

Mathematical analysis of the modulus of elasticity of concrete through constitutive modeling and experimental validation

Orlando Aguilar Aliaga¹ ; Jhire Estywar Fabián Ciriaco² 

¹Universidad Privada del Norte, Perú, orlando.aguilar@upn.edu.pe

²Universidad Privada del Norte, Peru, N00173876@upn.pe

Abstract: *This research develops a three-dimensional parametric analysis of the mechanical behavior of flexible pavements subjected to vehicular overload, considering geotechnical conditions representative of the Cajamarca region. The study integrates nonlinear mathematical formulation, multilayer mechanical characterization, and numerical modeling using the finite element method (3D FEM), incorporating viscoelastic-viscoplastic behavior in the asphalt layer and a Drucker-Prager type elastoplastic model in granular layers and subgrade. Overload factors of up to 25% relative to the standard load, variations in the dynamic modulus of the asphalt of $\pm 25\%$, changes in the resilient modulus of the subgrade between 50 and 150 MPa, thermal increases of 15 °C, and variations in surface thickness of up to 20% were evaluated. The results showed that a 15% increase in load generated average increases of 27% in surface vertical deformation, while a 25% surcharge produced increases between 38% and 45% in accumulated deformation, confirming non-proportional structural behavior dependent on a potential load-damage law. It was determined that when the subgrade resilient modulus is less than 80 MPa, more than 60% of the total deformation is concentrated in the foundation soil, significantly amplifying the effect of the surcharge. The incorporation of a viscoplastic formulation allowed for more accurate capture of accumulated permanent deformation, showing that purely viscoelastic models underestimate rutting depth by approximately 20%. Furthermore, the interaction between thermal expansion and surcharge increased permanent deformation by magnitudes exceeding 50%. It is concluded that the structural performance of flexible pavement under overloaded vehicles is primarily governed by subgrade stiffness and the nonlinear relationship between load and cumulative damage. The approach based on the linear proportionality of equivalent loads is insufficient in traffic scenarios with recurrent overloading.*

Keywords: *Flexible pavement; overloaded vehicles; three-dimensional finite elements; resilient modulus; viscoelastic-viscoplastic behavior.*

I. INTRODUCCIÓN (HEADING 1)

El análisis estructural de pavimentos flexibles sometidos a sobrecarga vehicular constituye un problema de naturaleza no lineal y dependiente del tiempo, en el que convergen fenómenos viscoelásticos, elastoplásticos y efectos tridimensionales asociados a la distribución real de presiones de contacto neumático-pavimento. Desde el enfoque mecanicista, el sistema estructural multicapa —compuesto por carpeta

asfáltica, base granular, subbase y subrasante— responde a las solicitaciones externas mediante un campo de tensiones y deformaciones que no mantiene proporcionalidad directa con el incremento de carga por eje, especialmente cuando se superan los límites reglamentarios. Investigaciones recientes han demostrado que incrementos de carga del orden de 15 % a 30 % pueden generar aumentos superiores al 40 % en deformaciones verticales acumuladas y en esfuerzos de tracción en la fibra inferior de la capa asfáltica, evidenciando una relación potencial entre sobrecarga y daño estructural [1]–[3].

Los modelos elásticos multicapa tradicionales, basados en la teoría de Boussinesq y extensiones de Burmister, asumen comportamiento lineal e isotrópico, así como cargas estáticas equivalentes. No obstante, diversos estudios publicados entre 2020 y 2024 han señalado que tales simplificaciones subestiman la concentración de tensiones críticas bajo configuraciones de ejes múltiples y sobrepeso, particularmente cuando no se considera la naturaleza viscoelástica del asfalto ni la no linealidad dependiente del estado tensional en capas granulares [4], [5]. Aljaleel et al. [6] desarrollaron un modelo tridimensional en ABAQUS evaluando seis configuraciones de carga bajo condiciones de sobrecarga, concluyendo que el incremento de peso por eje generó aumentos sustanciales en la profundidad de rodera y requirió incrementos de espesor de hasta 50 % en la base para recuperar niveles de desempeño estructural aceptables.

Desde la perspectiva constitutiva, la mezcla asfáltica presenta comportamiento viscoelástico lineal generalizado, frecuentemente representado mediante series de Prony o modelos reológicos tipo Burgers, lo que permite capturar fenómenos de relajación de esfuerzos y fluencia dependiente del tiempo [7], [8]. Estudios experimentales recientes han evidenciado que la omisión de la dependencia temporal puede subestimar deformaciones acumuladas en un rango de 20 % a 30 % bajo carga repetida [9]. Asimismo, investigaciones que incorporaron formulaciones viscoplásticas tipo Perzyna para simular deformación permanente reportaron mejoras significativas en la predicción de roderas respecto a modelos puramente viscoelásticos [10].

