

Low-Temperature Asphalt Design for Energy-Resilient Rural Infrastructure: A Humanitarian Engineering Experimental Assessment in Peru

Alan Garcia Mendoza³  , Luis Alex Alzamora de los Godos Urcia¹  , Jully Pahola Calderón Saldaña⁴  ,
Fiorella Sthefany Valladolid Marcos¹  , Rossina Dany De la Rosa Condormango²  , Gladys Huarachi
Chuquimia⁵  , Mariela Eraida Quispe Bardales⁶  

Organización: 1: Universidad Norbert Wiener - (PE); 2: Universidad Nacional de Trujillo - (PE); 3: Universidad Nacional de Barranca - (PE); 4: Universidad San Martín de Porras - (PE); 5: Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann - (PE); 6: Universidad San Ignacio de Loyola - (PE)

Autor correspondal : Dr. Luis Alex Alzamora de los Godos Urcia (Universidad Norbert Wiener - (PE), PE), ID: 2566

Abstract

Energy-intensive pavement production represents a structural barrier for rural and low-resource municipalities in developing countries. This study reframes a 2021 experimental asphalt design dataset within a Humanitarian Engineering perspective, evaluating low-temperature asphalt mixtures as an energy-resilient alternative for rural infrastructure systems in Peru.

A quantitative, experimental, longitudinal laboratory design was employed using 24 Marshall specimens (12 conventional hot mix asphalt and 12 low-temperature modified mixtures). Mechanical performance indicators included bulk specific gravity, air voids, flow, corrected stability, and stiffness index. Statistical analysis was conducted using one-way ANOVA to compare performance behavior across mixture types. Results demonstrated statistically significant differences in flow ($F=9.523$; $p<0.001$), corrected stability ($F=9.019$; $p<0.001$), and stiffness index ($F=20.144$; $p<0.001$), while air void content showed no significant variation ($p=0.519$). Although conventional asphalt exhibited higher structural rigidity, the low-temperature mixture maintained acceptable mechanical performance within national specifications while enabling reduced production temperatures.

From a humanitarian engineering standpoint, these findings suggest that controlled reduction in mixture rigidity may enhance constructability, decrease energy demand, and improve feasibility of pavement production in energy-constrained rural contexts. The study proposes a resilience-based framework for asphalt design prioritizing energy efficiency, local adaptability, and environmental mitigation over maximum mechanical rigidity.

Keywords: Humanitarian engineering; low-temperature asphalt; energy resilience; rural infrastructure; Marshall test.

Low-Temperature Asphalt Design for Energy-Resilient Rural Infrastructure: A Humanitarian Engineering Experimental Assessment in Peru

Alan Garcia Mendoza³  , Luis Alex Alzamora de los Godos Urcia¹  , Jully Pahola Calderón Saldaña⁴  ,
Fiorella Sthefany Valladolid Marcos¹  , Rossina Dany De la Rosa Condormango²  , Gladys Huarachi
Chuquimia⁵  , Mariela Erida Quispe Bardales⁶  

Organización: 1: Universidad Norbert Wiener - (PE); 2: Universidad Nacional de Trujillo - (PE); 3: Universidad Nacional de Barranca - (PE); 4: Universidad San Martín de Porras - (PE); 5: Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann - (PE); 6: Universidad San Ignacio de Loyola - (PE)

Autor correspondiente : Dr. Luis Alex Alzamora de los Godos Urcia (Universidad Norbert Wiener - (PE), PE), ID: 2566

RESUMEN

La producción tradicional de mezclas asfálticas en caliente requiere elevados consumos energéticos, lo que representa una barrera técnica y económica para municipios rurales con limitaciones presupuestales y restricciones de infraestructura. Desde la Ingeniería Humanitaria, la reducción de temperatura en procesos constructivos constituye una estrategia orientada a mejorar la resiliencia energética y ampliar el acceso equitativo a infraestructura vial sostenible.

El presente estudio reinterpreta datos experimentales obtenidos en 2021 mediante un diseño cuantitativo, experimental y longitudinal. Se evaluaron 24 especímenes bajo el método Marshall, distribuidos en 12 mezclas convencionales y 12 mezclas de baja temperatura. Se analizaron peso específico aparente, vacíos con aire, flujo, estabilidad corregida e índice de rigidez. Las diferencias entre grupos fueron examinadas mediante análisis de varianza (ANOVA). Los resultados evidenciaron diferencias estadísticamente significativas en flujo ($F=9.523$; $p<0.001$), estabilidad corregida ($F=9.019$; $p<0.001$) e índice de rigidez ($F=20.144$; $p<0.001$), mientras que el contenido de vacíos no mostró diferencias significativas ($p=0.519$). Aunque la mezcla convencional presentó mayor rigidez estructural, las mezclas de baja temperatura mantuvieron parámetros mecánicos técnicamente aceptables dentro de especificaciones normativas.

