stability values. An optimum PVC content of 4.6% was estimated using a multivariable graphical criterion. Nevertheless, the air-void contents reported for the modified mixtures exceeded the recommended volumetric range, meaning that the alternative should be interpreted as technically promising in terms of stability, but conditioned on volumetric redesign and further experimental validation with a larger number of replicates. The proposal provides environmental value through plastic-waste reutilization and opens an applied research line for sustainable pavements in developing-economy contexts.*

Keywords– *asphalt mixture; recycled PVC; Marshall method; stability; air voids; heavy-traffic pavements.*

Evaluación Marshall de Mezclas Asfálticas Modificadas con PVC Reciclado para Pavimentos de Tráfico Pesado

Denis Gerardo Aguilar Aguilar¹; Julio César Enamorado Herrera¹; Karla Uclés Brevé¹;
Julio César López Zerón¹

¹Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Tecnológica Centroamericana (UNITEC), Tegucigalpa, Honduras;
denisaguilar@unitec.edu, erojuliotulio@unitec.edu, karla_ucles@unitec.edu, jclopezeron@unitec.edu

Resumen– El deterioro de la red vial hondureña y la alta proporción de vías no pavimentadas motivan la búsqueda de alternativas de mantenimiento con mejor desempeño y menor impacto ambiental. En este estudio se evaluó una mezcla asfáltica en caliente modificada con policloruro de vinilo (PVC) reciclado, incorporado como agregado parcial, mediante el método Marshall. El programa experimental incluyó ocho briquetas de 1,200 gr. con 5% de asfalto: tres probetas convencionales sin PVC y cinco probetas modificadas con 2%, 4%, 6%, 8% y 10% de PVC. Los resultados muestran que todas las mezclas modificadas superaron el umbral mínimo de estabilidad adoptado para tránsito pesado; sin embargo, la mezcla convencional presentó mayores valores de estabilidad corregida. El contenido óptimo estimado de PVC fue 4.6%, obtenido mediante criterio gráfico multivariable. No obstante, los vacíos de aire reportados en las mezclas modificadas exceden el rango volumétrico recomendado, por lo que la alternativa debe interpretarse como técnicamente prometedora en términos de estabilidad, pero condicionada a un rediseño volumétrico y una alta validación experimental con mayor número de réplicas. La propuesta aporta valor ambiental por reutilización de residuos plásticos y abre una línea de investigación aplicada para pavimentos sostenibles en contextos de economías en desarrollo.

Palabras clave– mezcla asfáltica; PVC reciclado; método Marshall; estabilidad; vacíos de aire; pavimentos de tráfico pesado.

I. INTRODUCCIÓN

La infraestructura vial constituye un habilitador directo de competitividad, acceso a servicios y cohesión territorial. En el caso de Honduras, el desafío es particularmente crítico por la combinación de alta proporción de vías no pavimentadas y una carpeta asfáltica existente con tramos en condición deficiente, lo cual incrementa los costos de operación vehicular, limita la conectividad en temporadas lluviosas y presiona los presupuestos de conservación. En ese contexto, se ha reportado que el 77% de la red vial del país no se encuentra pavimentada, y que existen aproximadamente 2,000 km de carpeta asfáltica deteriorada, situación que justifica la exploración de alternativas técnicas orientadas a rehabilitación y mantenimiento con criterios de desempeño [1].

En paralelo a la problemática funcional, la gestión de residuos (particularmente plásticos) se ha consolidado como un reto de sostenibilidad que exige soluciones con valor agregado. Bajo un enfoque innovador de economía circular, la

incorporación de residuos poliméricos en materiales de construcción se considera una línea de interés creciente, siempre que su implementación mantenga trazabilidad técnica, control de calidad y verificación experimental. En el ámbito de pavimentos, las mezclas asfálticas modificadas con polímeros han sido estudiadas como alternativa para ajustar propiedades mecánicas y reológicas, con el propósito de mejorar el comportamiento frente a solicitaciones típicas del servicio (deformaciones permanentes, fisuración y fatiga), conservando la constructibilidad del sistema [5], [8], [11].

En el estado del arte reciente, las mezclas asfálticas modificadas con polímeros se han estudiado como alternativas para mejorar la respuesta mecánica del pavimento, reducir deformaciones permanentes y aprovechar residuos con alto potencial de valorización. Sin embargo, la evidencia actual disponible muestra que el desempeño depende fuertemente del tipo de polímero, granulometría, método de incorporación, compatibilidad con el ligante y control volumétrico estricto de la mezcla. En ese sentido, el PVC reciclado puede representar una alternativa de interés ambiental, pero su incorporación como agregado parcial debe evaluarse con mucha precaución, dado que puede alterar la densidad, adhesión ligante-agregado y contenido de vacíos de aire [5] – [11].

Dentro de los polímeros disponibles, el policloruro de vinilo (PVC) se reconoce por su uso extendido en aplicaciones industriales/domésticas, y por sus propiedades termoplásticas, lo cual hace técnicamente viable su incorporación en mezclas asfálticas cuando se controla adecuadamente su forma de suministro, granulometría y compatibilidad con el ligante [6], [7], [9]. Sin embargo, el desempeño de una mezcla modificada depende de múltiples variables: tipo y condición del agregado, contenido y grado del asfalto, dosificación del modificador, temperatura de mezclado y/o compactación, así como parámetros volumétricos resultantes. Por ello, el uso de PVC no debe asumirse como un “mejorador universal”; debe justificarse mediante ensayos normalizados que permitan determinar, con evidencia cuantitativa, si la mezcla resultante satisface los requisitos mínimos de diseño y se ajusta al nivel de tránsito objetivo.