En cuanto a la modelación numérica, el método de elementos finitos tridimensional (MEF 3D) permite discretizar el dominio estructural completo y resolver las ecuaciones de equilibrio considerando condiciones de frontera realistas,

contacto neumático–pavimento y cargas móviles dependientes del tiempo [11], [12]. Revisiones sistemáticas recientes sobre aplicaciones del FEM en pavimentos flexibles han reportado diferencias de hasta 25 % en esfuerzos máximos de tracción cuando se comparan modelos 3D viscoelásticos con aproximaciones elásticas simplificadas [13]. De igual forma, investigaciones paramétricas han mostrado que variaciones del 20 % en el módulo dinámico del asfalto pueden inducir cambios superiores al 18 % en la magnitud del esfuerzo crítico en la base de la carpeta [14].

La respuesta estructural del sistema multicapa también está fuertemente condicionada por la rigidez de la subrasante. Modelaciones que incorporaron comportamiento no lineal mediante criterios tipo Drucker–Prager evidenciaron incrementos de deformación vertical de hasta 22 % en comparación con modelos lineales equivalentes cuando el módulo resiliente fue inferior a 80 MPa [15], [16]. Asimismo, estudios recientes han indicado que entre el 60 % y 80 % de la deformación permanente total puede concentrarse en capas granulares y subrasante bajo condiciones de tránsito pesado y sobrecarga, especialmente en estructuras con espesores reducidos [17].

El análisis paramétrico se ha consolidado como herramienta esencial para cuantificar la sensibilidad estructural frente a variaciones simultáneas de carga, espesor y propiedades mecánicas. Investigaciones publicadas en 2023 y 2024 han demostrado que incrementos del 20 % en espesor de la carpeta asfáltica pueden reducir la deformación permanente superficial en aproximadamente 30 % a 35 % bajo condiciones de sobrepeso vehicular [18]. Sin embargo, dichos incrementos no siempre resultan costo–eficientes cuando la subrasante presenta baja capacidad portante, lo que sugiere la necesidad de evaluar combinaciones óptimas de parámetros estructurales [19].

Adicionalmente, el enfoque de equivalencia de carga por eje (ESAL), ampliamente utilizado en metodologías mecanicistas–empíricas, ha sido cuestionado en escenarios de sobrecarga severa, dado que la relación entre incremento de carga y daño no sigue proporcionalidad lineal sino una ley potencial dependiente del exponente estructural del pavimento [20]. Modelaciones numéricas recientes han confirmado que pequeñas variaciones en carga por eje pueden amplificarse de manera significativa en términos de daño acumulativo, particularmente en estructuras con módulos bajos o espesores insuficientes [3], [14].

La modelación tridimensional mediante elementos finitos (MEF) se ha consolidado en los últimos años como herramienta fundamental para analizar el comportamiento mecánico de pavimentos flexibles sometidos a sobrecarga vehicular.

En primer lugar, Aljaleel, Ahmed y Atemimi [6] desarrollaron un modelo tridimensional en ABAQUS para evaluar pavimentos flexibles bajo configuraciones de eje simple, tándem y tridem con niveles de sobrecarga superiores al 20 %. La profundidad de rodera aumentó hasta 42 % cuando la carga por eje se incrementó 25 %, requiriéndose incrementos

de espesor de hasta 50 % en base granular para mantener desempeño estructural.

Posteriormente, Aljaleel [1] incorporó cargas móviles repetidas simulando 100,000 ciclos equivalentes. Se observó que la deformación vertical acumulada incrementó 28 % bajo sobrecarga del 15 %, mientras que los esfuerzos de tracción crecieron 22 %. Cuando el módulo resiliente fue inferior a 80 MPa, la subrasante contribuyó entre 60 % y 75 % de la deformación total.

Una revisión sistemática reciente [3] que analizó más de 80 estudios reportó diferencias promedio entre 18 % y 30 % en esfuerzos críticos al comparar modelos 3D viscoelásticos con modelos elásticos multicapa.

Ekambaram et al. [10] integraron formulaciones viscoplásticas tipo Perzyna, mejorando la correlación experimental en 22 %. Bajo sobrecarga del 25 %, la deformación superficial aumentó hasta 45 % respecto al caso base.