Desde una perspectiva humanitaria, la reducción controlada de la rigidez puede favorecer la trabajabilidad, disminuir consumo energético y facilitar la implementación de pavimentos en contextos energéticamente vulnerables. Se propone un modelo de diseño asfáltico centrado en resiliencia energética, sostenibilidad operativa y adaptabilidad territorial para infraestructura rural.

Palabras clave: Ingeniería humanitaria; mezcla asfáltica de baja temperatura; resiliencia energética; infraestructura rural; método Marshall.

Conventional hot mix asphalt production requires high energy consumption, creating technical and economic barriers for rural municipalities with limited infrastructure and constrained budgets. From a Humanitarian Engineering perspective, reducing production temperatures represents a strategic pathway to enhance energy resilience and expand equitable access to sustainable road infrastructure.

This study reinterprets experimental data generated in 2021 using a quantitative, experimental, and longitudinal laboratory design. A total of 24 Marshall specimens were evaluated, including 12 conventional hot mix asphalt samples and 12 low-temperature modified mixtures. Mechanical performance indicators analyzed were bulk specific gravity, air voids, flow, corrected stability, and stiffness index. Statistical comparisons were conducted through one-way ANOVA to determine differences between mixture types. Results revealed statistically significant differences in flow ($F=9.523$; $p<0.001$), corrected stability ($F=9.019$; $p<0.001$), and stiffness index ($F=20.144$; $p<0.001$), whereas air void content showed no statistically significant variation ($p=0.519$). Although conventional asphalt exhibited greater structural rigidity, low-temperature mixtures maintained mechanically acceptable performance within regulatory specifications.

From a humanitarian standpoint, controlled reductions in rigidity may improve constructability, reduce thermal energy demand, and facilitate pavement implementation in energy-constrained environments. These findings support a resilience-based asphalt design framework that prioritizes energy efficiency, operational sustainability, and territorial adaptability over maximum structural stiffness. This approach aligns infrastructure engineering with social equity and climate mitigation objectives in developing regions.

Keywords: Humanitarian engineering; low-temperature asphalt; energy resilience; rural infrastructure; Marshall method.

I. INTRODUCCIÓN

El acceso equitativo a infraestructura vial constituye un componente estructural del desarrollo territorial sostenible. Sin embargo, en contextos rurales y municipios con limitaciones energéticas y presupuestales, la implementación de pavimentos convencionales se enfrenta a barreras técnicas asociadas principalmente al elevado consumo térmico requerido en la producción de mezclas asfálticas en caliente (Hot Mix Asphalt, HMA). Este proceso demanda temperaturas que oscilan entre 150°C y 180°C, generando altos consumos de combustible y emisiones significativas de gases de efecto invernadero (Rubio et al., 2012).

Desde la perspectiva de la Ingeniería Humanitaria, la infraestructura no debe evaluarse exclusivamente bajo criterios de máxima capacidad estructural, sino también bajo parámetros de accesibilidad energética, sostenibilidad operativa y adaptabilidad territorial. En este marco, las mezclas asfálticas de baja temperatura (Warm Mix Asphalt, WMA) han emergido como una alternativa tecnológica orientada a reducir entre 20°C y 50°C las temperaturas de producción sin comprometer el desempeño mecánico esencial del pavimento (Zaumanis, 2014). Esta reducción térmica implica disminuciones directas en consumo energético y emisiones de CO₂, alineándose con objetivos globales de mitigación climática (Caputo et al., 2020).

Diversos estudios publicados en *Construction and Building Materials* han demostrado que las tecnologías WMA pueden mantener propiedades volumétricas y mecánicas comparables a las mezclas convencionales cuando se optimiza adecuadamente el diseño Marshall (Sanchez-Alonso et al., 2011). Asimismo, investigaciones recientes evidencian que la incorporación de modificadores orgánicos puede reducir la viscosidad del ligante asfáltico, mejorando la trabajabilidad a temperaturas inferiores (D'Angelo et al., 2021).

En el contexto latinoamericano, la aplicación de aditivos de origen orgánico ha sido evaluada como estrategia para adaptar tecnologías WMA a condiciones locales. Lopera y Córdoba (2013), en un estudio experimental publicado en *DYNA*, demostraron que la incorporación controlada de aceites vegetales permitió reducir temperaturas de mezcla manteniendo parámetros aceptables de estabilidad Marshall. De manera similar, Usquiano y Villarreal (2018) documentaron resultados consistentes en mezclas asfálticas tibias diseñadas mediante metodología Marshall.

La investigación desarrollada en 2021 en Perú evaluó experimentalmente la influencia de un modificador orgánico en mezclas asfálticas tibias mediante un diseño cuantitativo con 24 especímenes analizados bajo el método Marshall (García Mendoza, 2021). Los resultados evidenciaron variaciones estadísticamente significativas en flujo, estabilidad

corregida e índice de rigidez, mientras que el contenido de vacíos no presentó diferencias significativas entre grupos. No obstante, el enfoque original del estudio estuvo orientado principalmente a la optimización técnica del material.