En esta investigación se aborda ese problema desde una lógica estrictamente experimental: determinar un porcentaje óptimo de PVC reciclado a incorporar en una mezcla asfáltica en caliente, evaluando su desempeño mediante el método Marshall, el cual sigue siendo un procedimiento de referencia ampliamente empleado en el diseño de mezclas asfálticas y en la verificación comparativa de alternativas modificadas, especialmente cuando se requiere un balance entre estabilidad, deformabilidad y control volumétrico [2], [4], [5]. En el marco del estudio, el PVC se introduce como agregado (no como ligante), con diferentes porcentajes, con el objetivo de comparar el efecto incremental del modificador y establecer la dosificación que ofrezca el mejor compromiso entre desempeño y cumplimiento normativo.

De manera específica, la investigación se centra en: (i) verificar la resistencia de mezclas asfálticas con incorporación de PVC mediante ensayos de estabilidad y flujo Marshall; (ii) evaluar y comparar los parámetros volumétricos de la mezcla (vacíos, peso específico, capacidad máxima y variables asociadas al diseño volumétrico), apoyándose en el análisis gráfico de resultados; (iii) contrastar los valores obtenidos con los requisitos mínimos establecidos por normativa AASHTO utilizada como referencia en el territorio nacional; y (iv) establecer, con base en los resultados, si la mezcla propuesta es técnicamente apta para condiciones de tránsito pesado, bajo el alcance y condiciones del programa experimental.

El interés práctico del estudio radica en que, si la mezcla modificada logra satisfacer los criterios mínimos de desempeño, podría constituir una alternativa viable para programas de mantenimiento y rehabilitación en tramos donde se requiere una solución funcional y repetible, con potencial aporte ambiental por reutilización de residuos plásticos. No obstante, en un enfoque de rigor científico, la aptitud para aplicación generalizada debe entenderse como una conclusión condicionada: depende del control de materiales, procedimientos de producción y compactación, y validación complementaria en campo; por tanto, la evidencia de laboratorio se interpreta como base técnica para una decisión informada, no como garantía absoluta de desempeño en cualquier contexto sin verificación adicional.

Finalmente, para facilitar la lectura y trazabilidad del aporte, el documento se organiza en secciones que describen: el marco metodológico y el programa experimental; los resultados obtenidos en estabilidad, flujo y parámetros volumétricos; el análisis comparativo de desempeño entre mezcla convencional y mezclas con PVC; las conclusiones técnicas derivadas del cumplimiento normativo; y las recomendaciones para aplicación y continuidad investigativa conforme a los hallazgos del estudio.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El desempeño de la infraestructura vial depende, en gran medida, de la condición superficial y estructural del pavimento. En Honduras, la magnitud del problema se expresa en dos frentes simultáneos: (i) una elevada proporción de red vial no pavimentada y (ii) un volumen significativo de red pavimentada con carpeta asfáltica en condición de deterioro. En el documento base se reporta un estimado de 2,000 km de carpeta asfáltica deteriorada, así como que alrededor del 77% de la red vial no está pavimentada, equivalente a un orden de 12,000 km. Estas cifras dimensionan un escenario donde la conservación vial requiere alternativas técnicas que, además de ser constructivamente viables, resulten verificables mediante criterios normativos y ensayos estandarizados [1].

En este contexto, el planteamiento del problema se centra en la búsqueda de una alternativa a las mezclas asfálticas convencionales, mediante la incorporación de plástico reciclado (específicamente policloruro de vinilo (PVC)) con el objetivo de investigar su factibilidad técnica como modificación de mezcla asfáltica.

El problema no es únicamente “si se puede mezclar PVC con asfalto”, sino si, bajo un diseño controlado y reproducible, la mezcla resultante cumple parámetros mínimos de desempeño y permite inferir su aptitud para condiciones de tránsito pesado, evaluada con indicadores clásicos del método Marshall (estabilidad y flujo) y parámetros volumétricos asociados.

A. Precedentes del problema

El deterioro de pavimentos asfálticos y la expansión de la demanda por movilidad (asociada al incremento del flujo vehicular) obligan a revisar de forma continua las propiedades y comportamiento de asfaltos convencionales, especialmente cuando las condiciones de servicio superan el rango para el cual fue originalmente concebida una determinada solución de mantenimiento o rehabilitación. En el documento se plantea que, debido a ese incremento del flujo vehicular, se requieren alternativas que contribuyan a mejorar la resistencia y prolongar la vida útil de las carpetas asfálticas, motivación respaldada por antecedentes académicos citados para el caso colombiano [7], [9].

Bajo esa lógica, se propone investigar la implementación de PVC reciclado en mezclas asfálticas de alta resistencia, ejecutando ensayos de laboratorio conforme al método Marshall y desarrollando una comparación directa entre: (i) una mezcla modificada con PVC y (ii) una mezcla convencional. El criterio comparativo central se define mediante indicadores de estabilidad y flujo.

Asimismo, se citan antecedentes experimentales de incorporación de desperdicios plásticos en briquetas Marshall, donde el porcentaje de plástico respecto al peso de la briketa se utiliza como variable de control para evaluar cambios en propiedades mecánicas; el sustento de este antecedente se apoya en resultados de estabilidad, flujo y peso unitario bajo el

esquema Marshall, y se vincula a fuentes académicas consultadas en el desarrollo del documento [7], [9].

En síntesis, los precedentes apuntan a una necesidad técnica clara: ajustar el desempeño de la mezcla para resistir mejor las solicitaciones del tránsito (particularmente tránsito pesado) sin perder control sobre los parámetros de diseño, lo cual justifica investigar el PVC como alternativa de modificación.

B. Definición del problema

Con base en el diagnóstico expuesto, el problema se define como la necesidad de contar con una alternativa a las mezclas asfálticas convencionales que contribuya, de manera verificable, a reducir la brecha entre red pavimentada y no pavimentada, atendiendo la escala del desafío asociada a los 12,000 km estimados de red vial no pavimentada y al deterioro de la red pavimentada existente [1].