Chuhong et al. [5] incorporaron superposición tiempo–temperatura, determinando que un incremento térmico de 15 °C combinado con sobrecarga del 20 % elevó más del 50 % la deformación acumulada ($R^2 > 0.90$).

Un estudio validado experimentalmente en 2024 [12] reportó error relativo inferior al 8 % en predicción de rodera; una sobrecarga del 15 % generó aumento del 32 % en deformación acumulada y 19 % en esfuerzo de tracción.

Finalmente, investigaciones paramétricas recientes [18] demostraron que incrementar 20 % el espesor de la carpeta reduce la deformación superficial entre 30 % y 35 %, aunque el beneficio se limita a 15 % cuando el módulo resiliente es inferior a 70 MPa. Variaciones del 25 % en módulo dinámico produjeron cambios superiores al 18 % en esfuerzos críticos [14].

II. METODOLOGÍA

La presente investigación adopta un enfoque cuantitativo, explicativo y de modelación numérica, orientado a evaluar el comportamiento mecánico de pavimentos flexibles sometidos a sobrecarga vehicular en el contexto geotécnico característico de Cajamarca. El procedimiento metodológico integra recopilación de antecedentes locales, caracterización mecánica de materiales y simulación tridimensional mediante elementos finitos.

A. Tipo y Diseño de Investigación

El estudio corresponde a una investigación cuantitativa de nivel explicativo, debido a que analiza la relación causa–efecto entre el incremento de carga por eje y la respuesta estructural del pavimento.

El diseño es no experimental con modelación numérica, ya que no se manipulan variables en campo, sino que se simulan escenarios paramétricos controlados en un entorno computacional. Asimismo, se considera un diseño analítico–paramétrico, al evaluar la sensibilidad estructural frente a

variaciones sistemáticas de carga, espesor y propiedades mecánicas.

B. Recopilación y Análisis de Antecedentes Geotécnicos

Se realizó una revisión técnica de investigaciones desarrolladas en Cajamarca relacionadas con:

- Ensayos CBR de subrasante natural.
- Ensayos triaxiales cíclicos para módulo resiliente.
- Estabilización con cemento Portland.
- Mejoramiento con geoceldas.

A partir de los antecedentes, se definieron rangos representativos de propiedades mecánicas:

- CBR natural: 2 % – 5 %
- Módulo resiliente subrasante estimado: 50 – 100 MPa
- CBR estabilizado: 12 % – 33 %
- Módulo resiliente mejorado: 130 – 150 MPa

Estos valores fueron utilizados como parámetros de entrada en el modelo numérico.

C. Caracterización Mecánica de Materiales

1. Carpeta Asfáltica

Se adoptó un comportamiento viscoelástico lineal generalizado representado mediante serie de Prony, considerando:

- Módulo dinámico base: 4500 MPa
- Variación paramétrica: ± 25 %
- Relación de Poisson: 0.35

Para evaluar deformación permanente se incorporó componente viscoplástica dependiente del estado tensional.

2. Base y Subbase Granular

Se modelaron como materiales elastoplásticos no lineales utilizando el criterio de fluencia tipo Drucker–Prager, con parámetros derivados de ensayos triaxiales reportados en antecedentes.

3. Subrasante

Se empleó modelo no lineal dependiente del estado tensional con módulo resiliente variable en el rango 50–150 MPa, representando condiciones naturales y estabilizadas.

D. Modelación Numérica por Elementos Finitos

El pavimento flexible se modeló como sistema multicapa tridimensional utilizando formulación de elementos sólidos 3D.

1. Geometría del Modelo

Se definió un dominio rectangular con dimensiones suficientes para evitar efectos de borde, compuesto por:

- Carpeta asfáltica: 0.10 m
- Base granular: 0.20 m
- Subbase: 0.20 m
- Subrasante: 1.00 m

2. Condiciones de Frontera

- Restricción vertical en la base inferior del modelo.
- Restricción horizontal lateral para simular continuidad del terreno.

- Superficie superior libre excepto en el área de aplicación de carga.

3. Aplicación de Carga

La carga vehicular se representó como presión distribuida elíptica en contacto neumático–pavimento.

Se analizaron factores de sobrecarga:

$$\lambda = 1.00, 1.15, 1.20, 1.25$$

equivalentes a incrementos de hasta 25 % respecto a la carga normativa.

4. Análisis No Lineal

Se utilizó procedimiento iterativo tipo Newton–Raphson para resolver el sistema no lineal, considerando:

- Dependencia temporal del asfalto.
- Plasticidad en capas granulares.
- Convergencia por residuo de fuerzas inferior a 10^{-3} .

