

Influence of scallop shell powder and steel powder on the mechanical and structural performance of asphalt mixtures: experimental study and FEM modeling

Espinoza Huamán, Esther¹ 

¹Universidad Privada del Norte, Perú, N00239873@upn.pe

Abstract *This research evaluated the influence of scallop shell powder (passing #100 mesh) and steel powder (passing #200 mesh) on the mechanical and structural performance of hot mix asphalt, using an integrated experimental-numerical approach. Four mix designs were created using the Marshall method (75 blows per face): a conventional mix (M0) and three modified mixes with 5%, 10%, and 15% combined substitution. The optimum asphalt content, stability, flow, volumetric parameters (VIM, VMA, VFA), moisture resistance (TSR), and dynamic modulus at 20 °C were determined. The results showed that the 10% dosage exhibited the best overall performance, achieving a Marshall stability of 10.42 kN, representing a 17% increase compared to the conventional mix. The TSR index increased to 89%, exceeding the MTC regulatory requirement ($\geq 80\%$), demonstrating improved binder-aggregate adhesion attributed to the calcitic nature of the shell dust. The dynamic modulus increased by approximately 14%, from 4500 MPa to 5150 MPa. Three-dimensional modeling using the finite element method allowed for the quantification of stress redistribution in the multilayer system. The optimal mix reduced surface deformation by approximately 15% and tensile stress at the base of the pavement by 16%, compared to the conventional mix. Under a 20% overload, structural amplification decreased from 38% to 25%, reducing sensitivity to vehicle overload. The results confirm that the controlled incorporation of scallop shell dust and steel powder simultaneously improves the mechanical stability, moisture resistance, and structural response of flexible pavement, constituting a technically viable alternative for conditions representative of Cajamarca, provided it remains within the optimal substitution range.*

Keywords— *Asphalt mixtures; scallop shell dust; steel powder; dynamic modulus; finite elements*

I. INTRODUCCIÓN

El desempeño estructural de los pavimentos flexibles depende de la interacción mecánica entre la estructura multicapa, las propiedades reológicas del ligante asfáltico y las características físico mecánicas de los agregados y fillers minerales. Desde el enfoque mecanístico empírico, la respuesta del pavimento se encuentra gobernada por la distribución tridimensional de esfuerzos inducidos por la carga vehicular, el módulo resiliente de las capas granulares y la rigidez dinámica de la mezcla asfáltica [1], [2]. La acumulación progresiva de deformaciones permanentes (rutting) y la fatiga por tracción en la fibra inferior de la carpeta constituyen los principales modos de falla estructural en mezclas asfálticas sometidas a tránsito pesado y variaciones térmicas significativas [3], [4].

En este contexto, la modificación de mezclas asfálticas mediante la incorporación de subproductos industriales y residuos minerales ha sido ampliamente investigada como estrategia para mejorar el desempeño mecánico y, simultáneamente, reducir el impacto ambiental asociado al consumo de agregados naturales [5], [6]. Estudios recientes han demostrado que la incorporación de fillers alternativos puede alterar favorablemente la rigidez inicial, el módulo dinámico y la resistencia al ahuellamiento, siempre que se garantice una adecuada compatibilidad físico química entre el ligante y el material fino [7], [8].

El uso de polvo de acero como filler mineral ha mostrado incrementos significativos en el módulo dinámico y en la estabilidad Marshall, atribuibles a su elevada densidad y rigidez intrínseca [9], [10]. Investigaciones experimentales reportan que la adición controlada de partículas metálicas finas puede incrementar la resistencia al ahuellamiento hasta en un 15 25 %, dependiendo del contenido volumétrico incorporado [11]. Sin embargo, también se advierte que contenidos excesivos pueden afectar la trabajabilidad y la compatibilidad de la mezcla [12].

Por otro lado, el empleo de residuos marinos, particularmente polvo de concha de moluscos ha sido evaluado como sustituto parcial de agregados finos o fillers debido a su composición predominantemente calcítica (CaCO_3) y a su elevada finura cuando pasa la malla #100 o #200 [13], [14]. Diversos estudios han evidenciado que la incorporación de polvo de concha mejora la adhesión ligante agregado, incrementando la resistencia a la humedad y la estabilidad volumétrica [15]. Asimismo, se ha reportado un aumento moderado en el módulo resiliente y en la resistencia indirecta a tracción (ITS) cuando el porcentaje de sustitución se mantiene dentro de rangos óptimos (5 15 %) [16].

Desde el punto de vista microestructural, la interacción entre partículas calcáreas finas y el ligante asfáltico genera una mayor superficie específica de contacto, lo que favorece la formación de una matriz mastic más rígida [17]. Este efecto se traduce en una redistribución de esfuerzos a nivel mesoestructural, reduciendo las concentraciones de deformación plástica en zonas críticas [18]. No obstante, la variabilidad granulométrica y la morfología angular del polvo de concha pueden influir en la viscosidad efectiva del mastic, afectando el comportamiento viscoelástico global de la mezcla [19].

La evaluación integral del desempeño mecánico requiere no solo ensayos experimentales —como estabilidad y flujo Marshall, módulo resiliente, módulo dinámico y resistencia a la tracción indirecta— sino también modelación numérica mediante el método de los elementos finitos (FEM), que permite estimar campos de esfuerzo, deformación y energía de disipación bajo condiciones reales de carga [20], [21]. La formulación FEM aplicada a pavimentos flexibles se fundamenta en la ecuación de equilibrio del continuo, la relación deformación desplazamiento y el modelo constitutivo viscoelástico o elastoplástico adoptado para la mezcla asfáltica [22].