En esa línea, el documento establece que las mezclas asfálticas modificadas con plásticos reciclados (en particular PVC) se han planteado como alternativa frente a mezclas convencionales por razones técnicas, económicas y ambientales: mitigación de contaminación, reducción de costos y búsqueda de mayor resistencia. Se señala, además, que existen demostraciones de mejoras en el desempeño del pavimento y en el incremento de la vida útil, y se ejemplifica el comportamiento indeseable de mezclas convencionales mediante deformaciones características en carpeta asfáltica (ahuellamiento/deformación), presentadas como evidencia visual en la documentación [2].

En consecuencia, el núcleo del problema de investigación puede expresarse con precisión operativa así:

¿En qué medida la incorporación de PVC como agregado modifica el desempeño Marshall (estabilidad y flujo) de una mezcla asfáltica?

¿Qué rango de dosificación de PVC permite cumplir requisitos mínimos de diseño y soportar condiciones de tránsito pesado, bajo el marco experimental adoptado?

Estas preguntas se abordan mediante la comparación sistemática entre mezcla convencional y mezclas con diferentes contenidos de PVC, sosteniendo el análisis en indicadores Marshall y en el control de parámetros volumétricos, tal como se plantea en el documento.

C. Justificación

La justificación técnica se apoya en que, si la mezcla modificada con PVC demuestra un desempeño compatible con criterios mínimos de diseño, puede considerarse una alternativa para intervenciones de mantenimiento y rehabilitación que ayuden a enfrentar la condición de la red vial nacional, especialmente en escenarios donde el objetivo sea incrementar la resistencia de la mezcla y su vida útil.

Adicionalmente, el uso de PVC reciclado se enmarca en un enfoque de valorización de residuos plásticos, alineado con criterios de sostenibilidad. El documento plantea que incorporar plásticos de alta densidad en mezclas asfálticas busca simultáneamente reducir la contaminación asociada a

plásticos desechados y mejorar características técnicas de mezclas convencionales, sosteniendo esa motivación con bibliografía específica sobre mezclas modificadas con elastómeros y plastómeros [8].

En términos prácticos, la pertinencia del estudio se justifica por su orientación a resultados medibles: la verificación mediante estabilidad y flujo Marshall permite construir evidencia objetiva para decidir si la alternativa es aplicable bajo condiciones de servicio exigentes (tránsito pesado), y si ofrece una ruta técnicamente defendible para explorar su uso en programas de conservación vial.

III. METODOLOGÍA

A. Enfoque y diseño experimental

La investigación adoptó un enfoque cuantitativo-experimental, orientado a evaluar el efecto de la incorporación de PVC reciclado como agregado parcial en el desempeño Marshall de una mezcla asfáltica en caliente.

El diseño comparó una mezcla convencional sin PVC frente a mezclas modificadas con contenidos de 2%, 4%, 6%, 8% y 10% de PVC, manteniendo constante el contenido de asfalto en 5% y la masa de briqueta en 1,200 g [3], [12].

B. Variables de estudio

La variable independiente fue el contenido de PVC reciclado incorporado como agregado parcial en la mezcla. Las variables dependientes fueron la estabilidad Marshall corregida, el flujo y los parámetros volumétricos asociados al diseño de mezcla, principalmente gravedad específica bulk, gravedad específica máxima teórica y porcentaje de vacíos de aire. Esta estructura permitió comparar el efecto de la dosificación de PVC sobre la respuesta mecánica y volumétrica de las briquetas evaluadas [2], [4].

C. Técnicas e instrumentos aplicados

1) Clasificación granulométrica: La granulometría se ejecuta tomando una muestra representativa, secándola, disgregándola y pesándola; posteriormente se pesa el material retenido en cada tamiz para determinar el porcentaje retenido y construir la curva granulométrica [12].

2) Ensayo Marshall: El método Marshall se utiliza para determinar estabilidad, deformación y cociente Marshall de probetas de mezcla bituminosa. Para ejecutar correctamente el diseño de mezcla, se establecen ensayos para obtener: peso específico efectivo, máximo y bulk; estabilidad y flujo a 60°C; y análisis de densidad y vacíos. En la descripción general del proceso, se indica la compactación por impacto con una energía de referencia de 50 golpes por cara. No obstante, en el procedimiento experimental adoptado para la fabricación de briquetas, se especifica la condición de tránsito pesado con 75 golpes por cara [2]–[4], [12].

3) Instrumentos: Para la fase experimental se emplean instrumentos de control de temperatura y tiempo, medición de masa, así como preparación y compactación de especímenes,

incluyendo moldes cilíndricos metálicos de 4" de diámetro y 3" de altura y martillo de compactación de 10lb [3], [12].

D. Materiales

El estudio utiliza materiales pétreos (agregado fino y grueso), filler, ligante asfáltico (bitumen) y PVC incorporado en porcentajes controlados dentro de la mezcla.

E. Procedimiento experimental (campaña de laboratorio)

La secuencia operativa se estructura como una cadena de actividades de laboratorio que incluye, entre otras, la preparación del PVC (triturado), el lavado y secado de agregados, granulometría, diseño de mezcla, mezcla en caliente, determinación de pesos específicos, construcción y desmontaje de probetas, verificación dimensional y ensayo de estabilidad y fluencia. De manera específica, el procedimiento contempla:

- ✓ Diseño de mezcla y determinación de proporciones, seguido del pesado y mezclado de agregados y el calentamiento de los componentes ("mezcla en caliente").
- ✓ Fabricación de briquetas Marshall mediante compactación por impacto para condición de tránsito pesado, aplicando 75 golpes por cara.
- ✓ Control geométrico del espécimen, midiendo diámetro y espesor en dos lecturas para usar el promedio en los cálculos.
- ✓ Acondicionamiento térmico: las briquetas se sumergen en baño a 60°C durante 30 min, se secan superficialmente y se ensayan.
- ✓ Ensayo Marshall: aplicación de carga en la prensa hasta la falla para obtener estabilidad y flujo.