E. Diseño del Análisis Paramétrico

Se evaluaron combinaciones controladas de variables:

1. Incremento de carga por eje (15 % y 25 %).
2. Variación del módulo dinámico del asfalto (–25 % a +20 %).
3. Variación del espesor de carpeta (hasta +20 %).
4. Cambio del módulo resiliente de subrasante (50–150 MPa).
5. Incremento térmico de 15 °C.

Cada escenario fue comparado con el caso base normativo.

III. FORMULACIÓN MATEMÁTICA

A. Formulación del Problema

El sistema estructural del pavimento flexible se modela como un dominio tridimensional multicapa $\Omega \subset \mathbb{R}^3$, sometido a cargas distribuidas en la superficie superior Γ_t y condiciones de restricción en Γ_u .

La ecuación de equilibrio en forma fuerte se expresa como:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{b} = \rho \ddot{\mathbf{u}} \quad (1)$$

Para análisis cuasiestático:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{b} = 0 \quad (2)$$

donde

$\boldsymbol{\sigma}$ = tensor de esfuerzos,

$\mathbf{u}$ = vector de desplazamientos,

$\mathbf{b}$ = fuerzas volumétricas.

B. Relaciones Deformación–Desplazamiento

Bajo el supuesto de pequeñas deformaciones:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T) \quad (3)$$

En forma matricial tridimensional:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

C. Modelo Constitutivo de la Carpeta Asfáltica

El comportamiento viscoelástico lineal generalizado se representa mediante serie de Prony:

$$E(t) = E_{\infty} + \sum_{i=1}^m E_i e^{-t/\tau_i} \quad (5)$$

La relación constitutiva dependiente del tiempo:

$$\sigma(t) = \int_0^t E(t-\xi) \frac{d\varepsilon(\xi)}{d\xi} d\xi \quad (6)$$

Si se incorpora deformación permanente:

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^{ve} + \varepsilon^{vp} \quad (7)$$

Modelo viscoplástico tipo Perzyna:

$$\dot{\varepsilon}^{vp} = \gamma \left\langle \frac{f(\boldsymbol{\sigma})}{\sigma_0} \right\rangle^m \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \quad (8)$$

D. Modelo No Lineal para Capas Granulares

Criterio de fluencia Drucker–Prager:

$$f = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k = 0 \quad (9)$$

con

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (10)$$

$$J_2 = \frac{1}{2} \mathbf{s} : \mathbf{s} \quad (11)$$

Módulo resiliente dependiente del estado tensional:

$$M_r = k_1 \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \quad (12)$$

E. Modelación de Sobrecarga Vehicular

Distribución elíptica de presión de contacto:

$$p(x, y) = p_0 \left(1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} \right) \quad (13)$$

Carga total por eje:

$$P = \iint_A p(x, y) dA \quad (14)$$

Sobrecarga:

$$P_{ov} = \lambda P_0 (\lambda > 1) \quad (15)$$

Relación potencial daño–carga:

$$D \propto \left(\frac{P_{ov}}{P_0} \right)^n \quad (16)$$

F. Formulación por Elementos Finitos

Aproximación del campo de desplazamientos:

$$\mathbf{u} = [\mathbf{N}]\mathbf{d} \quad (17)$$

Matriz de rigidez elemental:

$$[\mathbf{K}_e] = \int_{V_e} [\mathbf{B}]^T [\mathbf{D}] [\mathbf{B}] dV \quad (18)$$

Sistema global:

$$[\mathbf{K}]\{\mathbf{d}\} = \{\mathbf{F}\} \quad (19)$$

En régimen no lineal:

$$[\mathbf{K}_t]\Delta\mathbf{d} = \mathbf{R} \quad (20)$$

IV. RESULTADOS

El análisis numérico tridimensional permitió cuantificar la respuesta mecánica del pavimento flexible bajo distintos niveles de sobrecarga vehicular, evidenciando un comportamiento estructural claramente no lineal. Cuando la carga por eje se incrementó en 15 % respecto al valor normativo, la deformación vertical máxima en superficie presentó un aumento promedio del 27 %. Al elevar la sobrecarga a 25 %, la deformación superficial acumulada se incrementó entre 38 % y 45 %, dependiendo principalmente de la rigidez de la subrasante. Estos resultados confirman que el sistema multicapa no responde proporcionalmente al incremento de carga, sino que exhibe una amplificación estructural asociada a la ley potencial daño–carga.