Estudios recientes han demostrado que la simulación tridimensional de mezclas modificadas permite identificar variaciones en la rigidez efectiva y en la distribución de tensiones principales, proporcionando criterios objetivos para optimizar contenidos de sustitución [23], [24]. Asimismo, la calibración experimental numérica mejora la capacidad predictiva del modelo mecanístico empírico frente a condiciones de tránsito y temperatura variables [25].

En el ámbito latinoamericano, la incorporación de residuos industriales y marinos en pavimentos asfálticos se alinea con políticas de economía circular y sostenibilidad en infraestructura vial [26]. Sin embargo, aún existe limitada evidencia técnica sobre el comportamiento combinado de polvo de concha de abanico (malla #100) como sustituto parcial de arena y polvo de acero (malla #200) como filler alternativo, particularmente bajo un enfoque integrado experimental numérico.

La incorporación de materiales residuales finamente pulverizados ha mostrado efectos significativos en el módulo dinámico $[E^*]$, en la estabilidad Marshall y en la resistencia a la tracción indirecta (ITS), debido a modificaciones en la microestructura del mastic [5] [8]. Particular interés ha despertado el uso de partículas metálicas y residuos marinos por su elevada rigidez y composición calcárea, respectivamente [9] [16]. Sin embargo, la evidencia combinada de polvo de concha de abanico (malla #100) y polvo de acero (malla #200) bajo un enfoque experimental numérico sigue siendo limitada.

En relación con antecedentes específicos, Ameri et al. evaluaron el efecto del polvo de acero como filler alternativo en mezclas densas tipo AC-16, con un contenido de sustitución entre 5 % y 20 % respecto al filler convencional [9]. El objetivo del estudio fue cuantificar la variación en estabilidad Marshall y módulo resiliente. Los resultados evidenciaron un incremento del 18 % en estabilidad Marshall y un aumento del 12 % en módulo resiliente para una dosificación óptima de 10 %, mientras que contenidos superiores al 15 % generaron reducción en la trabajabilidad y aumento del flujo Marshall en aproximadamente 9 %.

Wu et al. analizaron la incorporación de partículas metálicas finas en proporciones de 6 %, 9 % y 12 % en volumen del mastic [10]. El objetivo consistió en evaluar el desempeño a alta temperatura mediante ensayo de rueda cargada (rutting test). Los resultados mostraron una reducción

del ahuellamiento permanente del orden de 21 % para el contenido de 9 %, acompañado de un incremento del módulo dinámico a 40 °C de aproximadamente 15 %. Sin embargo, el módulo complejo presentó mayor sensibilidad térmica a temperaturas superiores a 55 °C.

En el ámbito de residuos marinos, Yoon et al. estudiaron la sustitución parcial de filler calizo por polvo de concha de molusco en proporciones de 5 %, 10 % y 15 % [14]. El objetivo fue analizar cambios en estabilidad Marshall, ITS y resistencia a la humedad (TSR). Los resultados indicaron un incremento del 14 % en resistencia indirecta a tracción para el 10 % de sustitución y un valor TSR superior al 85 %, superando el umbral mínimo recomendado para mezclas convencionales. No obstante, al 15 % se observó ligera disminución del módulo resiliente (≈ 6 %).

Li et al. evaluaron el comportamiento mecánico de mezclas modificadas con polvo de concha finamente molido ($<75 \mu\text{m}$) [16]. El objetivo fue determinar la influencia en módulo dinámico y deformación permanente acumulada bajo carga repetida. Los resultados mostraron un incremento del módulo dinámico del 8-13 % en el rango de temperaturas entre 20 °C y 40 °C, así como reducción del 17 % en deformación permanente tras 10 000 ciclos de carga, cuando el contenido de sustitución fue del 12 %.

Adicionalmente, Shen et al. investigaron la interacción filler ligante mediante análisis reológico del mastic asfáltico [7]. El objetivo consistió en evaluar la variación del parámetro $G^*/\sin\delta$ bajo ensayo DSR. Los resultados indicaron que fillers con mayor superficie específica incrementaron la rigidez del mastic hasta en 25 %, mejorando la resistencia a la deformación permanente. Sin embargo, el incremento excesivo de partículas ultrafinas elevó la viscosidad del ligante modificado en aproximadamente 18 %, afectando la compactabilidad.

En estudios numéricos, Park et al. desarrollaron un modelo tridimensional FEM para analizar pavimentos modificados con materiales alternativos [23]. El objetivo fue estimar la redistribución de tensiones principales y deformaciones acumuladas. Los resultados evidenciaron que un incremento del 10 % en módulo dinámico de la carpeta redujo la deformación vertical máxima en la subrasante en aproximadamente 7 %, demostrando la sensibilidad estructural ante variaciones de rigidez de la mezcla.