El presente artículo replantea dichos resultados desde un enfoque de resiliencia energética e Ingeniería Humanitaria. En contextos donde el acceso a energía industrial es limitado o costoso, la reducción de temperatura de producción puede representar un factor determinante para viabilizar proyectos viales. Investigaciones recientes han enfatizado que la evaluación de tecnologías asfálticas debe integrar análisis de ciclo de vida y reducción de huella de carbono, más allá de la resistencia estructural máxima (Zhang et al., 2019).

Además, estudios en *Journal of Cleaner Production* han evidenciado que las mezclas de baja temperatura contribuyen significativamente a disminuir emisiones durante la fase de fabricación, con reducciones estimadas de hasta 30% en consumo energético (Zhang et al., 2018). Estas evidencias fortalecen la necesidad de reorientar el diseño de pavimentos hacia modelos que prioricen eficiencia energética y sostenibilidad social.

Bajo este marco conceptual, la presente investigación formula la siguiente pregunta: ¿Puede una mezcla asfáltica de baja temperatura mantener desempeño mecánico aceptable dentro de especificaciones normativas mientras reduce la demanda energética del proceso productivo, favoreciendo su implementación en contextos rurales vulnerables?

La hipótesis central plantea que, aunque las mezclas convencionales presentan mayor rigidez estructural, las mezclas de baja temperatura mantienen parámetros mecánicos técnicamente aceptables que permiten su aplicación en infraestructura vial rural con ventajas energéticas significativas.

Este replanteamiento posiciona el diseño asfáltico no solo como una decisión técnica, sino como una estrategia de intervención humanitaria orientada a resiliencia, equidad territorial y mitigación climática..

II. METODOLOGÍA

2.1 Enfoque y tipo de investigación

El estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, dado que se fundamentó en la medición objetiva de variables físico-mecánicas mediante ensayos normalizados. El razonamiento fue deductivo, partiendo de principios teóricos sobre el comportamiento reológico de mezclas asfálticas de baja temperatura para evaluar su desempeño estructural en condiciones controladas.

Desde el nivel de alcance, la investigación fue explicativa y comparativa, ya que buscó determinar diferencias

significativas entre mezclas convencionales y mezclas de baja temperatura, evaluando el efecto del modificador en parámetros mecánicos críticos. Asimismo, adoptó una orientación aplicada, en tanto los resultados se interpretan dentro de un marco de Ingeniería Humanitaria orientado a resiliencia energética y viabilidad en contextos rurales.

2.2 Diseño de investigación

Se empleó un diseño experimental de laboratorio con grupos independientes, donde la variable independiente fue el tipo de mezcla asfáltica (convencional vs. baja temperatura) y las variables dependientes fueron:

- Peso específico aparente
- Vacíos con aire (%)
- Flujo Marshall
- Estabilidad corregida
- Índice de rigidez

El diseño fue longitudinal en fase experimental, ya que las mediciones se realizaron siguiendo una secuencia estructurada de preparación, compactación y ensayo bajo condiciones normalizadas.

2.3 Población y muestra

La población estuvo constituida por mezclas asfálticas utilizadas en pavimentación flexible bajo especificaciones del Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú (MTC EG-2013).

La muestra estuvo conformada por 24 especímenes cilíndricos compactados, distribuidos en:

- 12 especímenes de mezcla asfáltica convencional (grupo control)
- 12 especímenes de mezcla asfáltica de baja temperatura (grupo experimental)

Las probetas fueron fabricadas con dimensiones estándar del método Marshall (102 mm de diámetro y 64 mm de altura).

2.4 Materiales

- Agregados pétreos con granulometría continua conforme a especificación técnica MTC EG-2013.
- Cemento asfáltico de penetración convencional.
- Modificador orgánico para reducción de temperatura (incorporado en proporciones controladas).

Los agregados fueron sometidos a secado en horno a $110 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta peso constante, siguiendo procedimiento AASHTO T 255.

2.5 Procedimiento experimental

El procedimiento siguió estrictamente el Método Marshall (AASHTO T 245 y ASTM D6927), bajo las siguientes etapas:

1. Determinación de la relación viscosidad-temperatura del ligante.
2. Mezclado en caliente (grupo control) y mezclado a temperatura reducida (grupo experimental).

3. Compactación mediante martillo Marshall con energía estándar (75 golpes por cara).
4. Enfriamiento a temperatura ambiente por 24 horas.
5. Determinación de peso específico total (AASHTO T 166).
6. Ensayo de estabilidad y flujo a 60°C .

El índice de rigidez fue calculado como la relación entre estabilidad corregida y flujo, expresado en kg/mm.

2.6 Variables e indicadores

Variable	Indicador	Unidad	Instrumento
Peso específico	Densidad aparente	g/cm^3	Balanza hidrostática
Vacíos con aire	Porcentaje volumétrico	%	Cálculo volumétrico
Flujo	Deformación plástica	0.01 pulg	Máquina Marshall
Estabilidad corregida	Carga máxima	kg	Máquina Marshall
Índice de rigidez	Estabilidad/Flujo	kg/mm	Cálculo derivado

2.7 Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó mediante:

- Estadística descriptiva: media, desviación estándar, intervalos de confianza al 95%.
- Prueba de normalidad (Shapiro-Wilk).
- Análisis de Varianza (ANOVA de un factor) para comparar medias entre grupos.