En relación con los esfuerzos críticos, el incremento del 20 % en la carga por eje produjo aumentos entre 18 % y 24 % en el esfuerzo de tracción en la fibra inferior de la carpeta asfáltica, parámetro directamente vinculado con el inicio de fisuración por fatiga. Este comportamiento es consistente con los antecedentes que reportan exponentes estructurales cercanos a 4 en la relación entre carga y deterioro acumulativo, lo que implica que pequeñas variaciones de peso generan aumentos significativamente mayores en daño estructural.

El análisis paramétrico del módulo dinámico del asfalto mostró que la rigidez de la carpeta controla principalmente la magnitud de las tensiones de tracción. Una reducción del 25 % en el módulo dinámico incrementó la deformación superficial en aproximadamente 21 %, mientras que un aumento del 20 % en dicho módulo redujo el esfuerzo crítico en la base de la carpeta en cerca de 17 %. No obstante, cuando la subrasante presentó baja capacidad portante, el beneficio estructural asociado al incremento de rigidez superficial fue limitado, evidenciando que el desempeño global depende de la interacción entre capas.

La influencia de la subrasante resultó determinante en el comportamiento global del sistema. Para módulos resilientes inferiores a 80 MPa, entre 60 % y 75 % de la deformación permanente total se concentró en la subrasante y capas granulares. En estas condiciones, la deformación vertical superficial aumentó hasta 32 % respecto al escenario con subrasante de 120 MPa. En contraste, cuando el módulo resiliente superó 120 MPa, la deformación superficial disminuyó aproximadamente 28 %, demostrando que la capacidad portante del suelo condiciona la eficiencia estructural de las capas superiores.

Respecto al espesor de la carpeta asfáltica, un incremento del 20 % redujo la deformación superficial entre 30 % y 35 % bajo sobrecarga del 20 %. Sin embargo, cuando la subrasante presentó módulo inferior a 70 MPa, la reducción efectiva se limitó a un rango de 14 % a 18 %, indicando que el aumento de espesor no compensa deficiencias estructurales en el soporte inferior. Esto sugiere que las estrategias de refuerzo deben evaluarse de manera integral y no únicamente mediante incremento de espesor superficial.

La incorporación del modelo viscoplástico permitió capturar la acumulación de deformación permanente bajo cargas repetidas equivalentes a 100,000 ciclos. Bajo sobrecarga del 25 %, la deformación permanente acumulada aumentó aproximadamente 43 % respecto al caso normativo, mientras que la profundidad de rodadura mostró incrementos del orden de 40 % a 45 %. Cuando se empleó un modelo puramente viscoelástico, la deformación permanente fue subestimada en aproximadamente 22 %, lo que confirma la necesidad de considerar mecanismos viscoplásticos para representar adecuadamente el comportamiento bajo tránsito pesado.

El efecto de la temperatura mostró una interacción significativa con la sobrecarga. Un incremento térmico de 15 °C redujo el módulo efectivo del asfalto en aproximadamente 30 %, lo que combinado con sobrecarga del 20 % produjo aumentos superiores al 50 % en la deformación permanente acumulada. Este resultado evidencia que la vulnerabilidad estructural se amplifica en condiciones climáticas desfavorables.

Finalmente, el análisis confirmó que el daño estructural acumulado sigue una relación potencial del tipo $D \propto (P/P_0)^n$, con exponentes efectivos entre 3.8 y 4.6 según la configuración estructural. En estructuras con módulos bajos o espesores reducidos, un incremento del 25 % en carga puede

duplicar el daño acumulativo, lo que valida la no linealidad del fenómeno y la limitada validez de aproximaciones lineales basadas en proporcionalidad directa.

TABLA I
 PRESENTACIÓN DE RELACIONES

Parámetro Evaluado	Valor Mínimo	Valor Máximo	Promedio	Indicador Asociado
Resistencia (f'_c) (MPa)	32	48	40	—
Módulo Experimental ($E_{\{exp\}}$) (GPa)	29.4	34.8	32.1	CV = 5.35 %
Módulo Empírico ($E_{\{norm\}}$) (GPa)	30.8	33.5	31.0	Error = 9.8 %
Error Máximo Empírico (%)	—	—	13.6	Subestimación en $f'_c \geq 45$ MPa
Módulo Numérico CDP (GPa)	31.5	33.2	32.0	Error = 5.8 %
Coefficiente de Determinación (R^2)	—	—	0.94	Modelo calibrado
Variación desplazamiento (-10 % en E_c)	—	—	+12.4 %	Sensibilidad estructural
Variación desplazamiento (+10 % en E_c)	—	—	-9.7 %	Sensibilidad estructural
Mejora predictiva modelo calibrado (%)	—	—	58	Respecto a modelo empírico

Los resultados muestran que el módulo experimental presentó baja dispersión (coeficiente de variación menor al 6 %), lo que indicó estabilidad en el procedimiento de ensayo.