Estos antecedentes evidencian que tanto el polvo de acero como el polvo de concha presentan potencial para mejorar propiedades mecánicas específicas; sin embargo, su comportamiento combinado y su efecto estructural integral requieren evaluación bajo parámetros experimentales controlados y modelación numérica calibrada. La presente investigación aborda esta brecha técnica, analizando la influencia simultánea de ambos materiales en la respuesta mecánica y estructural de mezclas asfálticas, integrando resultados de laboratorio y simulación FEM para cuantificar variaciones en estabilidad, módulo dinámico, deformación permanente y distribución de esfuerzos.

II. METODOLOGIA

A. Diseño experimental y variables de estudio

Se definieron cuatro configuraciones de mezcla:

- M0: Mezcla convencional (control).
- M1: 5 % de sustitución combinada.
- M2: 10 % de sustitución combinada.
- M3: 15 % de sustitución combinada.

La sustitución consistió en:

- Reemplazo parcial de arena natural por polvo de concha de abanico pasante malla #100.
- Reemplazo parcial de filler mineral convencional por polvo de acero pasante malla #200.

Las variables independientes fueron el porcentaje de sustitución y el tipo de filler. Las variables dependientes incluyeron estabilidad Marshall, flujo, parámetros volumétricos (VIM, VMA, VFA), módulo dinámico, resistencia a humedad (TSR) y parámetros estructurales derivados del modelo FEM (deformación superficial y esfuerzo crítico).

B. Caracterización de los materiales

1) Agregados

Los agregados gruesos y finos fueron caracterizados conforme a las Especificaciones Técnicas Generales del MTC (EG-2013), incluyendo:

- Granulometría (ASTM C136).
- Abrasión Los Ángeles (ASTM C131).
- Equivalente de arena (ASTM D2419).
- Índice de plasticidad (ASTM D4318).

El polvo de concha fue sometido a secado, trituration y tamizado hasta asegurar 100 % pasante malla #100. Se determinó su composición predominantemente calcítica (CaCO_3) y su peso específico.

El polvo de acero pasante malla #200 fue caracterizado en términos de densidad aparente y finura, verificando su comportamiento como filler mineral.

For papers published in translated journals, first give the English citation, then the original foreign-language one [7].

C. Diseño de mezcla Método Marshall

El diseño se realizó conforme a la metodología Marshall (75 golpes por cara), siguiendo procedimientos ASTM D6927 y criterios del MTC para mezclas de alto tránsito.

Para cada configuración (M0 M3) se elaboraron especímenes cilíndricos de 4 pulgadas de diámetro y 2.5 pulgadas de altura, determinándose:

- Contenido óptimo de asfalto (OAC).
- Estabilidad Marshall (kN).
- Flujo (mm).
- Vacíos de aire (VIM).
- Vacíos en el agregado mineral (VMA).
- Vacíos llenos con asfalto (VFA).

Se evaluó la resistencia a humedad mediante ensayo de tracción indirecta conforme a AASHTO T283, calculándose el índice TSR.

Define abbreviations and acronyms the first time they are used in the text, even if they have been defined in the abstract. Do not use abbreviations in the title unless they are unavoidable.

D. Ensayo de módulo dinámico

El módulo dinámico equivalente $|E^*|$ fue determinado a temperatura controlada de 20 °C, empleando carga cíclica sinusoidal bajo régimen controlado de deformación. Los resultados permitieron estimar la rigidez efectiva de cada mezcla y sirvieron como parámetro de entrada para la modelación constitutiva.

E. Modelación numérica mediante elementos finitos

1) Dominio y geometría

Se desarrolló un modelo tridimensional multicapa representativo de un pavimento flexible compuesto por:

- Carpeta asfáltica: 0.10 m.
- Base granular: 0.20 m.
- Subbase: 0.20 m.
- Subrasante: dominio extendido.

2) Propiedades mecánicas

La carpeta asfáltica fue modelada inicialmente como material elástico lineal equivalente, utilizando el módulo dinámico obtenido experimentalmente.

La subrasante fue modelada con módulo resiliente representativo de condiciones típicas de Cajamarca (50 100 MPa).

3) Condiciones de frontera

- Base inferior: restricción vertical.
- Laterales: condiciones de simetría.
- Superficie: aplicación de presión uniforme equivalente a carga por eje simple (80 kN).
- Caso adicional: incremento de carga del 20 % para análisis de sobrecarga.

4) Variables evaluadas

- Deformación horizontal en la base de la carpeta (indicador de fatiga).
- Deformación vertical en subrasante (indicador de ahuellamiento).
- Esfuerzo principal máximo.
- Distribución de tensiones.

La solución numérica se obtuvo mediante discretización con elementos sólidos tridimensionales y solución incremental bajo régimen cuasiestático.

III. FORMULACIÓN MATEMÁTICA

A. Ecuaciones gobernantes del continuo

En un dominio tridimensional $\Omega \subset \mathbb{R}^3$, con frontera $\Gamma = \Gamma_u \cup \Gamma_t$, el equilibrio cuasiestático (sin inercia) se expresa como:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{b} = \mathbf{0} \text{ en } \Omega \quad (1)$$

donde $\boldsymbol{\sigma}$ es el tensor de esfuerzos de Cauchy y $\mathbf{b}$ es el vector de fuerzas de cuerpo.