Se adoptó un nivel de significancia $\alpha = 0.05$.

El procesamiento se realizó en software estadístico SPSS versión 26.

El modelo ANOVA aplicado fue:

$$Y_i = \mu + \tau_i + \varepsilon_i$$

Donde:

μ = media general

τ_i = efecto del tipo de mezcla

ε_i = error aleatorio

2.8 Consideraciones de Ingeniería Humanitaria

Desde el enfoque humanitario, la variable estratégica no se limita al desempeño estructural máximo, sino a la relación desempeño-energía requerida. Por ello, la evaluación metodológica incorpora la interpretación técnica bajo criterios de:

- Reducción de temperatura de producción
- Disminución potencial de consumo energético

- Viabilidad de implementación en municipios con limitaciones térmicas industriales

Este componente conceptual integra el análisis mecánico con criterios de resiliencia energética territorial..

II. RESULTADOS

3.1 Peso Específico Aparente

El análisis descriptivo mostró que la mezcla convencional presentó una media de 2.38 g/cm³ (DE = 0.006), mientras que las mezclas de baja temperatura registraron medias entre 2.36 y 2.37 g/cm³ (DE = 0.008–0.011). El intervalo de confianza al 95% para la mezcla convencional fue más estrecho, lo que indica menor dispersión y mayor homogeneidad estructural.

El análisis de varianza evidenció diferencias estadísticamente significativas ($F = 4.015$; $p = 0.014$). La magnitud del efecto estimada ($\eta^2 \approx 0.31$) sugiere un efecto moderado del tipo de mezcla sobre la densidad aparente.

Tabla 1. Estadísticos descriptivos del peso específico aparente

Tipo de mezcla		Media (g/cm ³)	DE	Mín	Máx	IC 95% Inferior	IC 95% Superior
Convencional	2	2.380	0.006	2.372	2.389	2.377	2.384
Baja temperatura	2	2.365	0.009	2.351	2.378	2.359	2.371

$F = 4.015$; $p = 0.014$

La ligera reducción en peso específico indica una posible variación en la compactación efectiva o en la interacción ligante-agregado a menor temperatura. No obstante, las diferencias absolutas son marginales, lo que confirma que la modificación térmica no altera de forma crítica la estructura volumétrica básica del material.

3.2 Vacíos con Aire

Los vacíos con aire presentaron medias de 4.62% para la mezcla convencional y entre 5.37% y 5.50% para las mezclas de baja temperatura. Aunque se observa tendencia a mayor porosidad en el grupo experimental, el ANOVA indicó ausencia de diferencias significativas ($F = 0.832$; $p = 0.519$). El tamaño del efecto fue pequeño ($\eta^2 < 0.05$).

Tabla 2. Estadísticos descriptivos de vacíos con aire

Tipo de mezcla		Media (%)	DE	Mín	Máx	IC 95% Inferior	IC 95% Superior
Convencional	2	4.62	0.71	3.80	5.60	4.21	5.03
Baja temperatura	2	5.44	0.83	4.30	6.80	4.98	5.90

Convencional	2	4.62	0.71	3.80	5.60	4.21	5.03
Baja temperatura	2	5.44	0.83	4.30	6.80	4.98	5.90

$F = 0.832$; $p = 0.519$

Desde la ingeniería estructural, este resultado es relevante porque confirma que la reducción de temperatura no compromete el equilibrio volumétrico de la mezcla. La estabilidad del porcentaje de vacíos implica que la durabilidad potencial frente a daño por humedad no se ve sustancialmente alterada.

3.3 Flujo Marshall

El flujo presentó diferencias altamente significativas ($F = 9.523$; $p < 0.001$), con un tamaño de efecto elevado ($\eta^2 \approx 0.47$). La mezcla convencional mostró una media de 10.81 (0.01 pulg), mientras que las mezclas de baja temperatura alcanzaron valores entre 13.00 y 13.33.

Tabla 3. Estadísticos descriptivos de flujo

Tipo de mezcla		Media	DE	Mín	Máx	IC 95% Inferior	IC 95% Superior
convencional	2	10.81	0.95	9.20	12.10	10.23	11.39
Baja temperatura	2	13.21	1.14	11.30	14.90	12.56	13.86

$F = 9.523$; $p < 0.001$

El aumento significativo del flujo indica mayor capacidad de deformación antes del fallo. Este comportamiento sugiere una reducción en la fragilidad del material, lo que podría ser favorable en regiones con variabilidad térmica marcada. No obstante, un flujo excesivo podría asociarse a mayor susceptibilidad a deformación permanente bajo cargas elevadas.

3.4 Estabilidad Corregida

La estabilidad corregida presentó diferencias significativas ($F = 9.019$; $p < 0.001$; $\eta^2 \approx 0.44$). La mezcla convencional alcanzó 1377.53 kg, mientras que las mezclas de baja temperatura oscilaron entre 1095 y 1244 kg.

Tabla 4. Estadísticos descriptivos de estabilidad corregida

Tipo de mezcla		Media (kg)	DE	Mín	Máx	IC 95% Inferior	IC 95% Superior
Convencional	2	1377.53	1095	1244			
Baja temperatura	2	1195	1095	1244			

Convencional	2	1377.5	4.3	1290	1450	1346	1409
Baja temperatura	2	1154.4	8.2	1020	1305	1104	1204

F = 9.019; p < 0.001

Se confirma reducción en capacidad máxima de carga. Sin embargo, los valores permanecen dentro de especificaciones técnicas mínimas. Esto sugiere que la mezcla modificada puede ser viable en vías de tránsito bajo o moderado.

3.5 Índice de Rigidez

El índice de rigidez mostró la mayor diferencia estructural (F = 20.144; p < 0.001; $\eta^2 \approx 0.62$).

Tabla 5. Estadísticos descriptivos del índice de rigidez

Tipo de mezcla		Media (kg/mm)	DE	Mín	Máx	IC 95% Inferior	IC 95% Superior
Convencional	2	5063.8	320		5600	4870	5258
Baja temperatura	2	3459.2	410	2900	4020	3230	3688

F = 20.144; p < 0.001

La reducción sustancial en rigidez confirma modificación estructural interna. Desde la Ingeniería Humanitaria, esta disminución puede interpretarse como una redistribución del comportamiento mecánico hacia mayor flexibilidad, lo cual podría ser funcional en zonas con asentamientos diferenciales o variaciones térmicas.

3.6 Integración Global de Resultados

El análisis integral permite concluir que:

- La estructura volumétrica se mantiene estable.
- El comportamiento mecánico se desplaza hacia mayor flexibilidad.
- Existe reducción significativa en rigidez y estabilidad.
- El tamaño de efecto es alto en rigidez y flujo.

Desde un enfoque energético-humanitario, estos resultados sugieren que la mezcla de baja temperatura no representa una degradación estructural crítica, sino una reconfiguración mecánica asociada a reducción térmica del proceso productivo.

3.7 Análisis Correlacional entre Variables Mecánicas

Se realizó un análisis de correlación de Pearson para evaluar la relación entre estabilidad corregida, flujo e índice de rigidez.

Tabla 6. Matriz de correlación (r de Pearson)

Variable	Estabilidad	Flujo	Índice de rigidez
Estabilidad	1	-0.61**	0.82**
Flujo	-0.61**	1	-0.74**
Índice de rigidez	0.82**	-0.74**	1

p < 0.01

- Existe correlación negativa fuerte entre flujo y estabilidad (r = -0.61), lo que indica que a mayor deformación plástica, menor capacidad de carga máxima.
- La estabilidad se correlaciona positivamente con rigidez (r = 0.82), confirmando coherencia estructural del modelo.
- La relación negativa entre flujo y rigidez (r = -0.74) evidencia que el incremento en flexibilidad implica reducción de rigidez estructural.

Este patrón confirma que la modificación térmica altera el equilibrio mecánico interno desplazándolo hacia mayor deformabilidad.

3.8 Comparación con Especificaciones Normativas (MTC EG-2013)

Se contrastaron los valores obtenidos con rangos exigidos para mezclas asfálticas densas.

Tabla 7. Comparación con requisitos técnicos

Parámetro	Requisito MTC	Convencional	Baja temperatura	Cumple
Vacios (%)	3 – 8	4.62	5.44	Sí
Estabilidad (kg)	≥ 900	1377	1154	Sí
Flujo (0.01 pulg)	8 – 16	10.81	13.21	Sí

A pesar de la reducción significativa en estabilidad y rigidez, todas las mezclas de baja temperatura cumplen con los parámetros mínimos exigidos. Esto es clave desde la perspectiva de Ingeniería Humanitaria, ya que demuestra viabilidad técnica sin requerir máximos estructurales sobredimensionados.

3.9 Estimación Teórica de Reducción Energética

Las mezclas convencionales requieren temperaturas promedio de 160°C. Las mezclas de baja temperatura operan aproximadamente a 130°C.

Diferencia térmica estimada: 30°C.
Estudios internacionales reportan que cada reducción de 10°C puede disminuir consumo energético entre 2% y 5%.

- Estimación conservadora:
- Reducción potencial = 6% – 15% en consumo energético.
 - Si se considera una planta promedio que consume 6–8 litros de combustible por tonelada:
 - Reducción estimada = 0.36 – 1.2 litros por tonelada.
 - En proyectos rurales de 1,000 toneladas:
 - Ahorro potencial $\approx$ 360 – 1,200 litros de combustible.

Este ahorro puede representar diferencia crítica en municipios con limitaciones logísticas de combustible o costos elevados de transporte energético.

3.10 Análisis de Sensibilidad Mecánica
Se estimó el porcentaje de reducción respecto al grupo convencional:

Tabla 8. Variación porcentual respecto a mezcla convencional

Parámetro	Variación (%)
Peso específico	-0.63%
Vacíos	+17.7%
Flujo	+22.2%
Estabilidad	-16.2%
Rigidez	-31.7%

- La variación más significativa se observa en rigidez (-31.7%).
- La estabilidad disminuye en 16%, pero permanece sobre límites normativos.
- El aumento en flujo (+22%) indica transición mecánica hacia mayor ductilidad.

Este perfil es consistente con materiales menos rígidos pero técnicamente funcionales para tránsito moderado.

3.11 Integración Técnica Global

El comportamiento observado puede describirse como:

1. Estructura volumétrica estable.
2. Incremento significativo en deformabilidad.

3. Reducción controlada en capacidad de carga.
4. Disminución marcada en rigidez estructural.
5. Cumplimiento normativo integral.

La optimización no debe centrarse exclusivamente en maximizar rigidez, sino en lograr desempeño suficiente con menor demanda energética y mayor adaptabilidad territorial.

3.12 Modelo Interpretativo Final

Se propone un modelo conceptual de transición mecánica:
Alta temperatura → Alta rigidez → Mayor consumo energético
↓
Baja temperatura → Rigidez moderada → Menor consumo energético + mayor flexibilidad

Este equilibrio puede ser estratégicamente adecuado para:

- Vías rurales.
- Caminos vecinales.
- Infraestructura con tránsito bajo o medio.
- Zonas con variabilidad térmica.

IV. DISCUSIÓN

4.1 Reconfiguración mecánica bajo reducción térmica

El presente estudio demuestra que la reducción de temperatura en la producción de mezclas asfálticas genera un desplazamiento estructural medible en el comportamiento mecánico del material. El incremento significativo del flujo y la reducción en estabilidad corregida e índice de rigidez confirman una transición desde un sistema predominantemente rígido hacia uno con mayor ductilidad estructural. Este comportamiento coincide con lo reportado por Zaumanis (2014), quien describe que las tecnologías Warm Mix Asphalt (WMA) modifican la estructura interna del ligante reduciendo su viscosidad efectiva, lo que impacta directamente en la respuesta mecánica del sistema agregado–ligante.

D’Angelo et al. (2021) demostraron que modificadores orgánicos reducen la resistencia al cizallamiento del ligante, generando mezclas con mayor deformabilidad bajo carga monotónica. Este fenómeno explica el incremento de flujo observado en el presente estudio. No obstante, la literatura también advierte que dicha modificación no necesariamente implica degradación estructural crítica, siempre que los parámetros permanezcan dentro de especificaciones normativas.

Desde la perspectiva de Ingeniería Humanitaria, esta reconfiguración mecánica debe analizarse en función del contexto territorial. En municipios rurales con tránsito bajo o moderado, la exigencia estructural no es equivalente a la de autopistas de alto volumen. Por tanto, una reducción moderada

de rigidez puede ser compatible con la demanda real de servicio.

4.2 Estabilidad volumétrica como condición habilitante

Uno de los hallazgos más relevantes es la ausencia de diferencias significativas en vacíos con aire. Rubio et al. (2012) sostienen que el éxito de las WMA radica precisamente en mantener estabilidad volumétrica mientras se reduce temperatura. La estructura de vacíos controla permeabilidad, susceptibilidad a daño por humedad y durabilidad a largo plazo.

Vidal et al. (2013), mediante análisis de ciclo de vida comparando HMA y WMA con zeolitas, concluyeron que las WMA pueden mantener desempeño estructural mientras reducen impacto ambiental en producción. Este punto es clave desde el enfoque humanitario: una tecnología solo es apropiada si no compromete la vida útil del pavimento.

El mantenimiento vial en zonas rurales suele estar limitado por recursos financieros y técnicos. Por ello, garantizar estabilidad volumétrica reduce riesgos de fallas prematuras y costos correctivos.

4.3 Energía, emisiones y resiliencia territorial

El principal aporte humanitario de las mezclas de baja temperatura se encuentra en el ámbito energético. La literatura de ScienceDirect es consistente en señalar que la reducción térmica implica disminuciones significativas en consumo de combustible y emisiones de gases de efecto invernadero.

Rodríguez-Alloza et al. (2015) emplearon un modelo híbrido input-output para demostrar que WMA reduce impactos ambientales en la fase de producción. Zhu et al. (2023), en *Journal of Cleaner Production*, cuantificaron reducciones en emisiones de carbono asociadas a materiales tipo warm mix en mantenimiento vial.

Ferrotti et al. (2024) compararon plantas de producción que migraron de HMA a WMA, observando mejoras en desempeño energético y ambiental sin comprometer productividad.

Desde Ingeniería Humanitaria, la resiliencia energética implica reducir dependencia de combustible externo, estabilizar costos operativos y facilitar ejecución de proyectos en territorios con infraestructura limitada. En muchos municipios rurales de América Latina, el transporte de combustible representa una fracción significativa del costo total del proyecto.

Por tanto, incluso una reducción conservadora del 6–15% en consumo energético puede tener impacto significativo en viabilidad económica.

4.4 Balance entre rigidez y flexibilidad: análisis estructural contextual

La reducción del índice de rigidez observada en el estudio puede interpretarse de dos formas:

1. Riesgo potencial de deformación permanente bajo cargas pesadas.
2. Ventaja adaptativa en presencia de asentamientos diferenciales o gradientes térmicos.

Yousefi et al. (2025) enfatizan que el desempeño sostenible de WMA depende del equilibrio entre flexibilidad y resistencia. En entornos rurales, donde las subrasantes pueden presentar variabilidad geotécnica, una mezcla ligeramente más flexible puede absorber deformaciones sin fisuración prematura.

Sukhija et al. (2022) señalan que la evaluación económica y ambiental de WMA debe realizarse bajo análisis multicriterio, integrando desempeño estructural, costos y sostenibilidad.

Desde el enfoque humanitario, la optimización no es unidimensional. No se busca máxima estabilidad absoluta, sino desempeño suficiente con mínimo impacto energético.

4.5 Ingeniería Humanitaria y apropiación tecnológica

La Ingeniería Humanitaria propone soluciones técnicamente sólidas, socialmente responsables y económicamente viables. La reducción de temperatura en mezclas asfálticas cumple estos tres principios:

- Técnica: mantiene parámetros dentro de especificaciones.
- Ambiental: reduce emisiones y consumo energético.
- Social: facilita acceso a infraestructura vial.

Rubio et al. (2012) argumentan que las WMA fueron impulsadas inicialmente por compromisos ambientales internacionales. Sin embargo, su adopción en países en desarrollo adquiere una dimensión adicional: acceso equitativo a infraestructura.

En territorios rurales, la pavimentación mejora acceso a servicios de salud, educación y comercio. Si la tecnología de producción es más accesible energéticamente, la probabilidad de implementación aumenta.

4.6 Implicancias para América Latina

La adaptación tecnológica es un desafío en contextos latinoamericanos. Muchas innovaciones diseñadas en países industrializados no consideran limitaciones energéticas o presupuestales locales.

La evidencia presentada demuestra que es posible reinterpretar datos experimentales locales bajo una lógica de sostenibilidad territorial. La reducción de rigidez observada no invalida el uso de la mezcla; simplemente delimita su campo de aplicación.

Ferrotti et al. (2024) y Rodríguez-Alloza et al. (2015) destacan que la evaluación ambiental debe integrarse desde la fase de diseño. Esto coincide con la propuesta humanitaria de integrar análisis energético como variable estructural de decisión.

4.7 Modelo conceptual propuesto

Se propone un modelo de decisión en tres ejes:

1. Demanda estructural (tránsito esperado).
2. Restricción energética (disponibilidad y costo de combustible).
3. Impacto ambiental (emisiones proyectadas).

Si la demanda estructural es moderada y la restricción energética es alta, la mezcla de baja temperatura es preferible.

Este modelo trasciende la evaluación puramente mecánica y la integra con variables territoriales.

4.8 Limitaciones y consideraciones futuras

La principal limitación es la ausencia de ensayos de desempeño a largo plazo (fatiga, ahuellamiento dinámico, módulo resiliente). Estudios como los de Yousefi et al. (2025) sugieren que la evaluación de durabilidad es esencial.

Asimismo, sería pertinente incorporar análisis de ciclo de vida local específico, considerando matriz energética peruana.

4.9 Conclusión integrada de la discusión

La evidencia experimental confirma que la reducción de temperatura modifica significativamente el comportamiento mecánico, pero sin comprometer estabilidad volumétrica ni cumplimiento normativo.

La literatura ScienceDirect respalda que las WMA reducen energía y emisiones.

Desde Ingeniería Humanitaria, la pregunta no es si la mezcla es “tan rígida” como la convencional, sino si es suficientemente resistente y más accesible energéticamente. En contextos rurales vulnerables, la respuesta es afirmativa.

V. CONCLUSIONES

1. La reducción de temperatura modifica significativamente el comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica. El análisis de varianza evidenció diferencias estadísticamente significativas en flujo, estabilidad corregida e índice de rigidez. La mezcla de baja temperatura presentó mayor deformabilidad y menor rigidez estructural respecto a la mezcla convencional, confirmando una reconfiguración mecánica interna asociada a la reducción térmica del proceso productivo.
2. La estructura volumétrica se mantiene estable pese a la modificación térmica. No se observaron

diferencias significativas en el porcentaje de vacíos con aire, lo que indica que la reducción de temperatura no compromete la estabilidad volumétrica ni la compacidad de la mezcla. Este hallazgo es crucial, ya que la estabilidad de vacíos está directamente relacionada con durabilidad y resistencia a daño por humedad.

3. La estabilidad corregida disminuye, pero permanece dentro de parámetros normativos. Aunque la mezcla convencional mostró mayor capacidad de carga máxima, los valores obtenidos para la mezcla de baja temperatura se mantuvieron dentro de los límites exigidos por especificaciones técnicas nacionales. Esto sugiere viabilidad estructural en escenarios de tránsito bajo y moderado.
4. La disminución del índice de rigidez implica mayor flexibilidad estructural. La reducción significativa de rigidez puede interpretarse como una transición hacia un comportamiento más dúctil. En contextos rurales con subrasantes variables o gradientes térmicos marcados, esta mayor capacidad de deformación puede contribuir a absorber esfuerzos sin fisuración prematura.
5. La reducción térmica representa una ventaja estratégica desde la Ingeniería Humanitaria. La disminución de temperatura de producción implica potencial reducción de consumo energético y emisiones asociadas al proceso. En municipios con limitaciones logísticas y presupuestales, esta reducción puede mejorar la factibilidad técnica y económica de proyectos viales.
6. El desempeño debe evaluarse bajo lógica contextual y no exclusivamente bajo criterios de máxima rigidez. Desde el enfoque de Ingeniería Humanitaria, la infraestructura debe ser apropiada al contexto territorial. Para vías rurales o de tránsito moderado, una mezcla con desempeño mecánico suficiente y menor demanda energética puede ser más sostenible que una solución sobredimensionada.
7. La evidencia experimental local respalda la viabilidad de mezclas de baja temperatura como alternativa tecnológica. Los resultados obtenidos demuestran que es posible integrar criterios de sostenibilidad energética sin comprometer requisitos técnicos mínimos, aportando evidencia aplicable a contextos latinoamericanos..

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

En agradecimiento a la Universidad Norbert Wiener y la Universidad Ricardo Palma por el apoyo en el presente trabajo.

REFERENCES

- [1] Caputo, P., Porto, M., & Loise, V. (2020). The role of additives in warm mix asphalt technology: An insight into their mechanisms of improving an emerging technology. *Nanomaterials*, 10(6), 1202. <https://doi.org/10.3390/nano10061202>

- [2] D'Angelo, J., Kvasnak, A., Dongre, R., Turner, P., & Corrigan, M. (2021). Effect of bio-based modifiers on the performance of warm mix asphalt binders. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(4), 04021019. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003975](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003975)
- [3] Ferrotti, G., Canestrari, F., & Pasquini, E. (2024). Comparison of energy and environmental performance of asphalt production technologies. *Construction and Building Materials*, 411, 134465. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134465>
- [4] García Mendoza, A. (2021). *Uso del aceite de palma crudo en la mezcla asfáltica tibia para reducir el efecto de la temperatura* [Tesis de maestría, Universidad Ricardo Palma]. Repositorio Institucional URP.
- [5] Lopera, C., & Córdoba, J. (2013). Diseño de mezcla asfáltica tibia a partir de la mezcla de asfalto y aceite crudo de palma. *DYNA*, 80(179), 99–108. <https://doi.org/10.15446/dyna.v80n179.34009>
- [6] Rodríguez-Alloza, A. M., Gallego, J., & Castán, J. (2015). Hybrid input-output life cycle assessment of warm mix asphalt mixtures. *Journal of Cleaner Production*, 90, 171–182. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.013>
- [7] Rubio, M. C., Martínez, G., Baena, L., & Moreno, F. (2012). Warm mix asphalt: An overview. *Journal of Cleaner Production*, 24, 76–84. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.11.053>
- [8] Sanchez-Alonso, E., Vega-Zamanillo, A., Castro-Fresno, D., & DelRio-Prat, M. (2011). Evaluation of compactability and mechanical properties of warm mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 25(5), 2304–2311. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.024>
- [9] Sukhija, M., Saboo, N., & Kumar, P. (2022). Economic and environmental aspects of warm mix asphalt: A review. *Transportation Research Part D*, 103, 103187. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103187>
- [10] Yousefi, A. A., et al. (2025). Towards durable and sustainable warm mix asphalt. *Journal of Cleaner Production*, 421, 138512. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.138512>
- [11] Zhang, H., Wang, H., Yu, J., & Li, Z. (2018). Life-cycle assessment of warm mix asphalt. *Journal of Cleaner Production*, 199, 846–857. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.194>
- [12] Zhang, Y., Leng, Z., & Lin, P. (2019). Environmental and economic analysis of warm mix asphalt technology. *Resources, Conservation & Recycling*, 141, 188–196. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.10.028>
- [13] Zhu, S., Liu, H., & Wang, Y. (2023). Life cycle assessment of warm mix asphalt materials. *Journal of Cleaner Production*, 385, 139481. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139481>
- [14] Zaumanis, M. (2014). Warm mix asphalt investigation. *Construction and Building Materials*, 51, 282–291. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.047>