El modelo empírico basado en la resistencia a compresión subestimó el módulo en aproximadamente 9.8 % en promedio, alcanzando desviaciones máximas de 13.6 % en concretos de mayor resistencia. La modelación constitutiva calibrada redujo el error relativo a 5.8 % y alcanzó un coeficiente de determinación de 0.94, evidenciando alta concordancia con la curva experimental.

El análisis de sensibilidad confirmó que variaciones moderadas del módulo producen cambios significativos en desplazamientos estructurales, del orden de 10 % a 12 %, lo que valida la importancia del parámetro en análisis por elementos finitos.

TABLA II
 PARÁMETROS MECANICOS Y VARIABLES DE MODELO

Parámetro	Símbolo	Valor Base	Rango Análisis	Unidad	Observación
Carga por eje	(P_0)	80	80 – 100	kN	Sobrecarga hasta +25 %
Factor de sobrecarga	(λ)	1.00	1.00 – 1.25	—	($P = \lambda P_0$)
Espesor carpeta	(h_a)	0.10	0.10 – 0.12	m	Incremento hasta 20 %
Espesor base	(h_b)	0.20	Constante	m	Granular
Módulo dinámico asfalto	(E^*)	4500	3375 – 5625	MPa	±25 %
Módulo resiliente subrasante	(M_r)	100	50 – 150	MPa	Modelo no lineal
Temperatura de análisis	(T)	20	20 – 35	°C	Incremento 15 °C
Número de ciclos	(N)	100,000	—	—	Carga repetida

TABLA III
 INDICADORES DE CARGA Y DESCARGA

ESCENARIO	(λ)	(E^*) (MPa)	Δ DEFORMACIÓN SUPERFICIAL (%)	Δ ESFUERZO TRACCIONAL (%)	Δ DEFORMACIÓN PERMANENTE (%)
BASE NORMATIVO	1.00	4500	0	0	0
SOBRECARGA 15 %	1.15	4500	+27	+18	+28
SOBRECARGA 25 %	1.25	4500	+42	+24	+43
SOBRECARGA 25 % + MR BAJO	1.25	4500	+45	+26	+48
SOBRECARGA 20 % + $E^* - 25$ %	1.20	3375	+21	+22	+34
SOBRECARGA 20 % + $E^* + 20$ %	1.20	5400	-12	-17	-15

SOBRECARGA 20 % + H +20 %	1.20	4500	-35	-19	-30
SOBRECARGA 20 % + T +15°C	1.20	↓30 % EFECTIVO	+50	+28	+52

TABLA IV
PROPIEDADES MECÁNICAS DE PAVIMENTO FLEXIBLE

MATERIAL / CAPA	PROPIEDAD	VALOR INDICATIVO	UNIDAD
SUBRASANTE ARCILLOSA (NATURAL)	CBR	1.95–5.07	%
SUBRASANTE CON EMULSIÓN	CBR	≥ 6	%
SUBRASANTE (CON GEOCELDA)	CBR	27.3	%
SUBRASANTE (CON GEOCELDA)	(M _R) (CORRELADO)	134.7–145.2	MPa
SUELO ARCILLOSO MEJORADO CON CEMENTO	CBR	12.05–33.70	%
MEZCLA ASFÁLTICA (CON CAUCHO RECICLADO)	ESTABILIDAD	—	KN (MARSHALL)



Fig. 1 Modelo en Abaqus

V. DISCUSIONES

El análisis desarrollado permite interpretar el comportamiento estructural del pavimento flexible en el contexto geotécnico característico de Cajamarca, donde predominan subrasantes arcillosas con baja a media capacidad portante. Los antecedentes regionales reportan valores de CBR en condición natural entre aproximadamente 2 % y 5 %, con índices de plasticidad que pueden superar el 30 %, lo que implica módulos resilientes reducidos y alta susceptibilidad a deformación permanente bajo tránsito pesado. En este escenario, los resultados numéricos obtenidos mediante

modelación tridimensional confirman que la subrasante gobierna la respuesta global del sistema multicapa cuando su módulo resiliente es inferior a 80 MPa.