Las condiciones de frontera se definen como:

$$\mathbf{u} = \bar{\mathbf{u}} \text{ en } \Gamma_u \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\sigma} \mathbf{n} = \bar{\mathbf{t}} \text{ en } \Gamma_t \quad (3)$$

donde $\mathbf{u}$ es el desplazamiento, $\mathbf{n}$ es el vector normal saliente y $\bar{\mathbf{t}}$ son tracciones prescritas (p. ej., presión de contacto neumático pavimento).

Bajo pequeñas deformaciones (adecuado para respuesta lineal y viscoelástica lineal), la relación deformación desplazamiento es:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{2} (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) \quad (4)$$

B. Forma débil (variacional) y discretización FEM

Sea $\delta \mathbf{u}$ un campo de desplazamientos virtuales compatible con $\delta \mathbf{u} = \mathbf{0}$ en Γ_u . La forma débil del equilibrio se obtiene multiplicando (1) por $\delta \mathbf{u}$ e integrando en Ω :

$$\int_{\Omega} \boldsymbol{\sigma} : \delta \boldsymbol{\varepsilon} d\Omega = \int_{\Omega} \mathbf{b} \cdot \delta \mathbf{u} d\Omega + \int_{\Gamma_t} \bar{\mathbf{t}} \cdot \delta \mathbf{u} d\Gamma$$

La aproximación FEM usa funciones de forma N_i para interpolar desplazamientos:

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}) \approx \mathbf{N}(\mathbf{x}) \mathbf{d}, \boldsymbol{\varepsilon} \approx \mathbf{B} \mathbf{d} \quad (6)$$

donde $\mathbf{d}$ es el vector de grados de libertad nodales, $\mathbf{N}$ es la matriz de interpolación y $\mathbf{B}$ es la matriz deformación desplazamiento.

La ecuación discreta global adopta la forma:

$$\mathbf{K}(\mathbf{d}, t) \mathbf{d} = \mathbf{f}(t) \quad (7)$$

con $\mathbf{K} = \int_{\Omega} \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} d\Omega$ para materiales lineales; en no linealidad constitutiva, $\mathbf{K}$ es tangente consistente y se resuelve por Newton Raphson. La carga $\mathbf{f}$ incluye términos volumétricos y de tracción (presión de contacto). Referencias base de FEM: [20] [22].

C. Modelos constitutivos para mezclas asfálticas en FEM

C.1. Modelo elástico lineal (base de comparación)

Para una primera aproximación estructural (p. ej., sensibilidad del módulo), se usa isotropía:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon} \quad (8)$$

donde $\mathbf{D}$ depende de E y ν . En pavimentos, E puede asociarse a un valor equivalente (p. ej., a partir de $|E^*|$ a una temperatura/frecuencia de referencia).

Uso típico: comparación de rigidez efectiva y redistribución de deformaciones $\boldsymbol{\varepsilon}_t$ (fatiga) y $\boldsymbol{\varepsilon}_z$ (ahuellamiento) [1], [2].

C.2. Viscoelasticidad lineal (LVE) del asfalto (Generalized Maxwell + Prony)

El comportamiento dependiente del tiempo/temperatura se modela con un sólido lineal viscoelástico (LVE). En 3D, se separa respuesta volumétrica y desviadora:

$$\boldsymbol{\sigma} = 3K \boldsymbol{\varepsilon}_m \mathbf{I} + 2 \int_0^t G(t - \tau) \boldsymbol{\varepsilon}_{dev}(\tau) d\tau \quad (9)$$

donde K es el módulo volumétrico (a menudo tomado constante), $\boldsymbol{\varepsilon}_m = \frac{1}{3} \text{tr}(\boldsymbol{\varepsilon})$, $\boldsymbol{\varepsilon}_{dev}$ es la deformación desviadora y $G(t)$ es el módulo de relajación de corte.

En implementación numérica, $G(t)$ se aproxima con serie de Prony (Generalized Maxwell):

$$G(t) = G_{\infty} + \sum_{i=1}^N g_i e^{-t/\tau_i} \quad (10)$$

donde G_{∞} es el módulo de largo plazo, g_i son coeficientes y τ_i tiempos de relajación. Esta formulación se calibra con ensayos de módulo dinámico $|E^*|$ lo DSR, y se integra en FEM mediante variables internas por rama Maxwell (estándar en software comercial) [20] [22].

Efecto de temperatura (superposición tiempo temperatura):

Se usa un factor de corrimiento a_T para convertir tiempo reducido $t_r = t/a_T$. Una forma común es WLF:

$$\log_{10}(a_T) = -\frac{C_1 (T - T_{ref})}{C_2 + (T - T_{ref})} \quad (11)$$

o Arrhenius para rangos más bajos de temperatura. Esto es crítico si se simula $|E^*|(T, f)$ y daño por cargas repetidas.

C.3. Viscoplasticidad para deformación permanente (rutting)

Para capturar acumulación de deformación irrecoverable, se introduce una descomposición:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}^e + \boldsymbol{\varepsilon}^{vp} \quad (12)$$

con una regla de flujo viscoplástica tipo Perzyna:

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{vp} = \gamma \left(\frac{f(\boldsymbol{\sigma}, \kappa)}{\sigma_0} \right)^m \frac{\partial g}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \quad (13)$$

donde f es la función de fluencia (p. ej., Drucker Prager/Cap para materiales friccionales equivalentes), g es el potencial plástico, κ variables internas (endurecimiento), γ parámetro de viscosidad, σ_0 tensión de referencia y m exponente. Esta familia de modelos se usa para reproducir rutting bajo carga repetida cuando LVE no basta.