F. Cálculos y procesamiento de datos

1) Granulometría y control del error;

A partir de masas retenidas por tamiz, se calcula el porcentaje retenido como:

$$\% \text{Retenido} = \left(\frac{\text{Peso retenido acumulado}}{M_{\text{total}}} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

Se exige que el porcentaje de error del proceso de tamizado sea menor al 1% como criterio de control.

Para la granulometría combinada, se emplea la combinación ponderada de agregados, expresada como:

$$C = A(\% \text{Agregado } A) + B(\% \text{Agregado } B) + F(\% \text{Filler}) \quad (2)$$

Asimismo, se calculan los coeficientes:

$$C_C = \frac{D_{30}^2}{D_{10} D_{60}} \quad (3)$$

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (4)$$

2) Gravedades específicas y vacíos de aire;

Se calcula la gravedad específica bulk de la mezcla compactada (G_{mb}) a partir de la masa en aire (W_a) y masa sumergida (W_s):

$$G_{mb} = \frac{W_a}{W_a - W_s} \cdot \gamma_{\text{agua}} \quad (5)$$

La gravedad específica máxima teórica (G_{mm}) se obtiene

$$G_{mm} = \frac{W_a}{W_a - W_s} \quad (6)$$

El porcentaje de vacíos llenos de aire de la mezcla compactada (P_a) se determina con:

$$P_a = 100 \left(\frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \right) \quad (7)$$

3) Corrección de estabilidad y estabilidad corregida;

Para ajustar la estabilidad por diferencias de volumen/altura de briketa, se aplica un factor de corrección (1.09 para el rango de volúmenes indicado) y se calcula:

$$\text{Stabilidad corregida} = \text{Stabilidad medida} \cdot \text{Factor de corrección} \quad (8)$$

IV. RESULTADOS

A. Resultados de granulometría y selección del tamaño máximo del agregado

Con base en los datos de granulometría empleados para el diseño de la mezcla, se determinó el tamaño máximo del agregado para definir la distribución granulométrica de las briquetas. El tamaño máximo identificado fue 1" (≈ 25 mm), correspondiente al tamiz en el cual se obtiene 100% de material pasante, criterio que fija el límite superior efectivo del agregado en el diseño.

A partir del tamaño máximo adoptado, se establecieron los rangos de control mediante límite inferior y límite superior para las fracciones gruesa y fina, verificando el comportamiento de pase en cada tamiz como condición previa para el balance de agregados.

Posteriormente, se determinó una dosificación "ideal" de agregados mediante tanteo, adoptando una combinación representativa de agregado grueso + agregado fino y un contenido de filler en el rango típico indicado (2–5%). En el diseño presentado, el esquema base de agregados se muestra con una combinación 50% (gruesa) – 50% (fina) – 5% (filler) como referencia de ajuste granulométrico.

B. Dosificación de mezcla y fabricación de briquetas (base comparativa)

Para la determinación del comportamiento mecánico y la selección del contenido de PVC, se definió un programa experimental con 8 briquetas en total, partiendo de una mezcla diseñada con 5% de asfalto y adicionando PVC en proporciones crecientes para comparación.

El esquema comparativo incluyó:

- 3 briquetas de control (5% asfalto, sin PVC).
- 5 briquetas modificadas con PVC, con contenidos de 2%, 4%, 6%, 8% y 10%.

La masa de cada probeta se mantuvo constante en 1200 g, redistribuyendo las masas por material según el porcentaje de PVC. Por ejemplo, para el caso de 2% PVC, se reporta un peso de PVC de 22.43g, manteniendo proporciones coherentes de grava, arena y filler en la masa total.

C. Determinación del porcentaje óptimo de PVC

La selección del contenido óptimo de PVC se fundamentó en el criterio gráfico: se emplearon tres curvas (ver fig.1, 2 y 3) con el porcentaje de PVC en el eje horizontal, y se extrajeron los valores de PVC asociados a la intersección más elevada (pico) para cada variable considerada. Las variables empleadas fueron:

1. Estabilidad,
2. Porcentaje de vacíos llenos de aire en la mezcla compactada,
3. Peso específico de cada pastilla.

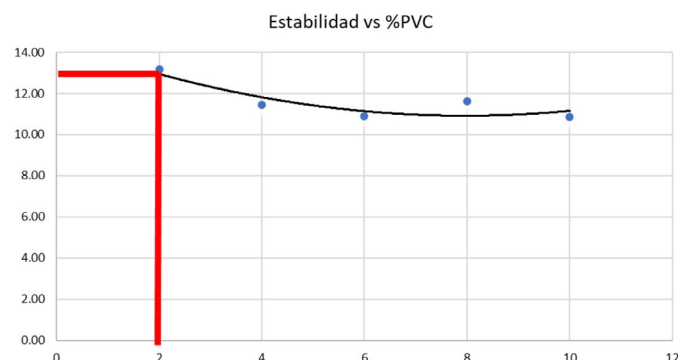


Fig.1. Estabilidad Marshall corregida vs. contenido de PVC

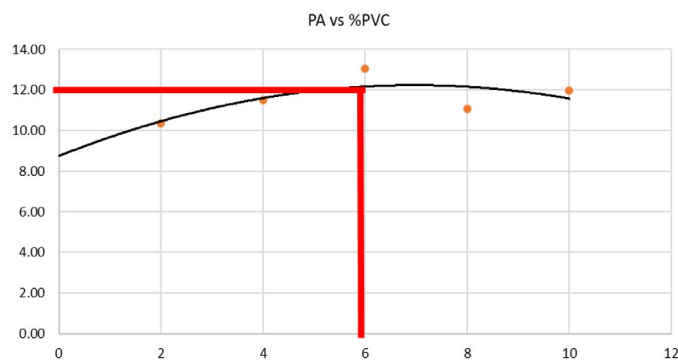


Fig.2. Vacíos de aire de la mezcla compactada vs. contenido de PVC

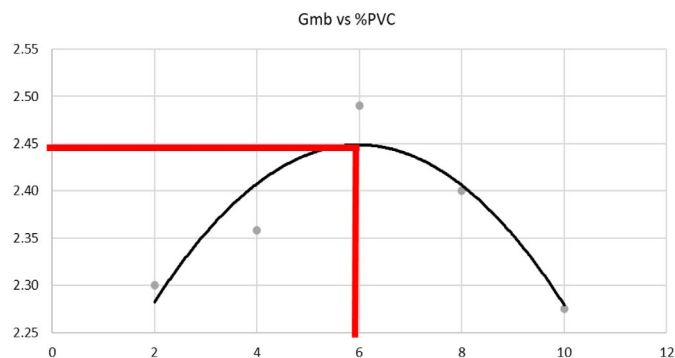


Fig. 3. Gravedad específica bulk vs. contenido de PVC

De dichas gráficas se extrajeron los valores de PVC: 2.1, 5.8 y 5.9, respectivamente, y se calculó el porcentaje óptimo como el promedio aritmético de los tres valores:

$$\%PVC_{opt} = \frac{a + b + c}{3} = \frac{2.1 + 5.8 + 5.9}{3} = 4.6\%$$

Con ello, se concluye que el porcentaje óptimo de PVC para briquetas de concreto asfáltico con 5% de asfalto es 4.6% PVC.

D. Estabilidad Marshall corregida y comparación control vs. PVC

El análisis final compara la estabilidad de las 5 briquetas con PVC frente a las 3 briquetas control sin PVC. Los resultados se presentan en la tabla I, con corrección aplicada mediante un factor 1.09, según se reporta en la tabla de corrección.

TABLA I
ESTABILIDAD CORREGIDA (kN) PARA BRIQUETAS CON Y SIN PVC
(FACTOR = 1.09)

Mezcla	Contenido	Estabilidad corregida (kN)
Modificada	2% PVC	13.17
Modificada	4% PVC	11.46
Modificada	6% PVC	10.88
Modificada	8% PVC	11.62
Modificada	10% PVC	10.85
Control	5% asfalto (sin PVC)	15.52
Control	5% asfalto (sin PVC)	18.36
Control	5% asfalto (sin PVC)	16.61

La mezcla control presenta mayor estabilidad que las mezclas modificadas con PVC, de forma consistente. Esto se indica explícitamente en el documento al concluir que, aunque cumplen la estabilidad mínima, las probetas sin PVC exhiben mayor resistencia.

Dentro de las mezclas con PVC, el valor máximo de estabilidad corregida se observa en 2% PVC (13.17 kN), y la estabilidad tiende a disminuir al aumentar el contenido de PVC hacia 10% (10.85 kN).

E. Verificación frente a criterios del diseño Marshall

De acuerdo con los criterios del Asphalt Institute reportados para diseño Marshall, se establece que todas las

mezclas (con y sin PVC) cumplen la estabilidad mínima, aunque la comparación muestra superioridad resistente del control.

En este estudio se adoptaron los criterios de aceptación del diseño Marshall para tránsito pesado, empleando una energía de compactación de 75 golpes por cara (ver tabla II). Bajo dicho esquema, se consideraron como umbrales de verificación: estabilidad mínima de 8006 N, rango de flujo 8–14 (en unidades de 0.25 mm), vacíos de aire 3–5% y vacíos rellenos de asfalto (VFA) 65–75%, entre otros parámetros volumétricos del método. Estos criterios se utilizaron como referencia para evaluar el cumplimiento y comparar el desempeño entre la mezcla convencional y las mezclas modificadas con PVC.

TABLA II
CRITERIOS MARSHALL DE REFERENCIA PARA TRÁNSITO PESADO

Método Marshall	Tráfico ligero		Tráfico medio		Tráfico pesado	
	Carpeta y base		carpeta y base		carpeta y base	
Criterio de mezcla	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx
Compactación, número de golpes en cada uno de los especímenes	35		50		75	
Estabilidad, (N) (lb)	3336		5338		8006	
	750	----	1200	----	1800	----
Flujo, (0.25 mm) (0.01 in)	8	18	8	16	8	14
Porcentaje de vacíos	3	5	3	5	3	5
Porcentaje de vacíos en los agregados minerales	Ver Tabla 2.2					
Porcentaje de vacíos rellenos de asfalto	70	80	65	78	65	75

Fuente: adaptado de Asphalt Institute [2]

F. Hallazgo clave del apartado de Resultados

Bajo el esquema experimental descrito, se estimó un contenido óptimo de PVC de 4.6% mediante criterio gráfico multivariable. Las mezclas modificadas con PVC superaron el umbral mínimo de estabilidad Marshall adoptado para tránsito pesado; sin embargo, la mezcla convencional presentó mayor estabilidad corregida. Además, los vacíos de aire de las mezclas con PVC se ubicaron por encima del rango volumétrico recomendado, lo que representa una necesidad de rediseñar la mezcla para mejorar la propiedad de densidad, reducir permeabilidad potencial y fortalecer su aplicabilidad en condiciones reales de tránsito pesado.

V. DISCUSIÓN

El objetivo experimental del estudio fue evaluar la viabilidad mecánica de una mezcla asfáltica en caliente modificada con policloruro de vinilo (PVC) como sustituto parcial del agregado, mediante el método Marshall y su comparación directa con una mezcla convencional (sin PVC). En términos de desempeño estructural inmediato, el indicador de referencia empleado fue la estabilidad Marshall corregida (kN), por su relación con la resistencia a la deformación bajo carga y con la capacidad portante inicial de la mezcla [2], [4]. Paralelamente, se analizaron parámetros volumétricos (Gmm, Gmb y Pa) debido a que el comportamiento mecánico de una

mezcla asfáltica está fuertemente condicionado por su densificación, contenido de vacíos y la calidad del contacto agregado–ligante [2], [3], [4].

A. Comparación mecánica: estabilidad Marshall (mezcla convencional vs. mezclas con PVC)

Los resultados muestran que, si bien las mezclas modificadas con PVC alcanzan niveles de estabilidad corregida compatibles con un desempeño portante inicial aceptable, la mezcla convencional presenta comportamiento superior. En particular, la mezcla sin PVC registró estabilidades corregidas de 15.52, 18.36 y 16.61 kN, con un promedio de 16.83 kN. En contraste, las mezclas con PVC presentaron estabilidades corregidas de 13.17, 11.46, 10.88, 11.62 y 10.85 kN (PVC = 2%, 4%, 6%, 8% y 10%, respectivamente), con un promedio de 11.60 kN. Esto representa una disminución promedio aproximada del 31% respecto a la mezcla convencional.

Este descenso es consistente con el hecho de que el PVC, al actuar como componente polimérico sólido dentro de la matriz granular, tiende a modificar el mecanismo de resistencia interna: puede reducir el entrelazamiento mineral–mineral, alterar la textura efectiva del esqueleto granular y afectar la adhesión agregado–ligante si no se controla estrictamente la granulometría del plástico, su limpieza, su morfología y el método de incorporación [5]–[7], [9], [11]. La literatura reporta que el desempeño de mezclas modificadas con polímeros puede mejorar o degradarse dependiendo de la dosificación y del modo en que el polímero interactúe con el ligante y con el esqueleto granular; en adiciones no optimizadas, el resultado típico es una pérdida de estabilidad y un incremento de susceptibilidad a deformación, aun cuando el material conserve resistencia mínima [5]–[8], [11].

B. Lectura volumétrica: densificación (Gmb), gravedad específica máxima (Gmm) y vacíos (Pa)

Los resultados volumétricos muestran variaciones relevantes al incorporar PVC. Para PVC = 2% a 10% se obtuvieron valores de Gmb entre 2.51 y 2.28, con tendencia general a la disminución conforme aumenta el porcentaje de PVC. En paralelo, Gmm se mantuvo alrededor de 2.76–2.80 para 2–8% PVC, pero cayó a 2.59 al 10% PVC. Esta disminución conjunta en densidades es coherente con la menor gravedad específica del PVC frente a los agregados minerales tradicionales, lo cual afecta la capacidad de compactación y el empaquetamiento del sistema granular [7].

En términos de vacíos de aire de la mezcla compactada (Pa), se obtuvieron valores de 10.36%, 11.51%, 13.04%, 11.07% y 11.97% para 2%, 4%, 6%, 8% y 10% PVC, respectivamente. La evidencia técnica disponible establece que el contenido de vacíos es un determinante crítico de desempeño: vacíos elevados tienden a incrementar la permeabilidad, aceleran el envejecimiento del ligante, aumentan la susceptibilidad a daño por humedad y reducen la

resistencia mecánica efectiva bajo carga repetida [2], [10]. En consecuencia, los Pa reportados constituyen un indicio de que el sistema modificado, tal como fue dosificado y compactado, tiende a quedar más abierto/poroso que lo deseable para condiciones de servicio exigentes. Esto ayuda a explicar, desde un punto de vista mecanicista, por qué la estabilidad Marshall disminuye al introducir PVC: un esqueleto granular menos denso y con mayor porosidad reduce el área de contacto efectivo y concentra esfuerzos, debilitando la respuesta a carga [2], [4], [10].

C. Lectura por dosificación: “óptimo” de PVC y balance multi-criterio

El estudio determinó un PVC “óptimo” de 4.6% a partir del promedio de tres puntos de intersección derivados de gráficas (2.1, 5.8 y 5.9). Este enfoque busca un balance entre estabilidad, vacíos y densidad, lo cual es conceptualmente consistente con la filosofía de diseño Marshall: la mezcla no se optimiza por un único criterio, sino por un compromiso entre resistencia y propiedades volumétricas [2], [4]. Sin embargo, se observa que la mayor estabilidad dentro de las mezclas con PVC ocurre al 2% (13.17 kN), mientras que dosificaciones mayores (6–10%) reducen el desempeño mecánico. Esto sugiere que, para el PVC empleado como agregado, existe una zona de dosificación baja donde el material puede aportar sin perturbar críticamente el esqueleto mineral, pero al superar cierto umbral se compromete la estructura resistente [5]–[7], [9]. En futuros ajustes del diseño, conviene evaluar (i) una ventana más fina alrededor de 2–5% PVC con replicación experimental, y (ii) alternativas de incorporación (por ejemplo, tratamiento superficial del PVC o modificación del ligante) para mejorar adherencia y compactación [6], [7].

D. Implicaciones para tránsito pesado y pertinencia técnica

Bajo criterios de diseño Marshall para tránsito pesado, el cumplimiento de estabilidad mínima es condición necesaria pero no suficiente. Aun cuando las mezclas con PVC alcancen estabilidad mínima, su mayor porosidad puede comprometer durabilidad y desempeño a mediano plazo, particularmente en ambientes húmedos o con ciclos térmicos marcados [8]. Desde una perspectiva de ingeniería aplicada, el potencial del PVC como insumo alternativo es real por razones ambientales y de economía circular; no obstante, para defender su uso en especificaciones de tránsito pesado, el diseño debe acompañarse de verificaciones complementarias: sensibilidad a humedad (por ejemplo, TSR), deformación permanente (rutting) bajo carga repetida y evaluación de envejecimiento del ligante. Este tipo de verificación escalonada es coherente con el enfoque de desempeño reportado en estudios comparativos Marshall–Superpave, donde se recomienda no depender de un único parámetro para calificar mezclas modificadas [2], [10].

E. Análisis descriptivo exploratorio de estabilidad corregida

Con fines exploratorios, se realizó una comparación descriptiva entre el grupo convencional y el conjunto de mezclas modificadas con PVC. La mezcla convencional presentó una estabilidad corregida promedio de 16.83 kN, mientras que las mezclas con PVC registraron un promedio de 11.60 kN. Esta diferencia evidencia una reducción aproximada del 31% en la estabilidad promedio asociada a la incorporación de PVC como agregado parcial.

TABLA III
ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS EXPLORATORIOS DE ESTABILIDAD CORREGIDA (KN)

Convencional (sin PVC):	media = 16.83; DE = 1.43; mediana = 16.61; mín-máx = 15.52–18.36.
Con PVC (2–10%):	media = 11.60; DE = 0.94; mediana = 11.46; mín-máx = 10.85–13.17.

No obstante, dado que las mezclas asfálticas modificadas corresponden a dosificaciones distintas de PVC y no a réplicas de una misma condición experimental, estos resultados deben interpretarse con cautela. En consecuencia, no se plantea una validación inferencial definitiva, sino una lectura exploratoria del comportamiento observado. Para una correcta y robusta comparación estadística, se requiere ampliar el programa experimental incorporando al menos tres réplicas por cada contenido de PVC y de preferencia, una matriz factorial que combine contenido de asfalto, como de PVC [2], [4], [10].

Desde el punto de vista técnico, la tendencia observada es coherente con los resultados volumétricos: la incorporación de PVC redujo la densidad, elevando los vacíos de aire, y eso puede afectar la estabilidad, durabilidad y resistencia frente a condiciones de servicio exigentes. Por tanto, la alternativa debe considerarse prometedora en términos de reutilización de residuos y cumplimiento mínimo de estabilidad, pero condicionada a un rediseño volumétrico y validación de experimento con mayor número de réplicas [2], [6], [10], [11].

VI. CONCLUSIONES

1. El programa experimental permitió evaluar el efecto de incorporar PVC reciclado como agregado parcial en mezclas asfálticas en caliente, utilizando el método Marshall como criterio de comparación mecánica y volumétrica.
2. Las mezclas modificadas con PVC alcanzaron estabilidades corregidas entre 10.85 kN y 13.17 kN, superando el umbral mínimo de estabilidad adoptado para tránsito pesado. No obstante, la mezcla convencional sin PVC presentó valores superiores, entre 15.52 kN y 18.36 kN, evidenciando mayor capacidad portante bajo las condiciones de laboratorio evaluadas.

3. El contenido óptimo estimado de PVC fue 4.6%, calculado mediante criterio gráfico multivariable. Sin embargo, la mayor estabilidad dentro de las mezclas modificadas se registró con 2% de PVC, lo que sugiere la necesidad de estudiar con mayor detalle la ventana de dosificación entre 2% y 5%.
4. Los vacíos de aire reportados para las mezclas con PVC exceden el rango volumétrico recomendado para tránsito pesado, por lo que la alternativa no debe interpretarse como una solución final lista para aplicación directa, sino como una propuesta técnicamente prometedora que requiere rediseño volumétrico, mayor densificación y validación complementaria [2].
5. La incorporación de PVC reciclado aporta valor ambiental al promover la reutilización de residuos plásticos; sin embargo, su aplicación en pavimentos de tránsito pesado debe condicionarse a ensayos adicionales de susceptibilidad a humedad, deformación permanente, fatiga, envejecimiento y validación mediante mayor número de réplicas por dosificación [10], [11].

VII. RECOMENDACIONES

Con base en los hallazgos obtenidos (cumplimiento de estabilidad mínima en mezclas con PVC, pero con estabilidad superior en la mezcla convencional), se recomienda orientar la continuidad del trabajo hacia optimización de diseño, robustez estadística y validación de desempeño para tránsito pesado, manteniendo trazabilidad con criterios normativos y métodos reconocidos de diseño de mezclas.

1. Rediseño volumétrico y optimización paramétrica conjunta (contenido de asfalto $\times$ contenido de PVC);

Rediseñar la mezcla modificada con PVC para reducir los vacíos de aire al rango volumétrico recomendado para tránsito pesado. Este rediseño debe considerar ajustes simultáneos en el contenido de asfalto, contenido de PVC, granulometría combinada, energía de compactación, forma y tamaño de partícula del PVC, con el fin de mejorar la densidad y reducir la permeabilidad potencial de la mezcla. En la práctica, esto implica ampliar el diseño experimental a una matriz factorial que evalúe varios niveles de ligante y varios contenidos de PVC, identificando el óptimo mediante criterios multi-respuesta: estabilidad, flujo, gravedad específica bulk, vacíos de aire y vacíos rellenos de asfalto. Este enfoque es coherente con la filosofía del diseño Marshall, donde el contenido de ligante influye directamente en la densidad, vacíos y resistencia de la mezcla [2].

2. Réplica y potencia estadística para evitar inferencias frágiles.

Ampliar el programa experimental incorporando al menos tres réplicas por cada combinación de contenido de asfalto y contenido de PVC. Esto permitirá realizar comparaciones estadísticas más sólidas entre dosificaciones, estimar la

dispersión real de los resultados y reducir la incertidumbre asociada a variaciones de compactación, heterogeneidad granulométrica o diferencias propias del ensayo Marshall. Con un diseño replicado será posible reportar medias, desviaciones estándar, coeficientes de variación, intervalos de confianza y pruebas inferenciales apropiadas, fortaleciendo la validez de las conclusiones [2], [4].

3. Control de forma, tamaño y condición superficial del PVC (calidad del “agregado polimérico”).

Se recomienda estandarizar el PVC usado como agregado mediante: clasificación granulométrica específica del plástico, control de forma (partícula angular vs. laminar), limpieza y condición superficial. En mezclas modificadas con polímeros, la interacción con el ligante y el esqueleto granular depende de la morfología y del grado de compatibilidad; por ello, sin control del PVC el desempeño puede degradarse, aunque se cumpla estabilidad mínima. Además, se sugiere registrar el tipo de PVC (origen, aditivos, rigidez) por su impacto en comportamiento térmico y mecánico [5]–[7], [9].

4. Evaluaciones de desempeño complementarias para tránsito pesado (más allá de “estabilidad mínima”).

Para sustentar una sólida aplicabilidad en tránsito pesado, se recomienda complementar Marshall con ensayos orientados a desempeño y durabilidad: susceptibilidad a humedad (pérdida de adhesión), evaluación de deformación permanente (rutting) y, si es posible, fatiga. La evidencia comparativa Marshall–Superpave sugiere que el cumplimiento de un único parámetro no debe ser la base exclusiva para calificar mezclas modificadas si el objetivo es desempeño en servicio [2], [10].

5. Comparación con otros plásticos y criterios de selección del polímero.

Se recomienda evaluar otros polímeros/plásticos de uso común en residuos (p. ej., PET u otros), estableciendo criterios de selección por propiedades (densidad, punto de ablandamiento, comportamiento térmico y compatibilidad con ligantes). La literatura sobre mezclas modificadas reporta resultados heterogéneos según tipo de polímero y mecanismo de incorporación; por tanto, una comparación controlada permitiría identificar el “mejor candidato” para el contexto local, en función de desempeño y disponibilidad [5], [8], [11].

6. Explorar el PVC como modificador del ligante (aditivo) y no solo como sustituto de agregado.

Dado que en el estudio el PVC se empleó como agregado, se recomienda explorar un segundo enfoque: uso del PVC como aditivo/modificador del ligante, evaluando si mejora la interacción ligante–agregado y la resistencia sin comprometer el esqueleto granular. Este enfoque debe acompañarse de ajustes de contenido de asfalto y control térmico de mezclado/compactación para evitar degradación del polímero y asegurar homogeneidad [5]–[7], [9].

7. Pilotaje en campo y trazabilidad de costos/beneficios bajo condiciones hondureñas.

Finalmente, se recomienda ejecutar un tramo piloto (escala demostrativa) con control de planta y compactación, monitoreando desempeño temprano (deformación, fisuración, textura y drenaje). En paralelo, incorporar una evaluación costo–beneficio que incluya disponibilidad del residuo, costos de preparación del PVC (triturado/clasificación) y potencial reducción de impactos ambientales, de modo que la adopción no se sustente solo en laboratorio sino en viabilidad integral [1], [11].

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Los autores agradecen profundamente a la Universidad Tecnológica Centroamericana (UNITEC), especialmente a la Facultad de Ingeniería, a través de la carrera de Ingeniería Civil, por el apoyo académico y técnico brindado para el desarrollo del estudio experimental.

Asimismo, se reconoce el valioso acompañamiento del Ing. Juan Carlos Reyes Zúñiga (Jefe Técnico del Laboratorio de Ingeniería Civil), y naturalmente, el apoyo de todos los docentes y colaboradores que contribuyeron en la preparación de materiales, fabricación de briquetas y ejecución de los ensayos Marshall utilizados como base de esta investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. Girón Pineda, “Honduras: 77% de la infraestructura vial no está pavimentada,” *El Heraldo*, Feb. 10, 2022. [Online]. Available: <https://www.elheraldo.hn/elheraldoplus/investigaciones/honduras-77-de-la-infraestructura-vial-no-esta-pavimentada-BI5648300>. [Accessed: Jan. 27, 2026].
- [2] Asphalt Institute, *MS-2 Asphalt Mix Design Methods*, 7th ed. Lexington, KY, USA: Asphalt Institute, 2015.
- [3] ASTM International, *ASTM D6926-20, Standard Practice for Preparation of Asphalt Mixture Specimens Using Marshall Apparatus*. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2020.
- [4] ASTM International, *ASTM D6927-15, Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures*. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2015.
- [5] A. Vargas Nordebeck, J. P. Aguiar Moya, and L. G. Loria Salazar, *Evaluación del desempeño de mezclas asfálticas en caliente con y sin la adición de polímeros modificantes para mezclas típicas en Costa Rica*, Rep. LM-PI-UMP-020-R1. San José, Costa Rica: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica, 2013.
- [6] N. Cruz Cajina, E. Camacho Garita, A. Baldi, and J. P. Aguiar Moya, “Evaluación de desempeño de la mezcla asfáltica modificada con residuos de PVC tipo blister,” *Infraestructura Vial*, vol. 23, no. 42, pp. 13–22, 2021, doi: 10.15517/iv.v23i42.44688.
- [7] H. A. Rondón Quintana, E. Rodríguez Rincón, and L. Á. Moreno Anselmi, “Resistencia mecánica evaluada en el ensayo Marshall de mezclas densas en caliente elaboradas con asfaltos modificados con desechos de policloruro de vinilo (PVC), polietileno de alta densidad (PEAD) y poliestireno (PS),” *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, vol. 6, no. 11, pp. 91–104, 2007.
- [8] F. A. Reyes Lizcano, M. F. Madrid Ahumada, and S. X. Salas Callejas, “Mezclas asfálticas modificadas con un elastómero (caucho) y un plastómero (tiras de bolsas de leche con asfalto 80-100),” *Infraestructura Vial*, vol. 9, no. 17, pp. 25–34, 2007.
- [9] J. E. Forigua Orjuela and E. Pedraza Díaz, *Diseño de mezclas asfálticas modificadas mediante la adición de desperdicios plásticos*, Trabajo de grado, Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia, 2014.
- [10] P. Garnica Anguas, H. Delgado Alamilla, and C. D. Sandoval Sandoval, *Análisis comparativo de los métodos Marshall y Superpave para compactación de mezclas asfálticas*, Publicación Técnica No. 271. Sanfandila, Querétaro, México: Instituto Mexicano del Transporte, 2005.
- [11] I. M. Khan, S. Kabir, M. A. Alhussain, and F. F. Almansoor, “Asphalt design using recycled plastic and crumb-rubber waste for sustainable pavement construction,” *Procedia Engineering*, vol. 145, pp. 1557–1564, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.04.196.
- [12] UNITEC, *Manual de laboratorio: Laboratorio de vías de comunicación*. Tegucigalpa, Honduras: Universidad Tecnológica Centroamericana, 2019.