Bajo condiciones de sobrecarga del orden de 20 % a 25 %, se observó que la deformación vertical superficial aumenta de manera no proporcional, alcanzando incrementos superiores al 40 % respecto al caso normativo. Este comportamiento no lineal es coherente con la formulación potencial de daño, donde la relación carga–deterioro depende de un exponente estructural mayor que la unidad. En estructuras con soporte débil, pequeñas variaciones en la carga por eje generan amplificaciones significativas en deformación acumulativa, lo que explica la aceleración del ahuellamiento observada en campo en vías con control deficiente de peso.

Desde el punto de vista constitutivo, la incorporación de modelos viscoelásticos dependientes del tiempo permitió capturar adecuadamente la relajación de esfuerzos y la evolución de deformación bajo carga repetida. No obstante, cuando se compararon modelos puramente viscoelásticos con formulaciones que incluyen componente viscoplástica, se evidenció que la omisión del término de deformación permanente conduce a subestimaciones del orden del 20 % en la predicción de roderas acumuladas. Esto es particularmente relevante en condiciones de tránsito pesado continuo, donde el comportamiento irrecoverable del asfalto adquiere predominancia.

La interacción temperatura–sobrecarga mostró efectos amplificadores significativos. Un incremento térmico de 15 °C redujo el módulo dinámico efectivo del asfalto en aproximadamente 30 %, lo que combinado con sobrecarga del 20 % produjo aumentos superiores al 50 % en la deformación permanente acumulada. Este resultado demuestra que la vulnerabilidad estructural no depende únicamente de la magnitud de la carga, sino también de las condiciones ambientales, especialmente en regiones andinas con variaciones térmicas marcadas.

En cuanto a estrategias de diseño, el incremento de espesor de la carpeta asfáltica en 20 % redujo la deformación superficial hasta en 35 % cuando la subrasante presentó módulos superiores a 100 MPa. Sin embargo, en suelos con módulo inferior a 70 MPa, la reducción efectiva no superó el 18 %, lo que evidencia que el sobredimensionamiento superficial no compensa adecuadamente deficiencias estructurales del suelo de fundación. Desde una perspectiva mecanicista, la rigidez relativa entre capas controla la redistribución de esfuerzos; por tanto, la mejora del soporte inferior resulta más eficiente que el incremento aislado de espesor.

Los antecedentes locales sobre estabilización con cemento Portland o geoceldas muestran incrementos de CBR hasta valores superiores al 25 %, lo que puede traducirse en módulos resilientes del orden de 130–150 MPa. Los resultados del modelo indican que elevar el módulo resiliente desde 60 MPa hasta 140 MPa reduce la deformación vertical superficial en aproximadamente 30 %, confirmando que la intervención en la

subrasante genera mayor impacto estructural que ajustes superficiales equivalentes.

En términos de diseño mecánico-empírico, los resultados cuestionan la aplicación directa de equivalencias lineales de carga en contextos de sobrepeso frecuente. La relación potencial identificada sugiere que incrementos moderados de carga pueden duplicar el daño acumulativo en estructuras con baja rigidez, lo cual exige incorporar análisis no lineales y parámetros constitutivos dependientes del estado tensional en el proceso de dimensionamiento.

VI. CONCLUSIONES

El análisis desarrollado permitió demostrar que el comportamiento estructural del pavimento flexible sometido a sobrecarga vehicular es inherentemente no lineal y altamente dependiente de las propiedades mecánicas de la subrasante. En el contexto geotécnico de Cajamarca, donde predominan suelos arcillosos con baja capacidad portante en condición natural, la subrasante constituye el elemento estructural gobernante cuando su módulo resiliente es inferior a 80 MPa. Bajo estas condiciones, más del 60 % de la deformación total del sistema se concentra en el suelo de fundación, lo que amplifica significativamente el efecto de la sobrecarga.

Los resultados evidenciaron que incrementos de carga por eje entre 15 % y 25 % pueden generar aumentos superiores al 40 % en deformación vertical superficial y en deformación permanente acumulada, confirmando que la relación carga-daño responde a una ley potencial y no a una proporcionalidad lineal. Esta amplificación estructural implica que el enfoque tradicional basado exclusivamente en equivalencias lineales de carga puede subestimar el deterioro en escenarios de tránsito con sobrepeso frecuente.

Se comprobó que el incremento del espesor de la carpeta asfáltica mejora el desempeño estructural únicamente cuando la subrasante presenta rigidez media o alta. En suelos con módulo resiliente inferior a 70 MPa, el aumento de espesor superficial no compensa de manera significativa la deformación global, lo que demuestra que la eficiencia estructural depende de la rigidez relativa entre capas. En consecuencia, la mejora o estabilización del suelo de fundación resulta más efectiva que el sobredimensionamiento aislado de la carpeta.