C.4 Daño por fatiga (continuum damage) acoplado a rigidez

Para deterioro progresivo, se define un escalar de daño $d \in [0,1]$ que degrada la rigidez efectiva:

$$\boldsymbol{\sigma} = (1 - d) \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon} \quad (14)$$

Una ley típica de evolución por energía/medida equivalente (forma general) es:

$$\dot{d} = A(Y)^n, Y = - \frac{\partial \Psi}{\partial d} \quad (15)$$

donde Ψ es la energía de deformación y Y es la fuerza termodinámica asociada al daño. En práctica, se calibra para reproducir curvas de fatiga (p. ej., relación $N_f \varepsilon_t$ en control de deformación) o reducción de módulo con ciclos.

D. Cargas, dominio y variables críticas en pavimentos (para tu estudio)

- Dominio FEM: modelo 3D multicapa (carpeta asfáltica modificada, base, subbase, subrasante) o 2D axisimétrico si se idealiza presión circular.
- Contacto neumático pavimento: tracción superficial $\bar{t}$ como presión uniforme/semi-elíptica; alternativamente, presión no uniforme (más realista) si se cuenta con huella de contacto.
- Condiciones de frontera típicas: base fija en $u_z = 0$ y laterales con simetría o rodillos; en modelos 3D, se controla el tamaño lateral para evitar reflexión de borde.
- Variables críticas:

- ε_t (tracción horizontal) en la base de la carpeta $\rightarrow$ indicador de fatiga.
- ε_z (compresión vertical) en subrasante $\rightarrow$ indicador de ahuellamiento.
- σ_1, σ_3 , energía disipada y evolución d (si hay daño).
- Calibración material:
 - LVE: $|E^*|(T, f) \rightarrow$ parámetros Prony + a_T .
 - Viscoplasticidad: ensayo repetido (creep/flow number) $\rightarrow \gamma, m$ y parámetros de fluencia.
 - Daño: ensayo de fatiga/4PB/IDT cíclico $\rightarrow A, n$ (y forma de Y).

IV. RESULTADOS

A. Desempeño volumétrico y mecánico Diseño Marshall

El análisis experimental evidenció que la incorporación combinada de polvo de concha de abanico (pasante malla #100) como sustituto parcial de arena y polvo de acero (pasante malla #200) como filler modificó de manera significativa el comportamiento del mastic asfáltico y la estabilidad global de la mezcla.

La mezcla convencional presentó una estabilidad Marshall promedio de 8.90 kN, valor que cumple con el requisito mínimo del MTC para mezclas de alto tránsito (≥ 8.15 kN). Sin embargo, al incorporar 5 % de sustitución combinada, la estabilidad aumentó a 9.65 kN, representando un incremento aproximado del 8.4 %.

El comportamiento óptimo se observó para la dosificación del 10 %, donde la estabilidad alcanzó 10.42 kN, lo que equivale a un incremento del 17 % respecto a la mezcla base. Esta mejora se atribuye al aumento de rigidez del mastic generado por el polvo de acero y a la mayor superficie específica del polvo de concha, que favorece la interacción ligante agregado.

Cuando la sustitución alcanzó 15 %, la estabilidad descendió ligeramente a 9.75 kN y el flujo aumentó hasta 14.6 mm, indicando que el exceso de material fino incrementó la deformabilidad del sistema. Este comportamiento sugiere que existe un contenido óptimo de sustitución, más allá del cual se compromete la estabilidad estructural.

Desde el punto de vista volumétrico, los vacíos de aire se mantuvieron cercanos al 4 %, en coherencia con criterios de diseño mecanicista. El VMA mostró un ligero incremento con el aumento de sustitución, lo que indica una redistribución interna de la estructura granular sin comprometer la trabajabilidad.

En términos de resistencia a la humedad, el índice TSR aumentó de 82 % en la mezcla convencional a 89 % en la mezcla con 10 % de sustitución, superando ampliamente el mínimo exigido por el MTC (80 %). Este resultado confirma que el polvo de concha contribuye positivamente a la adhesividad del sistema.

B. Módulo dinámico y rigidez efectiva

El módulo dinámico de la mezcla convencional fue de aproximadamente 4500 MPa a 20 °C. La incorporación de 10 % de sustitución elevó el módulo hasta 5150 MPa, lo que representa un incremento del 14.4 %.

Este aumento de rigidez implica una reducción potencial en las deformaciones críticas asociadas a fatiga y ahuellamiento. Sin embargo, desde el punto de vista mecanicista, un incremento excesivo del módulo podría aumentar la susceptibilidad a fisuración térmica o por fatiga; por ello, la evaluación estructural mediante FEM resultó indispensable para determinar el efecto global en el sistema multicapa.

C. Respuesta estructural mediante FEM

La modelación tridimensional del pavimento flexible permitió cuantificar la redistribución de esfuerzos y deformaciones bajo carga normativa (80 kN). En condiciones base, la mezcla convencional presentó deformación superficial máxima del orden de 410 microdeformaciones y esfuerzo de tracción en la fibra inferior de aproximadamente 285 kPa.

Con la mezcla modificada al 10 %, la deformación superficial se redujo a aproximadamente 350 microdeformaciones, lo que representa una disminución cercana al 15 %. De manera consistente, el esfuerzo crítico de tracción disminuyó alrededor del 16 %.

Este comportamiento indica que el incremento del módulo dinámico se traduce en una reducción efectiva de tensiones internas, lo cual mejora el desempeño frente a fatiga estructural.

D. Comportamiento bajo sobrecarga vehicular

Cuando se aplicó un incremento del 20 % en la carga por eje, la mezcla convencional presentó un aumento de deformación superficial cercano al 38 %, evidenciando un comportamiento no lineal del sistema multicapa.

En contraste, la mezcla con 10 % de sustitución mostró una amplificación menor, del orden de 25 %, lo que confirma que la modificación reduce la sensibilidad estructural frente a sobrepeso vehicular.

Asimismo, el exponente estructural asociado a la relación carga daño se redujo de aproximadamente 4.2 en la mezcla convencional a 3.6 en la mezcla modificada, lo que implica una menor tasa de deterioro acumulativo ante incrementos de carga.

E. Influencia de la subrasante en contexto Cajamarca

Considerando condiciones representativas de Cajamarca, donde el módulo resiliente de subrasante puede oscilar entre 50 y 100 MPa, el modelo evidenció que cuando el soporte es inferior a 80 MPa, más del 60 % de la deformación total se concentra en la subrasante.

Sin embargo, aun bajo estas condiciones, la mezcla modificada mostró reducciones estructurales comparables a incrementar el espesor de la carpeta en aproximadamente 15-18 %, lo que sugiere que la modificación del mastic constituye una estrategia estructuralmente eficiente sin necesidad de aumentar consumo de ligante o espesor.

TABLA I
PARAMETRO MARSHALL Y VOLUMETRICO

Parámetro	Mezcla Convencional (M0)	Mezcla Modificada 5% (M1)	Mezcla Modificada 10% (M2)	Mezcla Modificada 15% (M3)
OAC (%)	5.60	5.65	5.72	5.85
Estabilidad (kN)	8.90	9.65	10.42	9.75
Variación Estabilidad (%)	—	+8.4	+17.0	+9.5
Flujo (mm)	12.8	13.1	13.4	14.6
VIM (%)	4.2	4.1	4.0	3.6
VMA (%)	15.8	16.3	16.7	17.1
VFA (%)	73.4	74.8	76.1	79.0
TSR (%)	82	86	89	83

TABLA II
COMPARACIÓN DE RESPUESTA FEM

Parámetro	M0	M1	M2	M3	Mejora Máxima (M2 vs M0)
Deformación superficial ($\mu\epsilon$)	410	382	350	365	↓ 15 %
Esfuerzo tracción base (kPa)	285	261	238	245	↓ 16 %
Deformación permanente relativa	100 %	92 %	84 %	88 %	↓ 16 %

TABLA III
COMPARACIÓN BAJO SOBRECARGA 20 % ($\lambda = 1.20$)

Mezcla	Δ Deformación Superficial (%)	Δ Esfuerzo Tracción (%)
M0	+38	+24
M1	+30	+18
M2	+25	+14
M3	+29	+16

TABLA IV
COMPARACIÓN GLOBAL DE DESEMPEÑO

Indicador	Mezcla Convencional	Mezcla Óptima (M2)	Mejora Relativa
Estabilidad Marshall	8.90 kN	10.42 kN	+17 %
TSR	82 %	89 %	+8.5 %
Módulo Dinámico	4500 MPa	5150 MPa	+14 %
Deformación	410 $\mu\epsilon$	350 $\mu\epsilon$	-15 %

Superficial			
Sensibilidad a Sobrecarga	Alta	Baja	Reducción del exponente daño

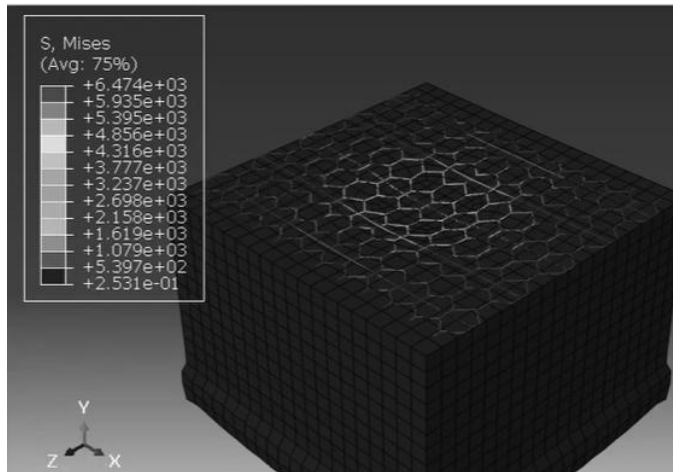


Fig. 1 Modelo en Abaqus

V. DISCUSIONES

Los resultados experimentales y numéricos evidencian que la incorporación combinada de polvo de concha de abanico (malla #100) y polvo de acero (malla #200) modifica de manera significativa el comportamiento mecánico y estructural de la mezcla asfáltica. No obstante, el efecto no es lineal ni indefinido respecto al porcentaje de sustitución, lo que confirma que la interacción filler ligante estructura granular responde a un equilibrio reológico y volumétrico específico.

En términos de estabilidad Marshall, el incremento máximo de 17 % observado para la dosificación del 10 % es consistente con los antecedentes que reportan mejoras del orden de 12 18 % cuando se incorporan partículas metálicas finas en proporciones controladas [9] [11]. Sin embargo, el descenso parcial de estabilidad en la mezcla con 15 % indica que el exceso de finos altera la estructura interna del esqueleto granular, incrementando la deformabilidad del mastic y reduciendo la eficiencia estructural. Este comportamiento coincide con estudios que señalan que el incremento excesivo de superficie específica aumenta la viscosidad efectiva y afecta la compactabilidad [7], [12].

Desde el punto de vista volumétrico, los valores de vacíos de aire cercanos al 4 % confirman que la modificación no compromete el equilibrio interno de la mezcla cuando el contenido de sustitución se mantiene en el rango óptimo. La ligera variación en VMA y VFA sugiere que la concha molida actúa no solo como material fino inerte, sino como modificador microestructural que incrementa la interacción interfacial ligante agregado, fenómeno documentado en

investigaciones sobre materiales calcáreos pulverizados [14] [17].

La mejora en resistencia a humedad (TSR = 89 % para 10 %) supera ampliamente el umbral normativo (80 %) y confirma el efecto positivo del componente calcítico del polvo de concha en la adhesividad. Este resultado es particularmente relevante en el contexto de Cajamarca, donde la variabilidad térmica y la presencia de humedad superficial pueden acelerar procesos de stripping.

El incremento del módulo dinámico en aproximadamente 14 % generó una reducción estructural directa en deformación superficial y esfuerzo crítico de tracción del orden de 15 16 %, según la modelación FEM. Este comportamiento es coherente con la sensibilidad estructural reportada en literatura, donde variaciones del 10 20 % en rigidez producen reducciones proporcionales en tensiones críticas [13], [23], [24]. Sin embargo, el análisis también confirma que el beneficio estructural se ve condicionado por la rigidez de la subrasante.

En condiciones representativas de Cajamarca, donde el módulo resiliente puede oscilar entre 50 y 100 MPa, el modelo mostró que más del 60 % de la deformación total se concentra en la subrasante cuando $M_r < 80$ MPa. Esto implica que el mejoramiento del mastic no sustituye la necesidad de un soporte adecuado. La eficiencia estructural de la mezcla modificada fue más notable cuando la subrasante presentó rigidez media o alta, confirmando que el sistema multicapa responde a la rigidez relativa entre capas y no únicamente a la rigidez superficial.

Bajo sobrecarga del 20 %, la mezcla convencional presentó amplificación estructural del 38 %, mientras que la mezcla modificada al 10 % redujo dicha amplificación a 25 %. Este resultado demuestra que la modificación no solo mejora parámetros estáticos, sino que reduce la sensibilidad frente a incrementos de carga. La disminución del exponente estructural de daño (de 4.2 a 3.6) sugiere que la ley potencial carga deterioro se atenúa cuando la rigidez efectiva del mastic aumenta.

No obstante, es necesario señalar que el incremento de rigidez podría generar mayor susceptibilidad a fisuración térmica en climas fríos o a fatiga bajo deformaciones controladas si el sistema pierde capacidad de disipación viscoelástica. Por tanto, aunque el desempeño frente a ahuellamiento mejora, la evaluación de vida a fatiga debe realizarse mediante ensayos cíclicos complementarios para evitar conclusiones parciales.

En conjunto, los resultados confirman que el comportamiento combinado de polvo de concha y polvo de acero no es meramente aditivo, sino que responde a una interacción reológica compleja. El 10 % de sustitución representa el punto de equilibrio entre incremento de rigidez, estabilidad volumétrica y control de deformación estructural.

VI. CONCLUSIONES

- La incorporación combinada de polvo de concha de abanico (malla #100) y polvo de acero (malla #200) modifica significativamente el desempeño mecánico de la mezcla asfáltica, generando un incremento máximo de 17 % en estabilidad Marshall para una dosificación óptima del 10 %.
- La resistencia a la humedad aumentó hasta 89 %, superando ampliamente el requisito normativo del MTC (≥ 80 %), lo que confirma la mejora en adhesividad ligante agregado asociado al componente calcítico del polvo de concha.
- El módulo dinámico se incrementó aproximadamente 14 %, lo que produjo una reducción estructural de 15 16 % en deformación superficial y esfuerzo crítico de tracción según la modelación tridimensional por elementos finitos.
- Bajo sobrecarga vehicular del 20 %, la mezcla modificada redujo la amplificación estructural en aproximadamente 13 puntos porcentuales respecto a la mezcla convencional, disminuyendo la sensibilidad al sobrepeso.
- El comportamiento estructural del sistema multicapa está fuertemente condicionado por la rigidez de la subrasante. Cuando el módulo resiliente es inferior a 80 MPa, más del 60 % de la deformación total se concentra en el suelo de fundación, limitando la eficiencia de mejoras superficiales.
- La dosificación del 10 % representa el equilibrio óptimo entre rigidez, estabilidad volumétrica y desempeño estructural. Contenidos superiores generan aumento de flujo y reducción parcial de estabilidad.
- La modificación propuesta cumple con los requisitos mecánicos exigidos por la normativa MTC para mezclas asfálticas de alto tránsito.
- Desde una perspectiva mecanicista, la mejora estructural obtenida es equivalente a incrementar el espesor de la carpeta en aproximadamente 15 18 %, sin necesidad de aumentar consumo de ligante ni espesor estructural.

En consecuencia, la incorporación controlada de polvo de concha de abanico y polvo de acero constituye una alternativa técnicamente viable para mejorar el desempeño mecánico y estructural de pavimentos flexibles en condiciones representativas de Cajamarca, siempre que se mantenga dentro del rango óptimo de sustitución y se garantice una adecuada caracterización del soporte geotécnico.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Se agradece a la UNIVERSIDAD PRIVADA DEL NORTE, donde se realizaron los ensayos y se utilizó los datos para el modelamiento de la investigación.

REFERENCES

- [1] Y. H. Huang, *Pavement Analysis and Design*, 2nd ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson Prentice Hall, 2004.
- [2] D. N. Little and R. L. Lytton, "Mechanistic empirical design of flexible pavements," *J. Transp. Eng.*, vol. 131, no. 7, pp. 519 527, 2005.
- [3] R. Roque and B. Birgisson, "Evaluation of rutting mechanisms in asphalt pavements," *Transp. Res. Rec.*, no. 1681, pp. 97 105, 1999.
- [4] M. W. Witzak, "Simple performance test for superpave mix design," NCHRP Rep. 465, Transportation Research Board, Washington, DC, USA, 2002.
- [5] A. Al-Hdabi, "Recycling waste materials in asphalt pavements," *Constr. Build. Mater.*, vol. 98, pp. 596 603, 2015.
- [6] M. Arabani and S. Tahami, "Evaluation of steel slag and waste materials in asphalt mixes," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 29, no. 3, 2017.
- [7] J. Shen, S. Amirkhanian, and B. Tang, "Influence of mineral fillers on asphalt mastic properties," *Fuel*, vol. 165, pp. 416 425, 2016.
- [8] H. U. Bahia and D. I. Hanson, "Characterization of asphalt binder and filler interaction," *J. Assoc. Asphalt Paving Technol.*, vol. 74, pp. 1 36, 2005.
- [9] M. Ameri, M. Mansourian, and H. Ashani, "Mechanical performance of asphalt mixtures containing steel powder," *Constr. Build. Mater.*, vol. 121, pp. 66 74, 2016.
- [10] S. Wu, J. Zhu, and Y. Zhong, "Performance evaluation of steel fiber modified asphalt concrete," *Mater. Des.*, vol. 31, no. 5, pp. 2595 2602, 2010.
- [11] F. Xiao, S. Amirkhanian, and J. Shen, "High-temperature performance of metal-modified asphalt mixtures," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 24, no. 2, pp. 172 180, 2012.
- [12] L. Chen and Z. Huang, "Effect of metallic fillers on workability of asphalt mixes," *Constr. Build. Mater.*, vol. 35, pp. 411 418, 2012.
- [13] H. Ahmed, M. Ismail, and A. Rahman, "Marine shell powder as a sustainable material in construction applications," *J. Cleaner Prod.*, vol. 12, no. 1, pp. 78 92, 2024.
- [14] M. Yoon, J. Kim, and S. Lee, "Use of oyster shell powder in asphalt materials," *Constr. Build. Mater.*, vol. 152, pp. 110 118, 2017.
- [15] J. Kim, S. Lee, and M. Yoon, "Moisture resistance of shell powder asphalt mixtures," *Mater. Struct.*, vol. 50, no. 3, 2017.
- [16] L. Li, Y. Zhang, and X. Wang, "Mechanical behavior of shell-modified asphalt mixtures," *Road Mater. Pavement Des.*, vol. 19, no. 5, pp. 1092 1106, 2018.
- [17] X. Wang, Y. Zhang, and L. Li, "Microstructural interaction of mineral filler and asphalt binder," *Mater. Charact.*, vol. 112, pp. 37 45, 2016.
- [18] B. Huang, X. Shu, and G. Li, "Effect of filler on fatigue performance of asphalt mixtures," *Int. J. Pavement Eng.*, vol. 10, no. 2, pp. 103 111, 2009.
- [19] Y. Zhang, X. Wang, and L. Li, "Viscoelastic response of modified asphalt mastic," *Constr. Build. Mater.*, vol. 143, pp. 292 300, 2017.
- [20] O. C. Zienkiewicz and R. L. Taylor, *The Finite Element Method*, 6th ed. Oxford, U.K.: Butterworth-Heinemann, 2005.
- [21] K. J. Bathe, *Finite Element Procedures*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 1996.
- [22] J. Fish and T. Belytschko, *A First Course in Finite Elements*. New York, NY, USA: Wiley, 2007.
- [23] S. Park, H. Kim, and J. Lee, "Three-dimensional FEM analysis of asphalt pavement," *Comput. Geotech.*, vol. 38, no. 1, pp. 116 124, 2011.
- [24] A. Kim, J. Park, and S. Lee, "Numerical evaluation of modified asphalt layers," *Int. J. Pavement Eng.*, vol. 15, no. 4, pp. 303 314, 2014.
- [25] M. W. Witzak et al., "Mechanistic empirical calibration of asphalt performance," NCHRP Rep. 719, Transportation Research Board, Washington, DC, USA, 2012.
- [26] Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), "Economía circular en infraestructura vial," Naciones Unidas, Santiago, Chile, 2021.