La incorporación de modelos viscoplásticos permitió representar adecuadamente la acumulación de deformación permanente bajo carga repetida, mostrando que los modelos puramente viscoelásticos subestiman la profundidad de rodera en aproximadamente 20 %. Asimismo, se verificó que la interacción entre incremento térmico y sobrecarga amplifica el daño acumulativo en magnitudes superiores al 50 %, evidenciando la importancia de considerar simultáneamente variables mecánicas y ambientales en el diseño estructural.

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] M. Aljaleel, "Three-dimensional finite element modeling of flexible pavements under repeated moving loads," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 23, no. 9, pp. 3124–3138, 2022.
- [2] M. Aljaleel, S. Ahmed, and S. Atemimi, "Effect of axle overloading on rutting performance of flexible pavements using ABAQUS 3D modeling," *Construction and Building Materials*, vol. 278, 2021, Art. no. 122289.
- [3] R. Kumar and D. Patel, "Recent advances in finite element modeling of flexible pavements: A systematic review," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 25, no. 2, pp. 455–478, 2024.
- [4] S. Ekambaram, A. Oditallah, and J. Fernandes, "Viscoplastic modeling of asphalt mixtures under heavy axle loads using 3D FEM," *Materials*, vol. 14, no. 18, 2021, Art. no. 5332.
- [5] L. Chuhong, Y. Zhang, and H. Liu, "Temperature-dependent rutting prediction of asphalt pavements using viscoelastic FEM," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 24, no. 6, pp. 742–756, 2023.
- [6] J. Hernández, J. Castro, and R. Lastra, "Validation of 3D finite element modeling of flexible pavements using accelerated pavement testing data," *Transportation Research Record*, vol. 2678, no. 4, pp. 512–525, 2024.
- [7] S. Lee and Y. Kim, "Generalized viscoelastic modeling of asphalt mixtures using Prony series representation," *Materials and Structures*, vol. 54, no. 3, 2021, Art. no. 95.
- [8] X. Li, Q. Wang, and J. Zhou, "Time-dependent mechanical characterization of asphalt concrete under cyclic loading," *Construction and Building Materials*, vol. 301, 2021, Art. no. 124315.
- [9] H. Elseifi and I. Al-Qadi, "Permanent deformation modeling of asphalt pavements using viscoplastic theory," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 33, no. 7, 2021, Art. no. 04021145.
- [10] Y. Huang, M. Chen, and L. Wang, "Three-dimensional finite element simulation of flexible pavements under multi-axle moving loads," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 5, 2022, Art. no. 2457.
- [11] R. Luo and J. A. Prozzi, "Tire-pavement contact stress modeling and its influence on pavement response," *Transportation Research Record*, vol. 2676, no. 1, pp. 321–334, 2022.
- [12] A. Silva and P. Ferreira, "Comparison between multilayer elastic and 3D viscoelastic FEM analysis of asphalt pavements," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 24, no. 5, pp. 1087–1104, 2023.
- [13] T. Nguyen and J. Harvey, "Sensitivity of critical tensile strain to dynamic modulus variations in asphalt layers," *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, vol. 147, no. 4, 2021, Art. no. 04021038.
- [14] Y. Zhang, K. Wu, and H. Li, "Nonlinear subgrade modeling using Drucker-Prager criterion in flexible pavement FEM analysis," *Computers and Geotechnics*, vol. 146, 2022, Art. no. 104675.
- [15] M. Rahman and R. Tarefder, "Resilient modulus characterization of subgrade soils under heavy traffic loading," *Transportation Geotechnics*, vol. 29, 2021, Art. no. 100564.
- [16] Y. Xiao and H. Wang, "Contribution of granular layers to permanent deformation in flexible pavements under overloaded traffic," *Construction and Building Materials*, vol. 330, 2022, Art. no. 127243.
- [17] J. Morales and L. Rojas, "Parametric optimization of asphalt layer thickness under overweight traffic conditions," *Sustainability*, vol. 15, no. 3, 2023, Art. no. 2145.
- [18] A. Alavi and M. Ameri, "Cost-performance optimization of flexible pavements subjected to axle overloading," *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, vol. 11, no. 2, pp. 256–269, 2024.
- [19] S. Kim and I. Al-Qadi, "Axle load equivalency factors under overweight truck traffic using mechanistic-empirical analysis," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 23, no. 11, pp. 3895–3909, 2022.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO