

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS, GEOLOGÍA Y
CIVIL**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS:

**Análisis del efecto de la sobrecarga de fricción lateral en el
deterioro de curvas para la carretera con pavimento económico**

EMP. PE-26 B, Ayacucho, 2024

Para optar el título profesional de:

INGENIERO CIVIL

PRESENTADO POR:

Bach. Bryan Tarik URBINA GOMEZ

ASESOR:

MSc. Ing. Alex Sander IRCAÑAUPA HUAMANÍ

AYACUCHO - PERÚ

2025

Dedicatoria

A mis amados padres, por sus valiosas enseñanzas, que me han demostrado que la valentía es la llave para superar todos los retos y dificultades de la vida. A mis queridos abuelos, pilares fundamentales en cada paso que he dado y en todo lo que voy alcanzando. Mi gratitud a todos por su apoyo incondicional, perfectamente mantenido a través del tiempo, que ha sido mi fuerza y mi inspiración constante.

Agradecimientos

Expreso mi más sincero agradecimiento a quienes, desde el ámbito profesional y académico, contribuyeron significativamente a la realización de esta tesis.

A los docentes de la Escuela de Formación Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, por su invaluable orientación y la pasión demostrada en cada clase al transmitir sus conocimientos fundamentales.

Mi especial y profundo reconocimiento al Mg. Ing. Alex Sander Ircañaupa Huamani, asesor de esta tesis. Su sabiduría, inagotable dedicación y orientación constante no solo fueron pilares esenciales para la culminación exitosa de esta investigación, sino también una fuente de motivación y una amistad inigualable.

A los distinguidos miembros del jurado evaluador: el M.Sc. Ing. Dr. Ing. Hemerson Lizarbe Alarcón y el M.Sc. Ing. Moises Nico Barbaran Oriundo. Agradezco su minuciosa revisión, sus valiosas sugerencias y el compromiso con la excelencia académica, cualidades que elevaron significativamente la calidad final de este trabajo.

Finalmente, extendiendo mi gratitud a todos aquellos que me acompañaron en este arduo pero gratificante camino académico. Su respaldo, palabras de aliento y compañerismo constante fueron el motor que impulsó la perseverancia necesaria para alcanzar esta meta profesional.

Bryan Tarik Urbina Gómez

Resumen

La presente investigación evalúa la influencia de las características geométricas de curvas horizontales (velocidad de diseño y radio de curvatura) y la condición de adherencia interfacial sobre las deformaciones horizontales y esfuerzos cortantes que inducen mecanismos de deterioro en pavimentos económicos de la carretera Emp. PE26 B, Ayacucho. La metodología comprendió 32 simulaciones numéricas mediante elementos finitos en PLAXIS 3D, considerando velocidades de diseño entre 20 y 60 km/h, radios de curvatura de 15 a 125 m, y dos condiciones de adherencia interfacial ($R_{inter} = 1.0$ y 0.6) en un sistema bicapa conformado por micropavimento en frío sobre base estabilizada con cemento.

Los resultados revelaron que la velocidad de diseño afecta inversamente la capacidad de carga del pavimento, siendo la superficie de rodadura la localización más vulnerable. El análisis de regresión múltiple cuantificó que cada incremento de 10 km/h reduce el número de ejes equivalentes en 49 % en la interfaz, 75 % en la superficie y 6 % en la base. El radio de curvatura mostró un efecto protector significativo, incrementando la vida útil en 28 % (interfaz), 70 % (superficie) y 2 % (base) por cada 10 m adicionales. La adherencia interfacial deficiente ($R_{inter} = 0.6$) redujo los esfuerzos cortantes interfaciales en 29 % pero incrementó las deformaciones superficiales en 12 %, resultando en una disminución de 53 % en la vida útil de la superficie de rodadura.

Los tres modelos de regresión lineal múltiple desarrollados presentaron ajustes adecuados ($R^2 = 0.874-0.983$) y alta significancia estadística ($p < 0.001$ para todas las variables), permitiendo establecer ecuaciones predictivas para estimar la vida útil del pavimento en función de las condiciones geométricas y de adherencia. Se concluyó que la combinación de velocidades elevadas, radios pequeños y adherencia deficiente puede reducir la vida útil del pavimento hasta en 75 % respecto a condiciones de referencia, confirmando que estas variables son factores determinantes en la durabilidad de pavimentos flexibles en tramos curvos de carreteras de bajo volumen de tránsito en la región Ayacucho.

Palabras clave: Pavimento flexible, curvas horizontales, adherencia interfacial, elementos finitos, PLAXIS 3D, micropavimento, fuerzas de fricción lateral, vida útil, regresión múltiple, Ayacucho.

Abstract

This research evaluates the influence of geometric characteristics of horizontal curves (design speed and radius of curvature) and interlayer bonding condition on horizontal strains and shear stresses that induce deterioration mechanisms in low-cost pavements of the Emp. PE26 B highway, Ayacucho. The methodology comprised 32 numerical simulations using finite element method in PLAXIS 3D, considering design speeds between 20 and 60 km/h, radii of curvature from 15 to 125 m, and two interlayer bonding conditions ($R_{inter} = 1.0$ and 0.6) in a two-layer system consisting of cold micro-surfacing over cement-stabilized base.

Results revealed that design speed inversely affects pavement load capacity, with the wearing course being the most vulnerable location. Multiple regression analysis quantified that each 10 km/h increment reduces the number of equivalent axles by 49 % at the interface, 75 % at the surface, and 6 % at the base . The radius of curvature showed a significant protective effect, increasing service life by 28 % (interface), 70 % (surface), and 2 % (base) per each additional 10 m. Poor interlayer bonding ($R_{inter} = 0.6$) reduced interfacial shear stresses by 29 % but increased surface strains by 12 %, resulting in a 53 % decrease in wearing course service life.

The three multiple linear regression models developed showed excellent fits ($R^2 = 0.874\text{--}0.983$) and high statistical significance ($p < 0.001$ for all variables), enabling the establishment of predictive equations to estimate pavement service life as a function of geometric and bonding conditions. It was concluded that the combination of high speeds, small radii, and poor bonding can reduce pavement service life by up to 75 % compared to reference conditions, confirming that these variables are determining factors in the durability of flexible pavements on curved sections of low-volume roads in the Ayacucho region.

Keywords: Flexible pavement, horizontal curves, interlayer bonding, finite element method, PLAXIS 3D, micro-surfacing, lateral friction forces, service life, multiple regression, Ayacucho.

Índice general

Dedicatoria	I
Agradecimientos	II
Resumen	III
Abstract	IV
1. Planteamiento del problema	1
1.1. Descripción del problema	1
1.2. Delimitación del problema.	3
1.2.1. Espacial (geográfica).	3
1.2.2. Temporal.	4
1.2.3. Temática y unidad de análisis.	4
1.3. Formulación del problema.	5
1.3.1. Problema general.	5
1.3.2. Problemas específicos.	5
1.4. Justificación e importancia.	5
1.4.1. Justificación técnico-científica:	5
1.4.2. Justificación Económica:	6
1.4.3. Justificación Normativa y Metodológica:	6
1.4.4. Justificación Social y Práctica:	6
1.5. Limitaciones de la investigación.	7
1.6. Objetivos.	7
1.6.1. Objetivo general.	7
1.6.2. Objetivos específicos.	7
2. Marco teórico	9

2.1.	Antecedentes.	9
2.1.1.	Investigaciones internacionales.	9
2.1.2.	Investigaciones nacionales.	11
2.1.3.	Investigaciones Regionales	13
2.2.	Marco Normativo	13
2.2.1.	Normativa Nacional	13
2.2.2.	Normativa Internacional	13
2.3.	Bases teóricas.	13
2.3.1.	Geometría de curva y fuerzas aplicadas	13
2.3.1.1.	Dinámica del Movimiento Circular Aplicada al Diseño de Carreteras con peraltes	14
2.3.1.2.	Condiciones de Estabilidad	15
	Condición de Deslizamiento	15
	Condición de vuelco	16
	Aplicación en Manual de Carreteras: Carga horizontal de diseño	17
2.3.2.	Mecánica de pavimentos	18
2.3.2.1.	Esfuerzos, deformaciones y deflexiones de servicio y admisible	19
2.3.3.	Pavimentos económicos o de bajo volumen de tránsito	20
2.3.3.1.	Subbase granular	20
2.3.3.2.	Base granular – Mejoramiento de bases	22
2.3.3.3.	Mezclas asfálticas	22
2.3.4.	Pavimentos flexibles	23
2.3.4.1.	Metodologías de diseño	23
	Diseño de pavimentos asfálticos en vías con bajos volumen de tránsito	24
	Método AASHTO para diseño de pavimentos flexibles	24
2.4.	Marco conceptual.	24
2.4.1.	Diseño de pavimentos con AASTHO 1993 – Tratamiento superficial	24
2.4.1.1.	Periodo de diseño	26
2.4.1.2.	Variables de diseño	26
	Transito total W_{18}	26
	Módulo de resiliencia M_R	26
	Confiabilidad $\%R$	26
	Coeficiente estadístico de desviación estándar normal Z_R	26
	Desviación estándar combianda S_0	26
	Índice de serviciabilidad presente PSI	26

Número estructural propuesto <i>SNR</i>	27
2.4.2. Comportamiento a Fatiga de las Capas Bituminosas	27
2.4.3. Verificación Estructural de la Capa Bituminosa	28
2.4.4. Interpretación del Criterio de Fatiga y vida útil	29
2.4.5. Modelo de Elementos finitos (FEM)	29
2.4.5.1. Consideraciones para el Análisis de pavimentos con MEF . .	29
Geometría	29
Materiales	30
Condiciones de frontera y Modelado del Contacto	30
Cargas	30
Mallado del Modelo	31
2.4.6. Plaxis 2D y Plaxis 3D	31
2.4.6.1. Tensor de Deformaciones en el Método de Elementos Finitos	31
2.4.6.2. Deformaciones Normales	32
3. Método de la investigación	33
3.1. Método.	33
3.2. Orientación	33
3.3. Enfoque.	33
3.4. Instrumento de recolección de datos.	33
3.5. Tipo o alcance de la investigación.	34
3.6. Nivel de investigación.	34
3.7. Diseño de investigación.	34
3.7.1. Propósito de la investigación.	34
3.7.2. Número de mediciones.	34
3.8. Población y muestra.	35
3.8.1. Población	35
3.8.2. Muestra	35
3.9. Hipótesis.	35
3.9.1. Hipótesis general.	35
3.9.2. Hipótesis específicas.	35
3.10. Operacionalización de variables.	36
3.10.1. Variables.	36
3.10.2. Dimensiones.	36
3.10.3. Indicadores.	37
3.11. Técnicas e instrumentos.	38

3.11.1. Técnicas de recolección.	38
3.11.2. Instrumentos utilizados.	38
3.12. Desarrollo de trabajo de tesis.	38
3.12.1. Estructura de pavimento estudiada.	38
3.12.2. Estudio de sección típica de la carretera.	39
3.12.2.1. Dimensionamiento del nivel de daño en las capas del pavimento.	39
3.12.2.2. Contexto de la presente investigación.	40
3.12.3. Modelado de elementos finitos 3D de la estructura del pavimento.	41
3.12.4. Condiciones y supuestos para el cálculo - modelamiento.	42
3.12.5. Influencia de las tensiones tangenciales por la geometría curva	43
3.12.5.1. Resultados de modelamiento considerando tensión horizontal	44
3.12.5.2. Evaluación de la vida útil de la estructura	46
3.12.6. Influencia de las tensiones tangenciales en la interfaz.	47
3.12.6.1. Dimensionamiento del nivel de daño en la interfaz del pavimento.	49
3.12.6.2. Evaluación de la vida útil de la estructura	50
3.12.7. Influencia de las tensiones combinadas Vertical - Horizontal y condición de adherencia.	51
3.12.7.1. Evaluación de la vida útil de las capas de asfalto y su adherencia:	51
3.12.8. Analisis de caso de estudio.	54
4. RESULTADOS	57
4.1. Presentación de resultados	57
4.1.1. Resultados globales de las simulaciones	57
4.1.2. Resultados por variable independiente	58
4.1.2.1. Efecto de la velocidad de diseño y radio de curvatura	58
4.1.2.2. Efecto de la adherencia interfacial	62
4.1.2.3. Interpretación integrada de las figuras de resultados	64
Interpretación de gráficos	64
Caso de aplicación	64
Lectura crítica: efecto combinado de geometría y adherencia	65
4.2. Contrastación de hipótesis	65
4.2.1. Contrastación de la hipótesis general	65
4.2.2. Contrastación de las hipótesis específicas	66
4.2.2.1. Hipótesis específica 1	66

4.2.2.2.	Hipótesis específica 2	67
4.2.2.3.	Hipótesis específica 3	68
4.2.3.	Síntesis de la contrastación	70
4.2.4.	Análisis estadístico complementario	70
4.2.4.1.	Análisis de regresión múltiple	70
4.2.4.2.	Modelo de regresión para la interfaz MCP-BSC	71
4.2.4.3.	Modelo de regresión para la superficie de rodadura	72
4.2.4.4.	Modelo de regresión para la base de cimentación	72
4.2.4.5.	Síntesis del análisis estadístico	74
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	76
5.1.	Conclusiones	76
5.1.1.	Conclusión general	76
5.1.2.	Conclusiones específicas	77
5.1.2.1.	Conclusión específica 1: Influencia de la velocidad de diseño	77
5.1.2.2.	Conclusión específica 2: Influencia del radio de curvatura . .	78
5.1.2.3.	Conclusión específica 3: Influencia de la adherencia interfacial	79
5.1.3.	Conclusiones adicionales	80
5.1.3.1.	Validez y uso de los modelos predictivos	80
5.1.3.2.	Comparación de criticidad en las capas	80
5.2.	Recomendaciones	81
5.2.1.	Recomendaciones técnicas para el diseño y construcción	81
5.2.1.1.	Para el diseño y dimensionamiento de estructura	81
5.2.1.2.	Para la construcción y garantía de adherencia interfacial . .	82
5.2.1.3.	Para el mantenimiento y auscultación	83
5.2.2.	Recomendaciones para futuras investigaciones	83
5.3.	Consideraciones finales	85
Panel fotografico		89
Matriz		94
Modelamiento Plaxis 3D		96
Regresión Múltiple		112

Índice de tablas

1.	Cantidad de proyectos viales y longitud estimada en la región Ayacucho . . .	2
2.	Condiciones de deslizamiento en curvas	16
3.	Tipos de carreteras con IMDA menor a 300 vehículos	21
4.	Datos geométricos y mecánicos de la estructura del micropavimento	39
5.	Casos analizados para curvas convencionales y curvas de volteo.	40
6.	Comparación del desempeño estructural en el cimientto de la estructura. . . .	47
7.	Comparación del desempeño estructural en la superficie de la estructura. . .	47
8.	Comparación del desempeño estructural en interfaz con tensión tangencial. .	50
9.	Comparación del desempeño estructural según la condición de adherencia in- terfacial en la interfaz.	52
10.	Comparación del desempeño estructural según la condición de adherencia in- terfacial en la base	53
11.	Comparación del desempeño estructural según la condición de adherencia in- terfacial.	54
12.	Valores estimados para curvas convencionales con radios mínimos MTC . . .	55
13.	Valores estimados para curvas de volteo	55
14.	Efecto de la adherencia interfacial en el comportamiento mecánico	56
15.	Síntesis de resultados de esfuerzos cortantes interfaciales	57
16.	Síntesis de resultados de deformaciones horizontales superficiales	57
17.	Síntesis de resultados de deformaciones longitudinales base estructura	58
18.	Cálculo de ejes equivalente en función del radio y la velocidad ($R_{inter} = 1.0$) y su efecto en la interfaz	59
19.	Cálculo de ejes equivalente en función del radio y la velocidad ($R_{inter} = 1.0$) y su efecto en la superficie de rodadura	60
20.	Comparación de respuestas mecánicas según $R_{inter} = 0.6$	62

21.	Cálculo de ejes equivalente en función del radio y la velocidad ($R_{inter} = 0.6$) y su efecto en la superficie de rodadura	63
22.	Comparación de esfuerzos cortantes según adherencia interfacial	69
23.	Comparación de deformaciones según adherencia interfacial	69
24.	Verificación de hipótesis del modelo global y variables explicativas	70
25.	Resultados del análisis de regresión múltiple para $\ln(NE_i)$	71
26.	Tabla ANOVA para el modelo de regresión de $\ln(NE_i)$	71
27.	Resultados del análisis de regresión múltiple para $\ln(NE_{tc})$	72
28.	Tabla ANOVA para el modelo de regresión de $\ln(NE_{tc})$	72
29.	Resultados del análisis de regresión múltiple para $\ln(NE_{bc})$	73
30.	Tabla ANOVA para el modelo de regresión de $\ln(NE_{bc})$	73
31.	Comparación de modelos de regresión para las tres localizaciones	74

Índice de figuras

1.	Vista satelital y delimitación espacial de la zona de estudio	4
2.	Diagrama de fuerzas actuantes sobre el vehículo en una curva	15
3.	Modelo de un sistema elástico multicapa	19
4.	Huellas de las ruedas dobles y vista en planta del cuarto modelado de la calzada	41
5.	Vista en perspectiva del mallado de la estructura del pavimento en estudio. .	42
6.	Incidencia de deformación horizontal $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}$ en la base de la capa de cimentación para un eje de 80 kN.	43
7.	Valores de deformación horizontal ε_T en la superficie de la capa de rodadura	45
8.	Valores de deformación horizontal ε_L y ε_T en la base de la estructura.	46
9.	Valores de tensión cortante en la interfaz MCP - BSC	48
10.	Valores de tensión cortante en la interfaz, tensión normal y tangencial	49
11.	Valores de tensión cortante en la interfaz, tensión normal y tangencial	52
12.	Valores de tensión cortante en la interfaz, tensión normal y tangencial	53
13.	Valores de tensión cortante en la interfaz, tensión normal y tangencial	54
14.	Efecto de deterioro en la interfaz	59
15.	Efecto de deterioro en la superficie	61
16.	Efecto de deterioro en la superficie con $R_{inter} = 0.6$	63
17.	Deterioro en curva km 0+100 del tramo EMP.PE-26B con recapeo rutinario	89
18.	Capas estructurales de micropavimento deteriorado	89
19.	Deterioro en curva km 1+200 del tramo EMP.PE-26B	90
20.	Deterioro en curva km 4+900 del tramo EMP.PE-26B	90
21.	Deterioro en curva km 5+500 del tramo EMP.PE-26B	91
22.	Deterioro en curva km 5+050 del tramo EMP.PE-26B	91
23.	Deterioro en curva km 5+550 del tramo EMP.PE-26B	92
24.	Deterioro en curva km 6+300 del tramo EMP.PE-26B	92
25.	Deterioro en curva km 5+350 del tramo EMP.PE-26B	93

26.	Modelo PLAXIS 3D - Configuración del archivo	96
27.	Modelo PLAXIS 3D - Configuración del proyecto	96
28.	Asignación de propiedades generales a Micropavimento (MCP)	97
29.	Asignación de propiedades mecánicas a Micropavimento (MCP)	97
30.	Asignación de propiedades de interfaz a Micropavimento (MCP)	98
31.	Asignación de propiedades generales a Base suelo-cemento (BSC)	98
32.	Asignación de propiedades Mecánicas a Base suelo-cemento (BSC)	99
33.	Asignación de propiedades de interfaz a Base suelo-cemento (BSC)	99
34.	Asignación de propiedades generales a Subrasante (SRT)	100
35.	Asignación de propiedades mecánicas a Subrasante (SRT)	100
36.	Asignación de propiedades de interfaz a Subrasante (SRT)	101
37.	Asignación de materiales a estratos	101
38.	Pestaña Structures- asignación de cargas en area de contacto	102
39.	Pestaña Structures- asignación de volumen para optimización de malla en el area de contacto	102
40.	Pestaña Structures- asignación area de interfaz de contacto	103
41.	Pestaña Mesh- Refinamiento de malla en área de contacto	103
42.	Pestaña Mesh Output- Malla generada	104
43.	Pestaña Staged Construction- Creacion de etapas constructivas del modelo .	104
44.	Pestaña Staged Construction- Etapa Solo Carga vertical	105
45.	Pestaña Staged Construction- Etapa Solo Carga Horizontal	105
46.	Plaxis Output- Malla deformada Vs Carga Vertical	106
47.	Plaxis Output- Malla deformada Vs Carga Horizontal	106
48.	Plaxis Output- Malla deformada Vs Carga combinada	107
49.	Deformación unitaria cartesiana transversal ε_{xx}	107
50.	Deformación unitaria cartesiana longitudinal ε_{yy} vs FV	108
51.	Distribución de esfuerzo cortante horizontal σ_{zx} - Contornos de shadings . .	108
52.	Distribución de deformación unitaria longitudinal ε_{xx} - Sección Z = 0.00 . .	109
53.	Distribución de deformación unitaria transversal ε_{xx} - - Sección Z = -0.225 .	109
54.	Distribución de esfuerzo horizontal τ_{xz} - - Sección Z = -0.025	110
55.	Grafico de distribución de deformación unitaria longitudinal ε_{xx} - Sección Z = 0.00	110
56.	Grafico y componentes numericos de distribución de deformación unitaria lon- gitudinal ε_{xx} - Sección Z = 0.00	111

1. Planteamiento del problema

1.1. Descripción del problema

En los proyectos viales de bajo volumen de tránsito se emplean grandes volúmenes de materiales seleccionados para conformar tanto las superficies de rodadura como las capas estructurales del pavimento (subbase, base y carpeta). El correcto diseño de espesores y la adecuada calidad de los materiales tienen influencia directa en el costo inicial de la obra, en las necesidades de mantenimiento y en la vida útil del pavimento.

En la región Ayacucho, durante el año 2023 se programó la ejecución de 21 proyectos viales bajo diversas modalidades de gestión, con una longitud total estimada de 3 464.3 km, tal como se muestra en la Tabla 1. Esta magnitud de intervención evidencia la importancia de contar con criterios de diseño adecuados para asegurar el desempeño de la infraestructura.

En varios de estos proyectos se ha observado que los pavimentos económicos en particular el sistema bicapa micropavimentos, tratamientos superficiales y slurry seal presentan un deterioro más acelerado en los tramos curvos que en los tramos rectos. Este deterioro se manifiesta principalmente mediante fisuración y deformaciones en la superficie, asociadas a la geometría de las curvas (radio y peralte) y a la acción de fuerzas de fricción lateral.

A nivel internacional se ha demostrado que el comportamiento de los pavimentos en curvas horizontales difiere notablemente del de los tramos rectos. Petit et al., 2009 señalan que, en presencia de cargas horizontales, deben considerarse no sólo el agrietamiento por fatiga en la base de la estructura (bottom cracking), sino también el agrietamiento desde la superficie (top-down cracking) y el desprendimiento en la interfaz (interface debonding). De manera similar, Romanoschi y Metcalf, 2001 indican que la combinación de adherencia interfacial deficiente y fuerzas horizontales puede reducir la vida útil de pavimentos semirrígidos y flexibles en varios órdenes de magnitud en comparación con modelos que sólo consideran cargas verticales y interfaces perfectamente adheridas. Asimismo, Xu et al., 2010 muestran que el desprendimiento interfacial puede disminuir la vida a fatiga en más del 100 % en es-

estructuras semirrígidas, y Petit et al., 2009 destacan que, en el caso de capas delgadas como los micropavimentos, la fatiga de la interfaz se convierte en un modo de daño predominante.

Tabla 1: Cantidad de proyectos viales y longitud estimada en la región Ayacucho

Programa de gestión vial	Etapas del proyecto	N.º de proyectos	Longitud (km)
Mejoramiento con solución definitiva	Elaboración de expediente técnico / estudio definitivo	6	520.20
Proyecto PERÚ I (conservación por niveles de servicio y atención de emergencias)	En ejecución / programadas	5	564.00
Proyecto PERÚ II (mejoramiento, conservación por niveles de servicio y atención de emergencias)	En ejecución / programadas	8	2 038.50
Mantenimiento periódico (reciclado y recapeo)	En ejecución / programadas	2	341.60
Total		21	3 464.30

Por otro lado, la metodología AASHTO 1993, ampliamente utilizada en el Perú para el diseño de pavimentos de bajo volumen de tránsito MTC, 2013, fue desarrollada sobre una base empírica y se centra en los efectos de las cargas verticales, las propiedades de los materiales, la subrasante y el clima. En su formulación estándar no incorpora de manera explícita las fuerzas centrífugas ni las sobrecargas por fricción lateral presentes en las curvas, por lo que no diferencia entre secciones rectas y curvas en términos de deterioro estructural.

A pesar de la evidencia internacional sobre la importancia de las fuerzas horizontales y de la adherencia interfacial en el desempeño de los pavimentos, en el contexto peruano existe aún poca información sobre: (1) El efecto de la fricción lateral en curvas horizontales de carreteras de bajo volumen de tránsito. (2) La interacción entre geometría en planta (velocidad de diseño, radio de curvatura, peralte) y calidad de adherencia interfacial en pavimentos económicos tipo MCP sobre BSC.

Esta situación es especialmente relevante en la región Ayacucho, donde la topografía

accidentada favorece la presencia de curvas de radio reducido y pendientes pronunciadas, condiciones que pueden acelerar el deterioro de los pavimentos si no se consideran adecuadamente en el diseño estructural.

1.2. Delimitación del problema.

Esta investigación se enfoca al uso de un modelo numérico para el análisis del comportamiento estructural del pavimento en un modelado 3D considerando además de parámetros mecánicos del suelo, las cargas dinámicas y la geometría a las que se somete el pavimento económico en tramos curvos.

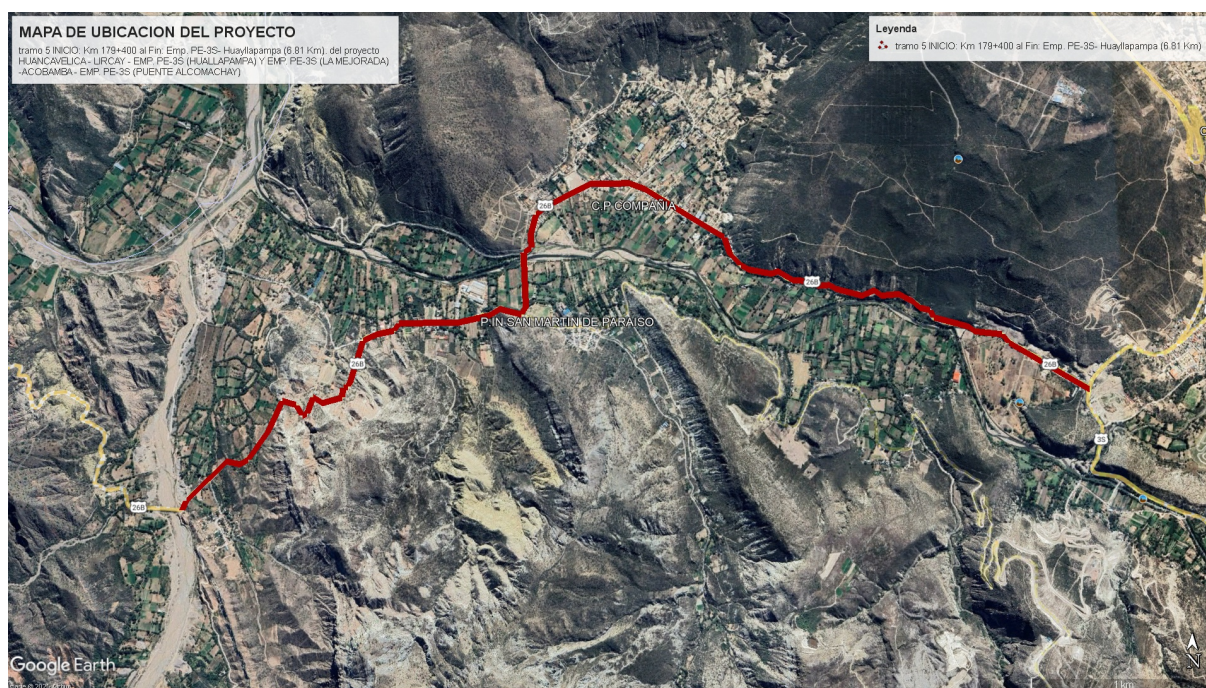
Por lo mencionado existe viabilidad en la investigación porque nos permite inspeccionar el estado elastoplástico de las capas estructurales del pavimentos económico. Así se podrá evaluar y llegar a conclusiones que ayude a mejorar el diseño de estos sectores curvos en función a la geometría y aplicación de carga.

1.2.1. Espacial (geográfica).

El desarrollo de la investigación se realizará en sectores curvos deteriorados de pavimentos económicos de la red vial nacional empalme PE-26 B, Ayacucho, entre los centros poblados de Compañía y Santiago de Pischa.

- **Región:** Ayacucho
- **Provincia:** Huamanga
- **Región:** Huayllapampa
- **Lugar:** Corredor Vial Huancavelica - Lircay - Emp. PE26 B (HUALLAPAMPA) en el tramo 5 INICIO: Km 179+400 al Fin: Emp. PE26 B- Huayllapampa (6.81 Km)

Figura 1: Vista satelital y delimitación espacial de la zona de estudio



Fuente: Elaboración propia

1.2.2. Temporal.

La presente investigación se circunscribe al periodo comprendido entre diciembre de 2024 y noviembre de 2025. En dicho intervalo se desarrollaron las actividades de recolección de información, procesamiento y modelamiento de los datos, así como la interpretación y el análisis de los resultados obtenidos, con el propósito de alcanzar los objetivos planteados en el estudio.

1.2.3. Temática y unidad de análisis.

En esta investigación se analizará la relación de la sobrecarga de fricción lateral con la deformación que sufren las capas estructurales del pavimento económico en una sectores curvos teniendo en cuenta la geometría de la curva.

- Temática:** La temática se desarrolla en el ámbito de la Ingeniería de Pavimentos y mecánica de pavimentos, enfocándose específicamente en el análisis del deterioro de pavimentos flexibles económicos a causa del efecto de las fuerzas de fricción lateral, mediante la aplicación de modelamiento numérico con el método de los elementos finitos.

- **Unidad de análisis:** La unidad de análisis de la presente investigación corresponde a los segmentos de pavimento económico ubicados en curvas del tramo 5 INICIO: Km 179+400 al Fin: Emp. PE26 B- Huayllapampa (6.81 Km).

1.3. Formulación del problema.

1.3.1. Problema general.

¿De qué manera las características geométricas de las curvas horizontales y la condición de adherencia interfacial influyen en la magnitud de las deformaciones horizontales y esfuerzos cortantes que inducen mecanismos de deterioro en la estructura del pavimento económico de la carretera Emp. PE26 B, Ayacucho, 2024?

1.3.2. Problemas específicos.

1. ¿En qué medida influye la velocidad de diseño en la magnitud de las deformaciones horizontales y esfuerzos cortantes en la estructura del pavimento en curvas de la carretera Emp. PE26 B, Ayacucho , 2024?
2. ¿En qué medida influye el radio de curvatura en la magnitud de las deformaciones horizontales y esfuerzos cortantes en la estructura del pavimento en curvas de la carretera Emp. PE26 B, Ayacucho , 2024?
3. ¿En qué medida la calidad de adherencia interfacial influye en la magnitud de las deformaciones horizontales y esfuerzos cortantes generados por fuerzas de fricción lateral en la estructura del pavimento en curvas de la carretera Emp. PE26 B, Ayacucho, 2024?

1.4. Justificación e importancia.

1.4.1. Justificación técnico-científica:

Los métodos tradicionales de diseño de pavimentos no consideran el efecto de las cargas horizontales generadas por la fricción lateral en curvas horizontales. (Petit et al. (2009)) demuestran que, en pavimentos sometidos a cargas horizontales significativas y repetidas, se presenta un tipo de daño denominado *fisuramiento longitudinal superficial (top-down cracking)*, el cual no es predicho por los métodos convencionales de diseño de pavimentos y se constituye como un proceso de daño primario distinto al evaluado tradicionalmente. Este fenómeno se agrava en pavimentos con capas superficiales delgadas, donde la interfase está

fuertemente solicitada al corte debido a su posición poco profunda, siendo particularmente relevante en pavimentos económicos, como los tratamientos superficiales empleados extensivamente en la red vial peruana de bajo volumen de tránsito.

1.4.2. Justificación Económica:

El impacto económico del deterioro prematuro en curvas es considerable. Los análisis de vida útil realizados por (Petit et al. (2009)) revelan que pavimentos diseñados para 20 años mediante criterios convencionales pueden experimentar falla por fatiga de interfaces en apenas 3 a 4 años cuando se encuentran en secciones curvas sometidas a fuerzas horizontales. Esta situación es crítica para carreteras con pavimentos económicos donde no se consideran este tipo de deterioro y presentando fallas prematuras aumentando así el costo de mantenimiento.

1.4.3. Justificación Normativa y Metodológica:

El Manual de Diseño Geométrico DG-2018 del Ministerio de Transportes y Comunicaciones establece que las curvas horizontales deben diseñarse considerando el peralte, donde el coeficiente de fricción lateral (f) varía entre 0.15 y 0.17 según la velocidad de diseño, con radios mínimos. Sin embargo, estos criterios se enfocan exclusivamente en la comodidad y seguridad del usuario, sin evaluar el efecto estructural de estas fuerzas sobre las capas del pavimento. Esta desconexión entre el diseño geométrico y estructural para tramos en curva representa un vacío metodológico que la presente investigación busca subsanar mediante el análisis integrado con elementos finitos, aportando criterios técnicos que eventualmente puedan incorporarse en las normativas nacionales de diseño de pavimentos.

1.4.4. Justificación Social y Práctica:

La carretera Emp. PE26 B atraviesa zonas de topografía accidentada en Ayacucho, caracterizadas por curvas horizontales con radios reducidos que maximizan las fuerzas de fricción lateral sobre el pavimento. El deterioro prematuro de estos tramos críticos no solo genera sobrecostos de mantenimiento para las entidades públicas, sino que además compromete la seguridad vial al reducir la adherencia neumático-pavimento precisamente en las zonas donde los conductores más la requieren.

1.5. Limitaciones de la investigación.

- **Limitaciones en la caracterización de materiales:** La caracterización integral de los materiales del pavimento en la carretera Emp. PE26 B demandaría la realización de ensayos de laboratorio especializados, como pruebas de módulo dinámico, fatiga en flexión y corte directo en interfaces. Sin embargo, debido a las limitaciones de recursos, equipamiento y tiempo, los parámetros empleados en esta investigación se fundamentan en valores teóricos reportados en la literatura técnica internacional.
- **Limitaciones en la validación experimental:** El modelo de elementos finitos desarrollado no cuenta con validación mediante mediciones de campo en la carretera Emp. PE26 B, tales como deflectometría (FWD), auscultación de deterioros o monitoreo de deformaciones instrumentadas a las solicitaciones indicadas. En consecuencia, los resultados obtenidos constituyen predicciones teóricas basadas en las hipótesis de comportamiento mecánico asumidas. Aunque el modelo se apoya en metodologías internacionalmente validadas, no incorpora las particularidades locales de la vía.
- **Limitaciones en la generalización de resultados:** Los resultados y conclusiones de esta investigación son estrictamente aplicables a pavimentos económicos con características similares a los modelados y bajo condiciones geométricas y de tráfico comparables. Los resultados constituyen un primer acercamiento al problema y requieren validación adicional mediante estudios experimentales y monitoreo de pavimentos en servicio antes de su aplicación generalizada.

1.6. Objetivos.

1.6.1. Objetivo general.

Evaluar mediante modelado con elementos finitos la influencia de las características geométricas de curvas horizontales y la condición de adherencia interfacial en los mecanismos de deterioro del pavimento económico de la carretera Emp. PE26 B, Ayacucho, 2024.

1.6.2. Objetivos específicos.

1. Determinar la influencia de la velocidad de diseño en la magnitud de las deformaciones horizontales y esfuerzos cortantes generados por fuerzas de fricción lateral en la estructura del pavimento en curvas de la carretera Emp. PE26 B, Ayacucho, 2024.

2. Determinar la influencia del radio de curvatura en la magnitud de las deformaciones horizontales y esfuerzos cortantes generados por fuerzas de fricción lateral en la estructura del pavimento en curvas de la carretera Emp. PE26 B, Ayacucho, 2024.
3. Evaluar la influencia de la calidad de adherencia interfacial en la magnitud de las deformaciones horizontales y esfuerzos cortantes generados por fuerzas de fricción lateral en la estructura del pavimento en curvas de la carretera Emp. PE26 B, Ayacucho, 2024.

2. Marco teórico

2.1. Antecedentes.

Para el presente trabajo de investigación no se han hallado trabajos de investigación en la aplicación de elementos finitos en lo referente de cálculo de deformaciones en pavimentos económicos en obras viales, pero si reportan trabajos similares en otras áreas como la construcción de represas, tratamiento de suelos de los cuales se detallarán a continuación:

2.1.1. Investigaciones internacionales.

(Petit et al., 2009), 2009 en su artículo científico: “Pavement Design for Curved Road Sections: Fatigue Performance of Interfaces and Longitudinal Top-down Cracking in Multilayered Pavements” , desarrolla mediante modelamiento numérico tridimensional con el software *Cast3M* que en secciones de pavimento sometidas a cargas horizontales significativas y repetidas, deben considerarse modos de falla específicos dentro del enfoque de diseño estructural, incorporando la verificación tanto de la *fatiga de interfaces* como del *fisuramiento longitudinal superficial (top-down cracking)*. Para ello, se analizaron tres estructuras típicas de pavimento flexible con diferentes niveles de tráfico y vida útil, definidas conforme al código francés de diseño de pavimentos, aplicando de manera independiente cargas verticales de 0.662 MPa y horizontales de 0.46 MPa con el fin de evaluar los distintos mecanismos de daño. Los resultados evidenciaron que los pavimentos diseñados para una vida útil de 20 años bajo criterios convencionales pueden fallar por fatiga de interfaces en apenas 3 a 4 años cuando se ubican en secciones curvas, y que la deformación entre capas ocurre tempranamente, mientras que el fisuramiento superficial aparece hacia los 15 años, en contraste con el agrietamiento convencional previsto a los 20 años. Asimismo, se observaron deformaciones transversales de hasta 169 μdef bajo cargas horizontales, superando el límite admisible de 100 μdef establecido para mezclas asfálticas tipo BBSG. Este antecedente resulta de especial relevancia para la presente investigación, pues establece

una base metodológica sólida que demuestra, de manera cuantitativa, que la fatiga de interfaces y el fisuramiento superficial constituyen mecanismos de deterioro predominantes en pavimentos ubicados en curvas, fenómenos que no son contemplados por los métodos convencionales de diseño estructural.

(Romanoschi y Metcalf, 2001), 2001 en su artículo científico: “Effects of interface condition and horizontal wheel loads on the life of flexible pavement structures”, tuvo como objetivo determinar los efectos de las condiciones de interfase y las cargas horizontales de las ruedas sobre la vida útil de pavimentos flexibles y semi-rígidos. Para ello, se desarrolló un modelo numérico mediante el método de los elementos finitos que incorporó los modelos mecánicos de interfase propuestos. Se calcularon los esfuerzos y deformaciones en estructuras típicas de pavimento, aplicando funciones de transferencia de serviciabilidad y agrietamiento con el fin de estimar la vida útil bajo distintas condiciones de adherencia entre capas y cargas horizontales. Los resultados demostraron que las cargas horizontales aplicadas sobre la superficie del pavimento generan incrementos significativos en las deformaciones tensionales tanto en la parte superior e inferior de la capa de rodadura como en la parte superior de la capa ligante. Este comportamiento explica la iniciación de fisuras en la superficie del pavimento y no en el fondo de la capa asfáltica, como se asume tradicionalmente. Asimismo, se observó que la combinación de condiciones de interfase inadecuadas con las fuerzas horizontales puede reducir la vida útil del pavimento hasta en 300 veces en estructuras semi-rígidas y 15 veces en estructuras flexibles. En estos últimos, las condiciones de adherencia entre las capas de rodadura y ligante modificaron notablemente el campo de deformaciones, incrementando las deformaciones verticales en la base granular y subrasante hasta en un 20 %. Este antecedente aporta evidencia del impacto determinante que ejercen las cargas horizontales y la calidad de la adherencia entre capas en la durabilidad estructural del pavimento, reafirmando la necesidad de considerar ambos factores en el diseño de pavimentos ubicados en curvas.

(Diakhate, 2007), 2007 en su tesis doctoral: “Fatigue et comportement des couches d'accrochage dans les structures de chaussée”, tuvo como objetivo investigar experimentalmente el comportamiento a fatiga de las capas de riego de liga en las interfaces entre capas de mezcla asfáltica, desarrollando un método para predecir la ley de fatiga del collage a partir de ensayos monotónicos de corte. Para ello, se diseñó y construyó un dispositivo de ensayo de doble cizallamiento (*Double Shear Test* – DST) de laboratorio, mediante el cual se aplicaron cargas de corte doble a especímenes simétricos compuestos por tres capas de concreto asfáltico utilizando una prensa hidráulica monoaxial. Para lo cual realizó ensayos monotónicos, oligocíclicos y de fatiga bajo control de fuerza, a temperaturas de 10 °C y 20 °C,

sobre interfaces BBTM/BBSG (mezcla asfáltica muy delgada sobre mezcla densa), con y sin capa de liga compuesta por emulsión catiónica de fraguado rápido con betún puro. Los resultados de los ensayos oligocíclicos y de fatiga aportaron evidencia concluyente respecto a la influencia de la capa de liga, demostrando que su ausencia reduce significativamente el desempeño a fatiga del riego de liga en la interfase. A partir de los resultados experimentales se propuso un método para predecir la ley de fatiga del riego de liga utilizando únicamente los datos obtenidos en los ensayos monotónicos de corte. Este estudio proporciona parámetros experimentales fundamentales para la modelación numérica con elementos finitos, estableciendo una metodología de caracterización de interfaces que puede ser adaptada al análisis de pavimentos económicos con tratamientos superficiales.

(Ambassa et al., 2013), 2013 en su artículo científico: “Fatigue life prediction of an asphalt pavement subjected to multiple axle loadings with viscoelastic FEM”, tuvo como objetivo desarrollar un modelo capaz de determinar la degradación de pavimentos bituminosos sometidos a cargas de tráfico generadas por ejes múltiples en movimiento, empleando el método de los elementos finitos viscoelásticos (*Viscoelastic Finite Element Method – VEM*). Para ello, se elaboró un modelo computacional que integró el enfoque VEM con un modelo multilínea de fatiga, aproximando el *Load Equivalent Factor* (LEF) en función del número de ejes incluidos dentro de un grupo determinado. En el caso de pavimentos flexibles, las predicciones de vida útil por fatiga se realizaron considerando tanto el modelo francés de diseño (*LCPC-SETRA*) como la ley de fatiga de interfaces desarrollada por Diakhate2011. Los resultados demostraron que el concepto tradicional de diseño basado únicamente en la optimización de capas bituminosas resulta insuficiente para representar de manera realista la degradación de las estructuras de pavimento. El fenómeno de esfuerzo cortante en las interfaces bituminosas debe incorporarse en las simulaciones de degradación tanto para pavimentos flexibles como para pavimentos asfálticos gruesos definidos en el código francés de diseño. Este antecedente evidencia la aplicabilidad del método de elementos finitos viscoelásticos para la predicción de la vida útil de pavimentos considerando múltiples mecanismos de falla, entre ellos la fatiga de interfaces, lo que sustenta su extensión al análisis de pavimentos económicos sometidos a cargas horizontales en curvas.

2.1.2. Investigaciones nacionales.

Luego de realizar una revisión exhaustiva de la literatura científica nacional, se ha identificado una notable carencia de investigaciones peruanas específicamente enfocadas en el análisis del efecto de fuerzas de fricción lateral sobre el deterioro de pavimentos en curvas horizontales mediante modelado con elementos finitos. Sin embargo se presentan metodologías

similares y validadas.

(Pezo López, 2022), en su tesis de maestría titulada "Uso combinado de geomalla y geotextil como refuerzo para pavimentos flexibles en suelos expansivos", desarrollada en la Universidad Ricardo Palma, analizó el comportamiento estructural de pavimentos mediante el método de elementos finitos utilizando el software Plaxis. El estudio se centró en determinar los estados de esfuerzos y deformaciones en pavimentos reforzados con geosintéticos sobre suelos expansivos. Se realizaron exploraciones de campo y ensayos de laboratorio en un tramo ubicado en el distrito de Morales, Región San Martín, identificando una subrasante crítica con valor de CBR de 2.09%. El autor empleó el modelo constitutivo de Mohr-Coulomb para el análisis por elementos finitos, evaluando diferentes escenarios de refuerzo mediante la aplicación de cargas axiales. Los resultados demostraron que el uso combinado de geomalla y geotextil genera un factor de reforzamiento de 1.25, mientras que la geomalla individual alcanzó un factor de 1.21, estableciendo que los geosintéticos mejoran significativamente la capacidad de soporte del pavimento. Esta investigación aporta metodología relevante para el análisis de pavimentos flexibles mediante elementos finitos en contextos geotécnicos complejos del territorio peruano, aunque su enfoque se limitó al análisis de cargas verticales sin considerar el efecto de fuerzas de fricción lateral en geometrías curvas.

(Aroni Salazar y Paredes Ávila, 2023), en su tesis "Análisis de cargas vehiculares para la determinación de las características estructurales de pavimentos rígidos por elementos finitos, Huancayo-2023", presentada en la Universidad Continental, realizaron un estudio del comportamiento de pavimentos rígidos utilizando modelado con elementos finitos. Los investigadores desarrollaron su trabajo mediante el análisis de diferentes tipos de cargas vehiculares y su efecto sobre la estructura del pavimento, empleando software especializado para la simulación numérica. El estudio se enfocó en evaluar los esfuerzos y deformaciones generados por el tránsito vehicular, estableciendo parámetros estructurales óptimos para el diseño de pavimentos de concreto en la región de Huancayo. Los autores implementaron un modelo computacional que permitió analizar el comportamiento mecánico del pavimento ante diferentes configuraciones de carga, validando los resultados mediante comparación con métodos analíticos tradicionales. Esta investigación contribuye al conocimiento sobre el uso de elementos finitos para el análisis estructural de pavimentos en el Perú, proporcionando un marco metodológico para la evaluación computacional de estructuras viales. Sin embargo, el estudio se limitó al análisis de pavimentos rígidos en tramos rectos, sin abordar el comportamiento en curvas horizontales ni el efecto específico de las fuerzas de fricción lateral sobre el deterioro del pavimento.

2.1.3. Investigaciones Regionales

No se encontraron investigaciones referentes al tema en la región de Ayacucho al momento de realizado la presente investigación.

2.2. Marco Normativo

2.2.1. Normativa Nacional

- Manual de Diseño Geométrico de Carreteras DG-2018 Comunicaciones, 2018
- Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos de Carreteras, 2013
- Manual de Carreteras: Especificaciones Técnicas EG-2013 MTC, 2013
- Pautas Metodológicas para el desarrollo de alternativas de pavimentos – MEF Finanzas, 2015

2.2.2. Normativa Internacional

- AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1993
- Método LCPC-SETRA (Francia) para diseño de pavimentos bituminosos
- ASTM D 244 – Ensayos de emulsiones asfálticas

2.3. Bases teóricas.

2.3.1. Geometría de curva y fuerzas aplicadas

Según Gimeno Aribau, 2004 en su investigación *Una nueva problemática: la renovación de líneas de alta velocidad* menciona que el peralte se define como la diferencia de cota entre las superficies de rodadura de los dos carriles de una vía dentro de una misma sección transversal a ella. El peralte ayuda a compensar y anular la fuerza centrífuga, pero como esta depende de la velocidad de circulación, estará en función del espectro de velocidades de circulación de la línea. Cada país en su normativa indica un valor de peralte máximo y uno mínimo para controlar la aceleración centrífuga sin compensar.

En otras palabras, cuando un vehículo gira en una curva, tiende a moverse hacia afuera de la curva debido a la fuerza centrífuga. El peralte de la carretera ayuda a contrarrestar esta fuerza inclinando la superficie de la carretera hacia el interior de la curva. Esto permite

que el vehículo viaje de manera más segura y cómoda a través de la curva sin desviarse hacia afuera.

2.3.1.1. Dinámica del Movimiento Circular Aplicada al Diseño de Carreteras con peraltes

Según Morales et al., 2014 en su investigación *La importancia de los sistemas de referencia para el peralte en el diseño geométrico de las carreteras* menciona que en el diseño de carreteras las curvas se diseñan con peralte para evitar que la fuerza centrípeta sea solamente la fuerza de fricción estática y si la rapidez del automóvil es correcta, el automóvil puede realizar el giro aun en una carretera con un coeficiente de fricción pequeño o cero entre los neumáticos y la carretera, por ejemplo, en una carretera con hielo o humedad.

Según Tomás et al., 2004 en su investigación *La estabilidad del vehículo en las curvas: Aspectos geométricos y su influencia en el coeficiente de seguridad* indica que la inestabilidad se halla cuando al tomar la curva el vehículo se halla constantemente cambiando de dirección. para contrarrestar dicho efecto, se dota a la curva de un peralte o inclinación transversal. Las fuerzas actuantes sobre el vehículo son las siguientes:

- **Peso del vehículo (P):** fuerza vertical aplicada en el centro de masas del móvil, c , generada como consecuencia de la fricción del campo gravitatorio terrestre. Puede expresarse en función de la aceleración de la gravedad, g , y la masa del vehículo, m :

$$P = m.g \quad (2.1)$$

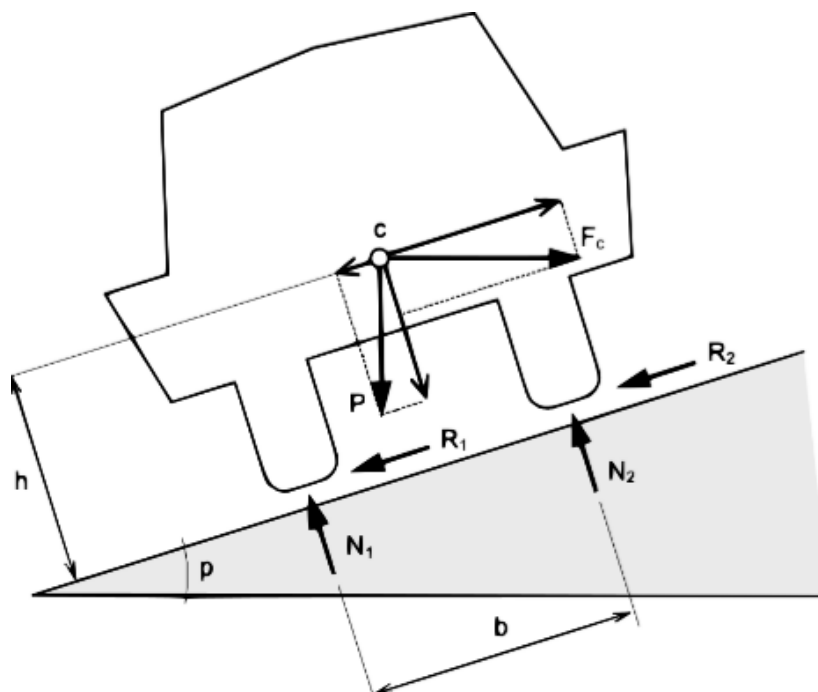
- **Fuerza centrífuga (F_c):** provocada por la variación en la dirección del vehículo dentro de la curva circular. Es proporcional a la aceleración normal, a_n , que depende de la velocidad a que circula el vehículo, v , y del radio de la curva. Su expresión matemática es la siguiente:

$$F_c = m.a_n = m.\frac{v^2}{r} \quad (2.2)$$

- **Fuerza de rozamiento (R):** fuerza pasiva producida por el contacto entre neumático y pavimento. Depende de la reacción normal a la superficie de contacto N y del coeficiente de resistencia al deslizamiento transversal, f_t . su expresión matemática es la siguiente:

$$R = f_t.N \quad (2.3)$$

Figura 2: Diagrama de fuerzas actuantes sobre el vehículo en una curva



Fuente: Extraído de La importancia de los sistemas de referencia para el peralte en el diseño geométrico de carreteras

2.3.1.2. Condiciones de Estabilidad

Según Tomás et al., 2004 en su investigación *La estabilidad del vehículo en las curvas: Aspectos geométricos y su influencia en el coeficiente de seguridad* indica que para evaluar la estabilidad del vehículo es necesario analizar dos casos diferenciados: la condición de deslizamiento y la condición de vuelco.

Condición de Deslizamiento

Según Tomás et al., 2004 en su investigación *La estabilidad del vehículo en las curvas: Aspectos geométricos y su influencia en el coeficiente de seguridad* indica que en este caso se estudia el movimiento del vehículo en el plano de rodadura, que coincide con la superficie del pavimento en contacto con el neumático. Planteando la ecuación de equilibrio de fuerzas en dicho plano, considerando la figura la Imagen 2.2.5 1 Diagrama de fuerzas actuantes sobre el vehículo en una curva.

$$F_c \cdot \cos p = R_1 + R_2 + P \cdot \sin p \quad (2.4)$$

Caso	Premisa	Condición de deslizamiento	Causas
Desplazamiento hacia el exterior	$p < \frac{v^2}{gr}$	$v^2 > rg.(p + f_t)$	-Velocidad excesiva -Peralte insuficiente -Baja adherencia
Desplazamiento hacia el interior	$p > \frac{v^2}{gr}$	$v^2 < rg.(p + f_t)$	-Peralte excesivo -Velocidad baja

Tabla 2: Condiciones de deslizamiento en curvas

Sustituyendo por las correspondientes expresiones equivalencia ya mencionadas citadas:

$$\frac{mv^2}{r} \cdot \cos p = f_t \cdot (N_1 + N_2) + mg \cdot \sin p \quad (2.5)$$

Cancelando la masa y multiplicando el radio en ambos lados de la ecuación, además que debido de la geometría y las dimensiones de los vehículos se considera ángulos pequeños se tiene que $\sin p \approx p$ y $\cos p \approx 1$

$$v^2 = rg \cdot (f_t + p) \quad (2.6)$$

Con dicha ecuación se entiende que la condición de deslizamiento dependerá de los valores adoptados por el peralte y la velocidad de circulación del vehículo, pudiéndose dar un desplazamiento del vehículo hacia el exterior de la curva, provocada por velocidad excesiva, por insuficiencia de peralte o por una baja adherencia neumático-pavimento, o por el contrario, un deslizamiento hacia el interior de la curva, ocasionado normalmente por un peralte excesivamente pronunciado.

Condición de vuelco

Según Tomás et al., 2004 en su investigación *La estabilidad del vehiculo en las curvas: Aspectos geométricos y su influencia en el coeficiente de seguridad* indica que el vuelco del vehículo tendrá lugar si el momento producido por las fuerzas desestabilizadoras o volcadoras supera el momento generado por las fuerzas estabilizadoras que actúan sobre él. Planteando el equilibrio de momentos respecto del centro de gravedad del vehiculó, se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{b}{2}(N_2 - N_1) = h \cdot (R_1 + R_2) \quad (2.7)$$

Teniendo en cuenta que la fuerza de rozamiento, R_i , puede expresarse en función de la normal

correspondiente, N_i , la anterior expresión de equilibrio puede describirse como:

$$\frac{b}{2}(N_2 - N_1) = f_t \cdot h \cdot (R_1 + R_2) \quad (2.8)$$

Los puntos críticos donde puede producirse este vuelco son aquellos donde se produce el contacto del vehículo con el firme, pudiéndose ocasionar vuelco hacia el exterior o hacia el interior de la curva. La condición de vuelco se producirá si el valor de cualquiera de las dos reacciones verticales (N_1 o N_2) se anulan totalmente, con lo cual la condición límite que se obtiene en ambos casos-vuelco hacia el exterior o vuelco hacia el interior de la curva es la siguiente:

$$f_t > \frac{b}{2h} \quad (2.9)$$

Aplicación en Manual de Carreteras: Carga horizontal de diseño

En el actual manual de carreteras: Diseño geométrico (Comunicaciones, 2018) se especifica los criterios, parámetros y valores con los que se deben proyectar alineaciones curvas y, por tanto, deben satisfacer la totalidad de las carreteras. En lo que respecta a dicho manual, son de utilidad los datos proporcionados por dicho manual acerca de los radios mínimos a adoptar en función de la velocidad, así como los valores a adoptar en peraltes y del máximo coeficiente de rozamiento transversal movilizado. El radio mínimo a adoptar depende directamente de la velocidad específica de la curva mientras que el valor del peralte viene condicionado por el radio de la curva horizontal al que se vincula, así como por la categoría asignada a la vía.

$$R_{\min} = \frac{V^2}{127(p_{\max} + f_{\max})} \quad (2.10)$$

De acuerdo a la condición de estabilidad del vehículo al pasar por un tramo curvo con peralte el manual establece la relación de radio mínimo, velocidad de diseño y peralte. Al presente se le multiplica por el peso o carga estándar para así determinar la fuerza aplicada en condiciones geométricas variadas.

$$F_H = W \cdot f_{\text{requerida}} = W \cdot \left[\frac{V^2}{127 \cdot R} - e \right] \quad (2.11)$$

donde:

- F_H = Fuerza Horizontal de Deterioro (kN)

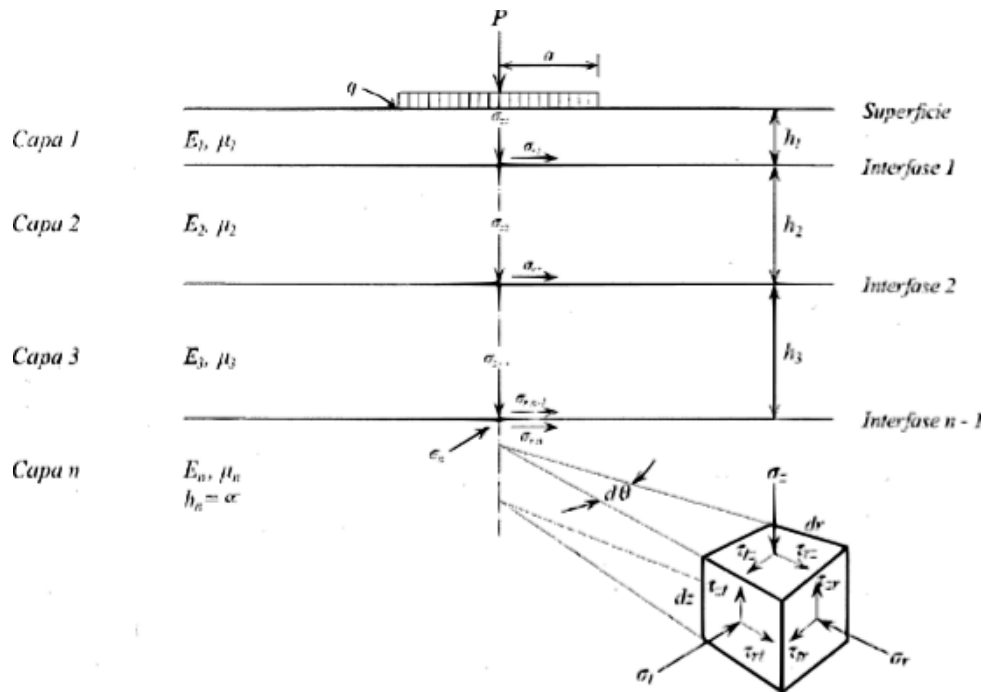
- W = Peso del vehículo (kN)
- V = Velocidad (km/h)
- R = Radio de curvatura (m)
- e = Peralte
- 127 = Constante que incluye g y conversión de unidades

2.3.2. Mecánica de pavimentos

Según Sandoval, 2007 en *Mecánica de pavimentos: principios básicos* menciona que en los últimos años el diseño y la construcción de los pavimentos han tenido cambios significativos en lo referente al diseño para lo cual se encarga estudiar el comportamiento interno del modelo estructural ante las sollicitaciones de las cargas en lo referente a los esfuerzos, deformaciones y deflexiones. Para el diseño del estado de esfuerzos y deformaciones de un sistema elástico multicapa se parte de las siguientes hipótesis:

- Las propiedades de cualquier punto de una capa son las mismas.
- Cada capa tiene su espesor definido excepto la última (subrasante), cuyo espesor se considera infinito.
- Todas las capas se consideran infinitas en sentido longitudinal.
- Todas las capas son homogéneas, isotrópicas y linealmente elásticas.
- En la interfase de las capas se desarrolla fricción entre ellas.
- Cada capa está definida por: el espesor, módulo de elasticidad y la relación de Poisson.

Figura 3: Modelo de un sistema elástico multicapa



Fuente: Extraído de principios of pavement desing

$$\tau_{rz} = \tau_{zr}; \tau_{rt} = \tau_{tr}; \tau_{tz} = \tau_{zt} \quad (2.12)$$

Dado el estado triaxial de esfuerzos de una elemento, las deformaciones pueden ser calculadas por las siguientes ecuaciones:

- Deformación vertical

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_r + \sigma_t)] \quad (2.13)$$

- Deformación radial

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - \mu(\sigma_t + \sigma_z)] \quad (2.14)$$

- Deformación tangencial

$$\varepsilon_t = \frac{1}{E} [\sigma_t - \mu(\sigma_r + \sigma_z)] \quad (2.15)$$

2.3.2.1. Esfuerzos, deformaciones y deflexiones de servicio y admisible

Según Sandoval, 2007 en *Mecánica de pavimentos: principios básicos* menciona que los esfuerzos, deformaciones y deflexiones se pueden determinar en cualquier punto del modelo estructural pero en el caos del diseño de las estructuras de pavimentos interesan algunos

puntos en especial para poder realizar los estudios y análisis correspondientes para controlar la fatiga, el ahuellamiento o deformación y la deflexión de los pavimentos. Los esfuerzos, deformaciones y deflexiones actuantes en una estructura de pavimento se denominan de servicio o críticos y deben ser menores a los esfuerzos, deformaciones y deflexiones admisibles para asegurar que el modelo estructural se comporte adecuadamente ante las solicitaciones de carga durante la vida de servicio del pavimento. De lo mencionado se debe cumplir:

$$\sigma_{servicio} < \sigma_{admisible} \quad (2.16)$$

$$\varepsilon_{servicio} < \varepsilon_{admisible} \quad (2.17)$$

$$\Delta_{servicio} < \Delta_{admisible} \quad (2.18)$$

2.3.3. Pavimentos económicos o de bajo volumen de tránsito

El ministerio de transporte y comunicaciones define en su manual : "Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos", (de Carreteras, 2013) distingue los caminos o carreteras pavimentadas con pavimentos flexibles, semirrígidos y rígidos en quince (15) rangos de acuerdo a los ejes equivalentes de demanda del proyecto para el periodo de diseño.

Los caminos o carreteras pavimentadas se consideran de bajo volumen de tránsito si el número de ejes equivalentes están comprendidos en el rango de 150 001 hasta 1 000 000 EE, en el carril y periodo de diseño.

Del mismo modo el Ministerio de Economía y Finanzas, en su artículo : "Pautas metodológicas para el desarrollo de alternativas de pavimentos en la formulación y evaluación social de proyectos de inversión pública de carreteras", (Finanzas, 2015) menciona las alternativas de pavimentación recomendadas para carreteras peruanas con IMDA menores a 300 vehículos.

2.3.3.1. Subbase granular

El MTC, 2013 en el manual de carreteras indica que la subbase es la capa ubicada debajo de la base de un pavimento. Su función principal es proporcionar un soporte adicional y mejorar la capacidad portante del suelo subyacente. La subbase ayuda a distribuir las cargas de tráfico de manera uniforme y a prevenir la deformación permanente del pavimento. También puede mejorar el drenaje y la estabilidad del pavimento.

Pavimento	Característica	IRI promedio en operaciones
Pavimento económico	Compuesto por capas granulares, con base estabilizada y una capa de rodadura bituminosa en frío como: tratamiento superficial bicapa, lechada asfáltica o mortero asfáltico, micropavimento en frío, macadam asfáltico, carpetas de mezclas asfálticas en frío, etc.).	4
Afirmado con protección	Afirmados tratados o suelos estabilizados con una capa de protección bituminosa (monocapa, lechada asfáltica, etc.).	5
Afirmado mejorado	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Afirmados con grava tratada con materiales como: asfalto, cemento, cal, aditivos químicos y otros. ▪ Suelos naturales estabilizados con asfalto, cemento, cal, aditivos químicos y otros 	7
Afirmado	Constituidos por una capa de revestimiento con materiales de cantera, dosificados naturalmente o por medios mecánicos (zarandeo), con una dosificación especificada, compuesta por una combinación apropiada de tres tipos de material: piedra, arena y finos o arcilla, siendo el tamaño máximo de 25 mm.	10

Tabla 3: Tipos de carreteras con IMDA menor a 300 vehículos

2.3.3.2. Base granular – Mejoramiento de bases

El MTC, 2013 en el manual de carreteras indica que la base es la capa del pavimento que se encuentra encima de la subbase y debajo de la capa de rodadura (o superficie de rodamiento). Su función principal es proporcionar un soporte estructural adecuado para la capa de rodadura y distribuir las cargas de tráfico de manera eficiente sobre la Subbase y el suelo de fundación. La base también ayuda a mejorar la resistencia al desgaste y la durabilidad del pavimento.

Por esta razón en diferentes análisis de carreteras se plantean o procedimientos de estabilización o mejoramientos a la capa de base de acuerdo a las exigencias y necesidades del proyecto. A continuación, se mencionarán las diferentes metodologías aplicadas para la estabilización de suelos para su uso como base.

2.3.3.3. Mezclas asfálticas

Según Lizcano y Quintana, 2015 en *Pavimentos materiales, construcción y diseño* menciona que los diversos tipos de mezclas asfálticas están conformadas por agregados pétreos con granulometría y requisitos mínimos de calidades diferentes. Asimismo, presentan diferencias en cuanto a su función dentro de la estructura de pavimento y al tipo de material asfáltico o ligante que utilizan. Las principales propiedades que se desean en las mezclas son:

- Resistencia bajo carga monotónica a tracción (estabilidad)
- Resistencia a la deformación permanentes
- Resistencia a fatiga
- Resistencia al deslizamiento
- Impermeabilidad
- Resistencia al envejecimiento
- Durabilidad
- Resistencia a las condiciones ambientales
- Trabajabilidad
- Economía

2.3.4. Pavimentos flexibles

Según Papagiannakis y Masad, 2024 en *Pavement design and materials* indica que los pavimentos flexibles típicamente constan de asfalto puesto por capas de base granular y sub base apoyadas en un suelo compactado referido a la sub rasante. Algunos pavimentos asfálticos consisten en un tratamiento superficies bituminoso, mientras que otras superficies de pavimentos con asfalto de menor resistencia son demasiado delgadas para ser considerado como pavimento flexible (combinación de capas de espesores menores que 15cm).

El termino flexible está relacionado con la manera en que este se construye. Idealmente la capa flexible transmite de manera uniforme los esfuerzos y no uniforme las deflexiones. En la practica la distribución de esfuerzos y deflexiones depende de la rigidez relativa de estas capas con respecto a las capas granulares subyacentes. Esta relación es mucho menor para mezclas asfálticas en comparación con el concreto portland lo que justifica la designación de flexible.

Los pavimentos flexibles son modelados como un sistema de capas elásticas con una infinita dimensión lateral. Estas capas descansan sobre la subrasante el cual es modelado como una capa elástica infinita en profundidad. La elasticidad implica que todas las capas del pavimento y la sub rasante pueden describirse a través de sus modulo de elasticidad (E) y su módulo de poisson (ν), además las capas son considerada como homogéneas y isotrópicas.

2.3.4.1. Metodologías de diseño

Según Montejo Fonseca, 1998 en *Ingeniería de pavimentos para carreteras* menciona que durante mucho tiempo se han utilizado métodos que tienen gran correlación experimental y considerable tiempo de uso para su verificación. Estos métodos suelen clasificarse en tres grupos:

- Métodos empíricos, se emplean factores de seguridad muy altos, lo que se aprecia espesores excesivos que no corresponde a las verdaderas necesidades de la vía en estudio.
- Métodos semiempíricos, basados en ensayos arbitrarios de laboratorio correlaciones con teorías mas o menos razonables. Entre estos se encuentran todos los basados en el ensayo CBR, Método de Hveem y el de Texas.
- Métodos racionales, basados en consideraciones teóricas sobre distribución de esfuerzos y deformaciones. Estos se encuentra el Navy, Shell e Instituto del Asfalto.

Diseño de pavimentos asfálticos en vías con bajos volumen de tránsito

Según Montejo Fonseca, 1998 en *Ingeniería de pavimentos para carreteras* menciona que el ministerio de transporte y comunicaciones ha preparado el manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con bajos volumen de tránsito en el cual ofrecen recomendaciones en relación con el diseño de pavimentos para vías rurales con escasos volúmenes de tránsito pesado, a partir de información básica que resulta accesible a las frecuentemente reducidas posibilidades de los organismos territoriales.

Método AASHTO para diseño de pavimentos flexibles

Según Montejo Fonseca, 1998 en *Ingeniería de pavimentos para carreteras* menciona que el comité de diseño de la AASHTO después de los resultados del AASHTO ROAD TEST en 1972 produce la “guía provisional AASHTO para el diseño de pavimentos rígidos y flexibles” en el cual se basaron los procedimientos de diseño existentes.

Después de haber sido utilizada por algunos años se éste se fue ajustando para que en 1986 se incorporen en la metodología de diseño nuevas consideraciones entre las que cabe mencionar la confiabilidad del diseño, los módulos de elasticidad de la sub rasante y las capas del pavimento, los factores ambientales de temperatura y humedad, el drenaje, aspectos económicos, procedimientos de diseño para la construcción por etapas y el conocimiento del diseño de tipo empírico.

2.4. Marco conceptual.

2.4.1. Diseño de pavimentos con AASTHO 1993 – Tratamiento superficial

De acuerdo al Manual de Carreteras, 2013 Sección suelos y pavimentos se ha optado para el dimensionamiento de las secciones del pavimento por los procedimientos más generalizados de uso actual en el país:

- Método AASHTO guide for Design of Pavement Structures 1993
- Análisis de la Performance o comportamiento del pavimento durante el periodo de diseño.

Papagiannakis y Masad, 2024 comenta en *Pavement design and materials* indica que una vista general sobre el origen y desarrollo del diseño de pavimentos flexibles con este método es una prueba histórica de rendimiento de pavimentos realizada a finales de la década de 1950 cerca de Ottawa, Illinois, a un costo de 27 millones de dólares. El análisis de regresión de datos generó las primeras relaciones empíricas entre el número de pasos de ejes hasta el fallo de la capacidad de servicio, las características estructurales y la configuración de ejes/carga. Estas relaciones se utilizaron para establecer los factores de equivalencia de carga (ESAL) y las primeras ecuaciones de diseño de pavimentos empíricos tanto para pavimentos flexibles como rígidos.

$$\log W_{18} = Z_R \cdot S_0 + 9.36 \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log \left[\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5} \right]}{0.4 + \frac{1094}{(SN+1)^{5.19}}} + 2.32 \log M_r - 8.07 \quad (2.19)$$

Donde:

- W_{18} : Numero de ESALs que resultará en un cambio de capacidad de servicio ΔPSI
- Z_R : Desviación estándar normal
- S_0 : Error estándar combinado de la predicción del tránsito y de la predicción del comportamiento
- ΔPSI : Diferencia entre el índice de servicio inicial P_0 y el final P_t
- M_r : Modulo resiliente de la subrasante
- SN : Numero estructural - $a_1 \cdot d_1 + a_2 \cdot d_2 \cdot m_2 + a_3 \cdot d_3 \cdot m_3$
- a_i : Coeficiente estructural de la capa i , el cual depende de la característica del material con que ella se construya
- d_i : Espesor de la capa i en pulgadas
- m_i : Coeficiente de drenaje de la capa i

El SN es un número abstracto que expresa la resistencia estructural de un pavimento requerido para una combinación dada de soporte del suelo M_r , del tránsito total W_{18} , de la serviciabilidad terminal y de las condiciones ambientales.

2.4.1.1. Periodo de diseño

El periodo de diseño a ser empleado para el presente manual de diseño para pavimentos flexibles será hasta 10 años para caminos de bajo volumen de tránsito, periodo de diseños por dos etapas de 10 años y periodo de diseño en una etapa de 20 años.

2.4.1.2. Variables de diseño

Transito total W_{18} En el número acumulado de ejes simples equivalentes a 18000lb (80 kN) para el periodo de diseño, corresponde al número de repeticiones de ejes equivalente 8.2t; el cual se establece con base en la información del estudio de tráfico.

Módulo de resiliencia M_R El módulo de Resiliencia M_R es una mitad de la rigidez del suelo de sub rasante, el cual para su cálculo deberá determinarse mediante el ensayo de resiliencia determinado de acuerdo a las recomendaciones del AASHTO.

Confiabilidad $\%R$ El método AASHTO incorpora el criterio de la confiabilidad $\%R$ que representa la posibilidad de una determina estructura se comporte durante su periodo de diseño, de acuerdo con lo previsto. Esta probabilidad esta en función de la variabilidad de los factores que influyen sobre la estructura del pavimento y su comportamiento; sin embargo, solicitudes diferentes a las esperadas, pueden reducir la vida útil prevista de un pavimento.

Para diseño por etapas según AASHTO se deben determinar las confiabilidades de cada etapa, teniendo en cuenta la confiabilidad total correspondiente a todo el periodo de diseño.

Coficiente estadístico de desviación estándar normal Z_R El coeficiente estadístico de desviación estándar normal Z_R representa el valor de la confiabilidad seleccionada para una distribución normal.

Desviacion estándar combianda S_0 La desviación estándar combinada S_0 es un valor que toma en cuenta la variabilidad esperada de la predicción del tránsito y de los dos otros factores que afectan el comportamiento del pavimento. Estos valores de incertidumbre pueden ser la construcción, medio ambiente, incertidumbre del modelo. La guía AASHTO recomienda para pavimentos flexibles valores entre 0.40 y 0.50.

Índice de serviciabilidad presente PSI El Índice de Serviciabilidad Presente es la comodidad de circulación ofrecida al usuario el cual varía entre 0 y 5. El valor de 5 refleja la

mejor comodidad teórica y por el contrario un valor de 0 refleja el peor.

- **Serviciabilidad inicial** P_i : condición de una vía recientemente construida.
- **Serviciabilidad final** P_T : condición de una vía que ha alcanzado la necesidad de algún tipo de rehabilitación o reconstrucción.

Número estructural propuesto SNR Los datos obtenidos y procesados se aplican a la ecuación de diseño AASHTO y se obtiene el Número Estructural, que representa el espesor total del pavimento a colocar y debe ser transformado al espesor efectivo de cada una de las capas que lo construirán, o sea de la capa de rodadura, de base y de sub base, mediante el uso de los coeficientes estructurales, esta conversión se obtiene aplicando la siguiente ecuación:

$$SN = a_1 \cdot d_1 + a_2 \cdot d_2 \cdot m_2 + a_3 \cdot d_3 \cdot m_3 \quad (2.20)$$

donde

- a_1, a_2, a_3 = coeficientes estructurales de las capas: superficiales bases y sub base, respectivamente
- d_1, d_2, d_3 = Espesores (centímetros) de las capas: superficiales bases y sub base, respectivamente
- m_1, m_2 = coeficientes de drenaje para las capas de superficiales de base y sub base, respectivamente

El numero estructural no tiene solución unica es decir existen muchas combinaciones de espesores de cada capa que dan una solución satisfactoria.

2.4.2. Comportamiento a Fatiga de las Capas Bituminosas

Las ecuaciones matemáticas desarrolladas para predecir la respuesta a fatiga de las mezclas asfálticas, tanto en condiciones de laboratorio como , se enfocan principalmente en establecer una relación entre el número de ciclos de carga hasta la falla (N) y variables como la deformación o el esfuerzo aplicado, la rigidez del material y su composición volumétrica. Sin embargo, una de las principales limitaciones de estos modelos radica en su incapacidad para predecir, mediante una sola ecuación, la deformación y/o el número de ciclos de falla que experimentará una mezcla asfáltica cuando se encuentra sometida simultáneamente a diferentes magnitudes de carga, variaciones de rigidez y condiciones ambientales. (Lizcano y Quintana, 2015)

En general, la respuesta a la fatiga de las mezclas bituminosas se caracteriza empíricamente mediante relaciones lineales representadas en diagramas logarítmicos, en los cuales se relaciona la deformación de tracción (ε_t), obtenida en ensayos de deformación controlada, o el esfuerzo de tracción (σ_t), en ensayos de esfuerzo controlado, con el número de ciclos de carga hasta la falla (N). Estas representaciones son conocidas como **leyes de fatiga**, y constituyen la base de numerosos modelos fenomenológicos o empíricos empleados para describir el comportamiento del material bajo cargas repetidas. (Lizcano y Quintana, 2015)

Esta curva puede representarse de forma general mediante la siguiente expresión:

$$\varepsilon = \varepsilon_6 \left(\frac{N}{10^6} \right)^b \quad (2.21)$$

donde:

- ε_6 : Deformación a la rotura para 10^6 ciclos de carga .
- b : Exponente de la ley de fatiga
- N : Número de repeticiones de carga hasta la falla por fatiga.

2.4.3. Verificación Estructural de la Capa Bituminosa

(Diakhate, 2007) centra su investigación en la representación general para la asignación de parámetros empleados en el diseño estructural de pavimentos bituminosos. Su estudio verifica la resistencia a fatiga mediante la expresión propuesta por el método francés del Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), la cual permite comparar la deformación máxima de cálculo con la deformación admisible del material. Dicha formulación incorpora factores de corrección por temperatura, frecuencia de carga y condiciones de obra, los cuales fueron determinados y calibrados a partir de ensayos experimentales en laboratorio.

$$\varepsilon_{hmax} \leq \varepsilon_6(10^\circ\text{C}, 25 \text{ Hz}) \left(\frac{E(10^\circ\text{C}, 10 \text{ Hz})}{E(15^\circ\text{C}, 10 \text{ Hz})} \right)^{0.5} \left(\frac{NE}{10^6} \right)^b \cdot k_r \cdot k_c \cdot k_s \quad (2.22)$$

donde:

- ε_{hmax} : Deformación máxima por tracción en la base de la capa bituminosa (obtenida del modelo numérico).
- $E(10^\circ\text{C}, 10 \text{ Hz})$, $E(15^\circ\text{C}, 10 \text{ Hz})$: Módulo complejo del material a diferentes temperaturas y frecuencias.

- NE : Número de ejes equivalentes que actúan durante la vida de diseño.
- k_r : Coeficiente de reparación o restablecimiento.
- k_c : Factor de espesor de la capa bituminosa.
- k_s : Coeficiente de sitio, que ajusta por condiciones ambientales y de obra.

2.4.4. Interpretación del Criterio de Fatiga y vida útil

La ecuación 2.22 permite determinar si la deformación máxima inducida por el tránsito es inferior al límite de fatiga del material. Cuando se cumple la desigualdad, la estructura del pavimento posee una vida útil compatible con el número de ejes proyectados. En caso contrario, se considera que el pavimento sufrirá agrietamiento prematuro por fatiga.

2.4.5. Modelo de Elementos finitos (FEM)

Según Cho et al., 1996 en su investigación *Considerations on Finite-Element Method Application in Pavement Structural Analysis* indica que El Modelo de Elementos finitos (MEF) es un procedimiento numérico utilizado para obtener una solución aproximada de estructuras de ingeniería bajo varios tipos de cargas y condiciones de frontera, generalmente utilizando la rigidez o formulaciones de energía.

La idea general del método de los elementos finitos es la división de un continuo en un conjunto de pequeños elementos interconectados por una serie de puntos llamadas nodos que se muestra en la figura:

Emplear el MEF permite mayor precisión en las respuestas mecánicas de un pavimento dado que permite considerar diferentes tipos de análisis, área de contacto llanta-pavimento, la influencia de la velocidad y la temperatura en las respuesta del pavimento y la influencia de la fricción entre las capas del pavimento.

2.4.5.1. Consideraciones para el Análisis de pavimentos con MEF

Geometría Como se describe Manual, 2012 en el manual de Abaqus 6.11 , el análisis de estructuras de pavimentos mediante el MEF se debe especificar el espacio que en que residirá la estructura dado que pueden ser asignadas tres tipos de espacios de modelado: tridimensional (3D), plano bidimensional (2D) y eje de simetría. El enfoque 3D permite definir una estructura en las dimensiones espaciales X,Y,Z siendo posible modelar geometrías o áreas de contacto llanta-pavimento complejas; EN el caso 2D se define la geometría del

modelo en el plano X-Y, asumiendo que las deformaciones y esfuerzos normales y de corte fuera del plano son iguales a cero; en el caso de eje de simetría se asume que el modelo puede ser representado en coordenadas polares cilíndricas, las coordenadas radiales y axial.

Materiales Reyes Lizcano, 2003 menciona que el análisis de pavimentos mediante elementos finitos puede utilizar diferentes materiales en una simulación siendo posible asignar varias propiedades mecánicas al modelo. Los pavimentos al componerse de distintas capas de materiales exigen que se conozcan sus propiedades mecánicas con el fin de entender su posible respuesta bajo cargas vehiculares y ambientales.

Condiciones de frontera y Modelado del Contacto Al utilizar un software de elementos finitos para modelar una estructura de pavimentos se deben analizar los grados de libertad que posee la estructura con el fin de representar de forma realista las condiciones de campo dentro software. Las condiciones de frontera en una estructura típica de pavimento rígido donde se observa que la subrasante se opone al desplazamiento vertical y a la rotación (empotrado), no obstante los lados laterales de la losa de concreto perpendiculares a la dirección del tráfico están libres, esto con el fin de simular la condición real en la que se permiten la contracción y la expansión del concreto.

Cargas Como sugiere Leiva Padilla et al., 2011, en análisis de pavimentos mediante elementos finitos las cargas son asumidas como estáticas o dinámicas, la primera asume el contexto más desfavorable para un pavimento dado que la carga máxima de un eje o vehículo está siendo aplicada por otra parte, para un análisis realista las cargas deberían ser dinámicas (dependientes del tiempo). La dependencia del tiempo puede ser relacionada con la duración de aplicación de la carga, la duración puede ser calculada como en, siendo la duración dependiente de la velocidad del vehículo y del radio de contacto de la llanta (valor medio de la cara de la llanta en contacto con el pavimento). Cabe mencionar que las cargas dinámicas permiten considerar la respuesta dependiente del tiempo de una mezcla asfáltica.

$$d = \frac{12.a}{s} \quad (2.23)$$

donde:

- d : duracion de la carga
- a : radio de contacto de la llanta
- s : velocidad del vehículo

Sun et al., 2018 investigaron el efecto de las llantas de un camión mediante un modelo 3D y un análisis dinámico, los resultados indicaron que la capa de rodadura no es únicamente sometida a esfuerzos verticales sino tangenciales, por lo tanto, un análisis de las capas superficiales de un pavimento debería considerar el complejo estado de esfuerzos de contacto llanta-pavimento.

Mallado del Modelo Li et al., 2018 comenta que el mallar o discretizar consiste en dividir el modelo en subregiones con dimensiones específicas que deben ser determinadas. Un análisis de sensibilidad consiste en establecer el tamaño de los elementos de las subregiones, teniendo en cuenta el balance entre el tiempo de cálculo, la demanda computacional y la precisión en los resultados [59]

2.4.6. Plaxis 2D y Plaxis 3D

Como menciona Camargo y Gonzales, 2011, PLAXIS es un programa de ordenador de elementos finitos bidimensionales diseñado específicamente para la realización de análisis de deformación y estabilidad de problemas geotécnicos. Las situaciones modelables corresponden a problemas de deformación plana o con axisimetría. El programa utiliza una interfaz gráfica que permite a los usuarios generar rápidamente un modelo geométrico y una malla de elementos finitos basada en una sección transversal vertical representativa del problema que se trate. Plaxis comenzó su desarrollo en la Universidad Técnica de Delft en 1987, el objetivo inicial era desarrollar un código de elementos finitos de uso sencillo para analizar el comportamiento de los diques y terraplenes construidos sobre los suelos blandos de los ríos de Holanda. En los años siguientes, Plaxis creció para cubrir otras áreas de la ingeniería geotécnica hasta conseguir formar en 1993, debido a sus continuas actividades de crecimiento, una compañía llamada Plaxis BV.

2.4.6.1. Tensor de Deformaciones en el Método de Elementos Finitos

En el análisis mediante el Método de Elementos Finitos (MEF), las deformaciones son representadas mediante un tensor que relaciona los cambios en la geometría del material con el campo de desplazamientos. Según PLAXIS, 2023 (Bentley Systems, 2023), el tensor de deformaciones puede expresarse como una matriz en coordenadas cartesianas:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Las componentes de deformación se calculan a partir de las derivadas espaciales de los desplazamientos, según la expresión general:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.25)$$

donde i y j representan las direcciones coordenadas x , y o z , y u_i corresponde a los componentes del vector desplazamiento (u_x, u_y, u_z) .

2.4.6.2. Deformaciones Normales

Las **deformaciones normales** $(\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz})$ representan los cambios en la longitud de los elementos infinitesimales del material en las direcciones x , y y z , respectivamente. Estas deformaciones se calculan a partir de las derivadas parciales de los desplazamientos:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x}, \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y}, \quad \varepsilon_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad (2.26)$$

donde u_x , u_y y u_z son los componentes del vector desplazamiento en las direcciones x , y y z , respectivamente. Siendo la Convención de signos:

- Valores **positivos** indican una *extensión* o elongación del elemento.
- Valores **negativos** indican una *compresión* o acortamiento.

3. Método de la investigación

3.1. Método.

El método de investigación es cuantitativo, centrado en el análisis numérico de las deformaciones y esfuerzos que ocurren en un pavimento asfáltico. Para llevar a cabo este análisis, se utiliza el software PLAXIS 3D bajo diferentes condiciones de geometría y adherencia interfacial.

3.2. Orientación

La investigación tiene una orientación aplicada, dado que busca identificar un problema real: el deterioro prematuro por fricción lateral en curvas de una carretera específica (Emp. PE26 B, Ayacucho). El estudio no se limita a la descripción teórica, sino que aplica herramientas de simulación computacional para evaluar comportamientos mecánicos y estructurales del pavimento.

3.3. Enfoque.

El enfoque de la investigación es cuantitativo, porque se fundamenta en la obtención de datos numéricos (deformaciones, tensiones cortantes y NE) y en el análisis comparativo de resultados derivados del modelamiento numérico.

3.4. Instrumento de recolección de datos.

Los datos se obtienen a partir de los resultados de simulaciones numéricas

- **Software:** PLAXIS 3D (versión profesional)
- **Método numérico:** Elementos Finitos (FEM)

- **Modelo constitutivo:** Linear Elastic
- **Datos obtenidos:** Campos de deformaciones y esfuerzos en toda la estructura

3.5. Tipo o alcance de la investigación.

La investigación es de tipo explicativo y de alcance correlacional, pues busca explicar la relación entre variables geométricas (velocidad y radio de curvatura) y las respuestas mecánicas (deformaciones, esfuerzos cortantes) en condiciones de diferente adherencia interfacial.

3.6. Nivel de investigación.

El nivel corresponde a una investigación de tipo experimental simulada, ya que reproduce condiciones de carga y geometría en un entorno virtual mediante modelación con elementos finitos. Los resultados permiten inferir comportamientos estructurales en condiciones reales.

3.7. Diseño de investigación.

3.7.1. Propósito de la investigación.

Determinar cómo las características geométricas de curvas horizontales (velocidad de diseño, radio de curvatura) y la adherencia interfacial influyen en la magnitud de las deformaciones horizontales y esfuerzos cortantes en el pavimento económico de la carretera Emp. PE26 B.

3.7.2. Número de mediciones.

Se realizarán 32 simulaciones numéricas independientes, distribuidas en dos grupos:

- **Grupo A:** curvas convencionales (4 radios \times 2 Rinter = 8 casos)
- **Grupo B:** curvas de volteo (12 radios \times 2 Rinter = 24 casos)
- **Mediciones puntuales** tensiones y deformaciones
- **Deformaciones** ε_x , ε_y (2 variables)
- **Esfuerzos** τ_{xy} (1 variables)

3.8. Población y muestra.

Según Hernández-Sampieri y Mendoza Torres, 2018 indica que la delimitación de población esta compuesto de un conjunto con casos de características similares, y la muestra es un elementos del conjunto identificado.

3.8.1. Población

La población está conformada por todas las curvas horizontales de la carretera Emp. PE26 B que presentan características geométricas típicas de carreteras de bajo volumen de tránsito en la región Ayacucho.

3.8.2. Muestra

La muestra corresponde a 16 configuraciones geométricas representativas, seleccionadas según velocidad de diseño (30–50 km/h) y radio de curvatura (20–125 m). Estas se agrupan en curvas convencionales y curvas de volteo, modeladas con dos condiciones de adherencia interfacial.

3.9. Hipótesis.

Según Hernández-Sampieri y Mendoza Torres, 2018 define hipótesis como lo que se pretende probar y define como una explicación exiguo, indicando que surgen de la revisión de la bibliografía y que son respuestas a los problemas planteados.

3.9.1. Hipótesis general.

Las características geométricas de curvas horizontales (velocidad de diseño y radio de curvatura) y la condición de adherencia interfacial influyen significativamente en la magnitud de las deformaciones horizontales, esfuerzos cortantes y en la vida útil expresada en número de ejes equivalentes (NE) del pavimento flexible de la carretera Emp. PE26 B, Ayacucho.

3.9.2. Hipótesis específicas.

- A mayor velocidad de diseño, mayores son las deformaciones horizontales y esfuerzos cortantes interfaciales, manteniendo constantes el radio y la adherencia.

- A menor radio de curvatura, mayores son las deformaciones horizontales y esfuerzos cortantes interfaciales, manteniendo constantes la velocidad y la adherencia.
- A menor adherencia interfacial mayores son las deformaciones horizontales y esfuerzos cortantes, manteniendo constantes la velocidad y el radio.

3.10. Operacionalización de variables.

3.10.1. Variables.

Existen básicamente dos variables que participan de todo proceso de investigación conocidas como; variables independientes y dependientes.

- **Variables independientes (X):** Parametros de geométricos de curvas y la condición de adherencia interfacial. Factores que el investigador manipula o controla para observar su efecto en otra variable.
- **Variable dependiente(Y):** Mecanismos de deterioro, respuesta estructural del pavimento ante las cargas, medida como el nivel de esfuerzo o deformación generados. Factor que el investigador mide y se espera que sea afectado por la manipulación de la variable independiente.

3.10.2. Dimensiones.

Las dimensiones representan subdivisiones de un concepto o variable que permiten analizarla de manera más precisa y detallada.

- **Variables independientes (X): Parametros de geométricos de curvas y la condición de adherencia interfacial**
 - **Dimensión 01:**Velocidad de diseño refiere a la máxima velocidad segura y confortable que un vehículo puede mantener sobre un tramo específico de la carretera. En el contexto idealizado del modelo refiere a la velocidad seleccionada para el diseño geométrico, que determina la magnitud de la fuerza centrífuga..
 - **Dimensión 02:**Radio de Curvatura Radio de la curva horizontal, que determina la intensidad de la fuerza centrífuga y la clasificación de la curva.
 - **Dimensión 03:**Adherencia Interfacial Se define como la fuerza de unión o cohesión que existe entre dos capas distintas de materiales en un pavimento. Se resalta

que para lograr una buena adherencia, se requiere una aplicación adecuada de una capa de imprimación y la correcta preparación de la superficie.

■ **Variable dependiente(Y): Mecanismos de deterioro**

- **Dimensión 01:** Deformación transversal y longitudinal en la superficie de capas $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}$ se define como la deformación unitaria (ε) el cual es una medida adimensional del cambio relativo en la forma o el tamaño de un cuerpo debido a la aplicación de esfuerzos (fuerzas).
- **Dimensión 02:** Esfuerzos cortantes τ_{xy} se define como el esfuerzo máximo resultante debido a la aplicación de esfuerzos (fuerzas) en la superficie de la estructura.
- **Dimensión 03:** Número de Ejes equivalentes de carga en condiciones de fatiga se define como el número de repeticiones de ejes equivalentes para determinar la vida útil del pavimento por fatiga, para el modelamiento analizaremos los casos de fatiga de fondo o fatiga de la parte inferior (NE_{bc}), grietas longitudinales de arriba hacia abajo (NE_{tc}) y Desadhesión o Despegue de interfaz (NE_i).

3.10.3. Indicadores.

Elementos que pueden medirse directamente de la realidad.

■ **Indicadores Independientes**

- **Velocidad nominal** [Simbolo(V), Unidad(km/h), Escala medición(Razón)]
- **Radio de curvatura** [Simbolo(R), Unidad(m), Escala medición(Razón)]
- **Coef. reducción interfacial** [Simbolo(R_{inter}), Unidad(-), Escala medición(-)]

■ **Indicadores dependientes**

- **Deformación transversal superficial** [Simbolo(ε_{xx}), Unidad(μ), Escala medición(Razón)]
- **Deformación longitudinal** [Simbolo(ε_{yy}), Unidad(μ), Escala medición(Razón)]
- **Esfuerzo cortante interfacial** [Simbolo(τ_{xy}), Unidad(kN/m²)]
- **Número de Ejes equivalentes de carga en condiciones de fatiga** [Simbolo(NE), Unidad(-)]

3.11. Técnicas e instrumentos.

3.11.1. Técnicas de recolección.

- **Modelado y Simulación Numérica** La técnica utilizada es la simulación numérica, basada en el método de los elementos finitos (FEM), que permite cuantificar los esfuerzos y deformaciones en distintas configuraciones del pavimento.
- **Revisión Documental (para Inputs)** Utilizada para recopilar los parámetros de entrada del modelo (MTC, propiedades de materiales, carga estándar del eje).

3.11.2. Instrumentos utilizados.

- **Software de Elementos Finitos (PLAXIS 3D)** LEs el instrumento principal para construir el modelo, aplicar las cargas y obtener los resultados de esfuerzo y deformación.
- **Hoja de Cálculo (Excel)** Instrumento auxiliar para la preparación de las cargas de entrada (P_h , P_v) y para el procesamiento y análisis de los resultados de las 32 simulaciones frente al cálculo de vida útil del pavimento.
- **Manual de Diseño Geométrico MTC-2018 y Manual de Suelos y Pavimentos MTC:** instrumentos normativos para la definición de parámetros de diseño y carga..

3.12. Desarrollo de trabajo de tesis.

La presente investigación se centra en determinar los efectos que las fuerzas horizontales pueden tener sobre pavimentos de espesores reducidos en tramos curvos para ello se analiza la estructura del pavimento y su comportamiento respecto a la fatiga producida entre sus capas.

3.12.1. Estructura de pavimento estudiada.

En el Perú, el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), a través de sus Manuales de Carreteras, establece diversas estructuras tipo de pavimentos con espesores predefinidos para cada categoría vial. Sin embargo, en el caso de los pavimentos económicos, como el micropavimento, los espesores no se encuentran completamente normados, sino que se han estandarizado empíricamente en la práctica de diseño y construcción, basándose en la experiencia técnica.

La estructura de pavimento analizada se conforma por una subrasante natural, sobre la cual se dispone una capa de base estabilizada con suelo-cemento de 0.20 m de espesor. Sobre esta base se aplica un imprimante asfáltico con el propósito de mejorar la adherencia interfacial entre capas. Finalmente, se coloca la capa de rodadura, compuesta por un micropavimento de espesor mínimo de 25 mm, que actúa como superficie de contacto con el tránsito vehicular. Las características mecánicas y geométricas adoptadas para el modelamiento se detallan en la **tabla 4** las cuales fueron extraídas de literatura confiable.

Tabla 4: Datos geométricos y mecánicos de la estructura del micropavimento

Capa	Material	e (mm)	E (MPa)	ν
Rodadura	MCP	25	2 500	0.35
Base estabilizada	BSC	200	3 100	0.25
Subrasante	SRT	>200	100	0.35

Fuente: Elaboración propia.

3.12.2. Estudio de sección típica de la carretera.

Para el modelamiento en elementos finitos 3D se deberá analizar la estructura del pavimento sometida al impacto de un eje equivalente. Cabe recordar que la carga introducida por la rueda se modelará con una presión vertical de 80kips equivalentes a 0.56MPa distribuida sobre un área efectiva de contacto de radio 150mm aproximadamente en un equivalente cuadrado de lado 267.26mm.

En lo que respecta al modelado del comportamiento de la interfaz entre capas de material, el método de los elementos finitos permite representar distintas condiciones de contacto, que van desde la adherencia perfecta hasta el deslizamiento parcial o total entre superficies.

3.12.2.1. Dimensionamiento del nivel de daño en las capas del pavimento.

En esta etapa del análisis es importante resaltar que, en los pavimentos económicos, el diseño estructural se centra principalmente en la capa de base estabilizada, la cual constituye el elemento portante fundamental del sistema. Los métodos de diseño más empleados para este tipo de estructuras son el NAASRA y el USACE, que se basan en criterios empíricos y de desempeño.

En consecuencia, el presente análisis se enfoca en verificar la respuesta estructural y la resistencia interfacial entre las capas del pavimento, tomando como criterio determinante la deformación horizontal. Dicha deformación representa el parámetro más crítico, ya que su

incremento puede inducir fallas por fatiga debido a la flexión repetida de las capas asfálticas. Por tal motivo, no se consideran las deformaciones verticales. El diseño tiene como objetivo determinar el número de ejes equivalentes, denominado NE y a partir de este cuantificar el nivel de deterioro o daño al pavimento.

3.12.2.2. Contexto de la presente investigación.

El presente concepto de fatiga es aplicable en zonas donde el paso repetidos de vehículos pesados reproduce el deterioro en el pavimento. Por ello se considera tramos curvos donde la fuerza tangencial aplicada a la superficie de la calzada se considera representativa de la fuerza centrífuga. Para este estudio se seleccionaron los casos presentados en la **Tabla 5**

Tabla 5: Casos analizados para curvas convencionales y curvas de volteo.

GRUPO A: CURVAS CONVENCIONALES			
Caso	V (km/h)	R (m)	Clasificación
A1	30	30	R_{\min} baja velocidad
A2	40	50	R_{\min} media-baja
A3	50	85	R_{\min} media
A4	60	125	R_{\min} media-alta
GRUPO B: CURVAS DE VOLTEO			
Caso	V (km/h)	R (m)	Clasificación
B1	20	15	Volteo muy cerrado
B2	20	25	Volteo cerrado
B3	20	40	Volteo amplio
B4	25	15	Muy crítico
B5	25	25	Moderado
B6	25	40	Amplio
B7	30	20	Más crítico
B8	30	30	Típico volteo
B9	30	45	Volteo amplio
B10	35	25	Crítico alta
B11	40	30	Límite superior
B12	40	50	Transición

Fuente: Elaboración propia en base a parámetros geométricos de diseño MTC (2018).

Cabe destacar también que se considera una masa del eje 8.2tn (aproximadamente 80kN) el cual se distribuye simétricamente entre las dos ruedas dobles. En efecto, durante el movimiento del vehículo pesado, una de las ruedas dobles puede ejercer una carga de 40kN. Del mismo modo cada rueda ejerce una componente de fuerza horizontal resultante distribuidas uniformemente entre ambas ruedas de dicho doble eje. La magnitud de esta se calcula a través de la ecuación 2.11.

3.12.3. Modelado de elementos finitos 3D de la estructura del pavimento.

En esta etapa del estudio, se centra en el modelado 3D del modelado físico, simbolizado por la aplicación de un conjunto de ruedas dobles del eje estándar sobre el pavimento. Este modelado 3D tiene la ventaja de poder modelar la tensión normal y también la aplicación del componente horizontal.

Para reducir el modelamiento se considera un eje de simetría a lo largo del eje X dejando así la aplicación de carga en un área de 267.26x133.63mm².

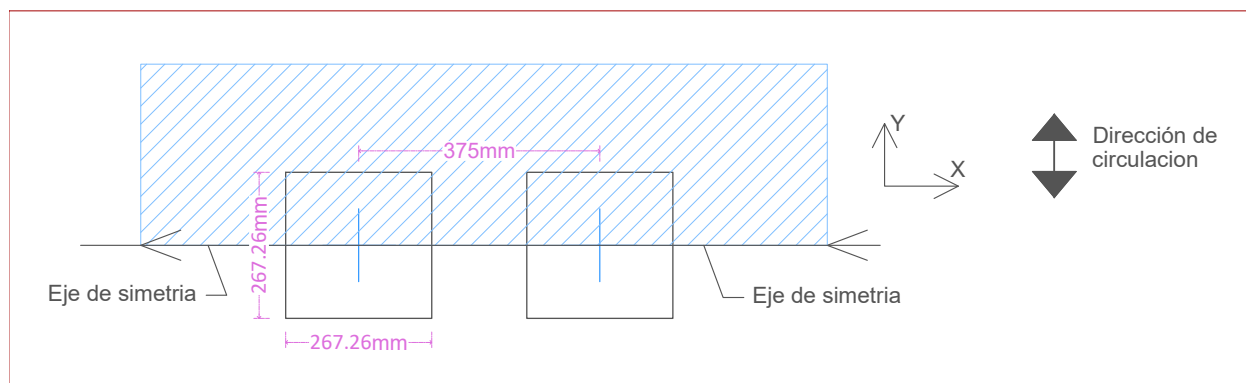


Figura 4: Huellas de las ruedas dobles y vista en planta del cuarto modelado de la calzada

Es así que para validar el modelo se hace un mallado muy fino con un factor de grosor de malla de 0.1. la malla consta de 159734 elementos y 227474 nodos. Para mayor claridad se muestra la aplicación del refinado de malla en una profundidad aproximada de 500mm.

Output Version 2023.2.1.1079

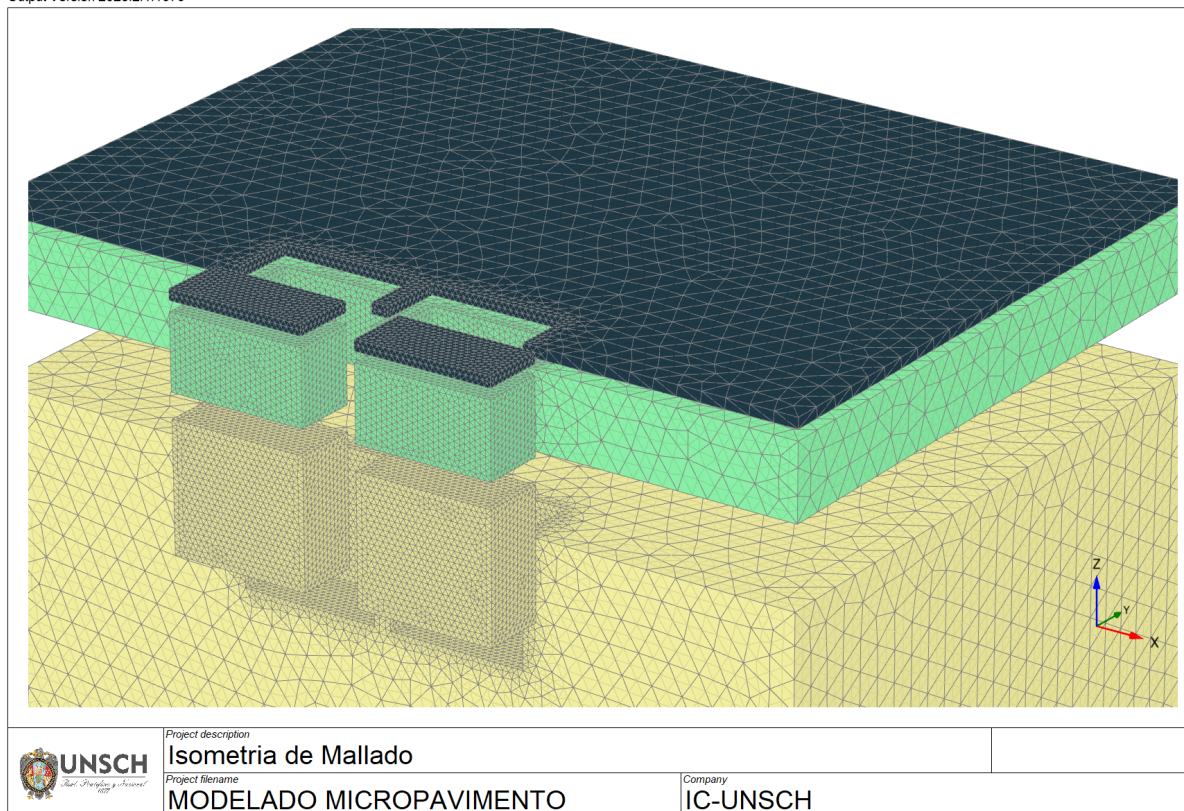


Figura 5: Vista en perspectiva del mallado de la estructura del pavimento en estudio.

3.12.4. Condiciones y supuestos para el cálculo - modelamiento.

1. **Supuestos de cálculo:** De acuerdo a los diseños de pavimento se considera que el comportamiento mecánico de cada capa de material se considera elástico, lineal e isótropo. Del mismo modo el número de ejes equivalentes se calcula suponiendo que las características mecánicas de las capas de material permanecen constantes durante toda la vida útil del pavimento.
2. **Resultados de análisis para la evaluación de la estructura:** Bajo el efecto de la carga estandar (Rueda doble) el análisis de respuesta estructural se centrará particularmente en la interpretación de los perfiles de deformación horizontal en la base de carpeta estructural del micropavimento. Se distingue la deformación longitudinal horizontal (en la dirección del tráfico), denotado por ε_L , y la deformación horizontal transversal, denotado por ε_T . En la convención de signos adoptado en el plaxis 3D, un valor positivo para la deformación horizontal indica elongación. Es así que el perfil de deformación horizontal (longitudinal o transversal) en la que

basaremos la verificación de la resistencia por flexión entre las capas de asfalto se evidencia una predominancia de la deformación longitudinal ε_L , tal como se puede apreciar en la **figura 6**.

- La **deformación horizontal longitudinal** ($\varepsilon_L, \varepsilon_{xx}$), asociada a la dirección del tráfico.
- La **deformación horizontal transversal** ($\varepsilon_T, \varepsilon_{yy}$), perpendicular a la trayectoria del vehículo.

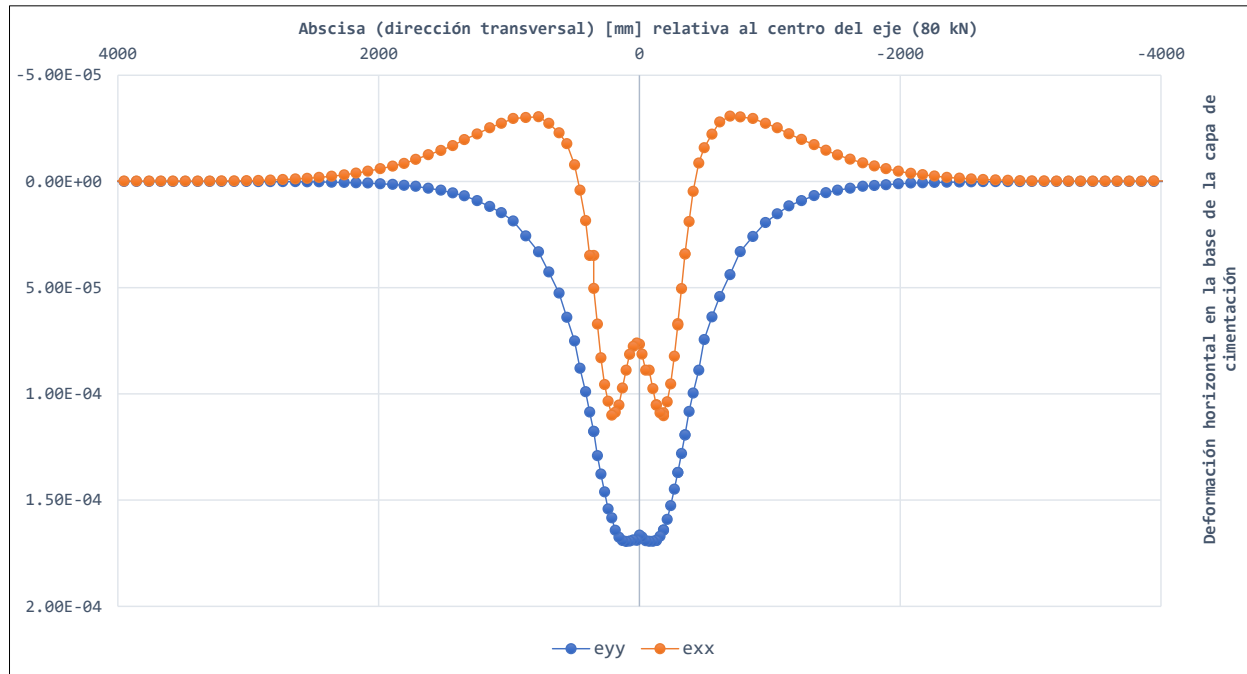


Figura 6: Incidencia de deformación horizontal $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}$ en la base de la capa de cimentación para un eje de 80 kN.

En el análisis de la respuesta mecánica del pavimento, también nos interesa los perfiles de deformación horizontal en las capas del material, por lo que también se reportarán valores máximos de tensión de corte (τ_{xy}) registrados en la interfase.

3.12.5. Influencia de las tensiones tangenciales por la geometría curva

Un aspecto fundamental a considerar es que las cargas normales inducidas por el tráfico pesado en tramos curvos no actúan de manera aislada. Estas cargas generan, además, esfuerzos tangenciales sobre la superficie del pavimento, los cuales se transmiten a

través de las distintas capas estructurales. Se infiere que dichos esfuerzos adicionales influyen directamente en la resistencia a la fatiga de los materiales y, de forma más crítica, en el comportamiento de la interfaz entre capas, acelerando el deterioro estructural del pavimento.

3.12.5.1. Resultados de modelamiento considerando tensión horizontal

El análisis de la influencia de las cargas horizontales se realizará en toda la estructura, para lo cual se plantean diferentes etapas o secciones de estudio.

En la primera etapa del análisis mediante el modelo de elementos finitos, se evalúan los valores de deformación horizontal transversal (ε_T) en la superficie de rodadura. Bajo la acción de las tensiones tangenciales generadas por el contacto neumático, se analizan las deformaciones de elongación que pueden inducir la aparición de grietas por fatiga en la capa superficial.

En una segunda fase del estudio, el análisis se enfoca en los valores de deformación horizontal, tanto longitudinal (ε_L) como transversal (ε_T), en la base de la capa de cimentación o superficie de la subrasante, también sometidas a tensiones tangenciales.

La sectorización de este análisis permite identificar el perfil de deformación dominante (longitudinal o transversal), el cual se emplea como parámetro de referencia para la verificación de la resistencia a la fatiga por flexión de las capas que componen esta estructura asfáltica.

- **Efecto en la superficie** se presenta la distribución de los valores de deformación horizontal transversal (ε_T) en la superficie de la capa superficial, considerada como la capa de desgaste. La **Figura 7** evidencia que el valor máximo de deformación (elongación) alcanza aproximadamente los $182 \mu\varepsilon$. Este valor resulta significativo, por lo que es imprescindible verificar la resistencia a la fatiga de la capa superficial, dado que esta capa está expuesta directamente al desgaste y se encuentra estrechamente vinculada con la aparición de grietas superficiales.

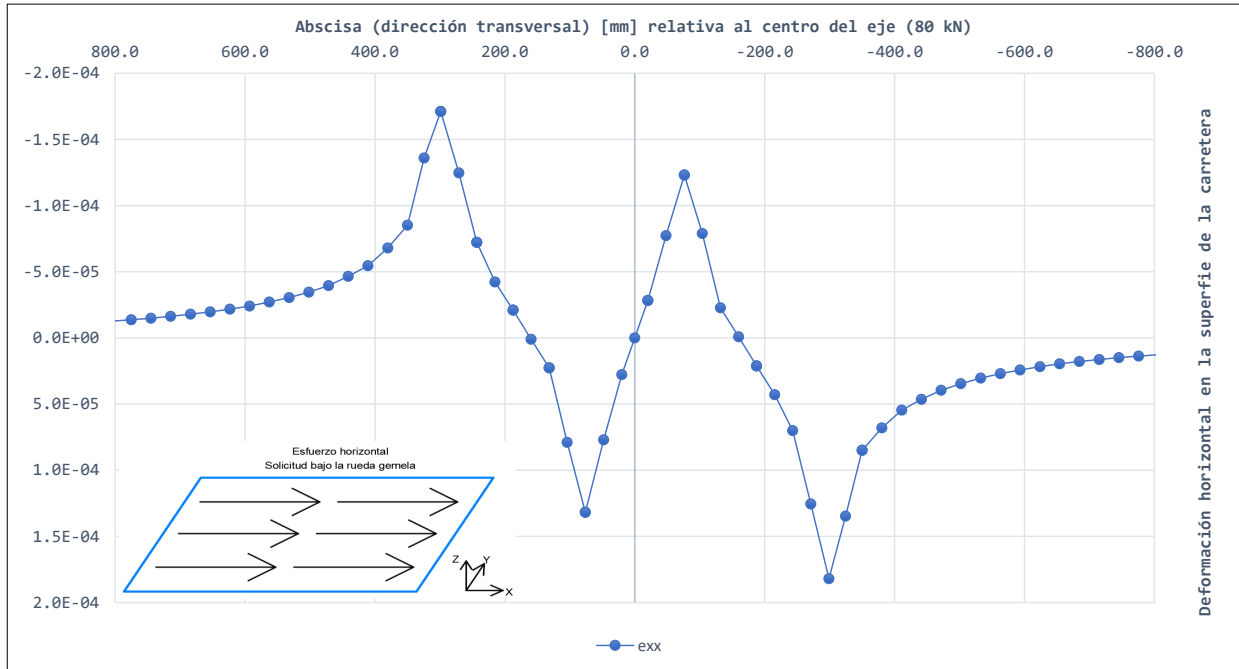


Figura 7: Valores de deformación horizontal ε_T en la superficie de la capa de rodadura

- En la base de cimentación:** Se analiza la distribución de las deformaciones horizontales, tanto longitudinales (ε_L) como transversales (ε_T), generadas por la acción de la carga tangencial. Este análisis permite identificar cuál de estas deformaciones tiene mayor influencia en el comportamiento estructural y, por tanto, en la resistencia a la fatiga.

La **Figura 8** presenta la respuesta mecánica obtenida para la base de la estructura. Se observa que la deformación horizontal longitudinal (ε_L) es la de mayor magnitud e incidencia en esta capa, constituyéndose en el parámetro crítico para la evaluación de la fatiga por flexión.

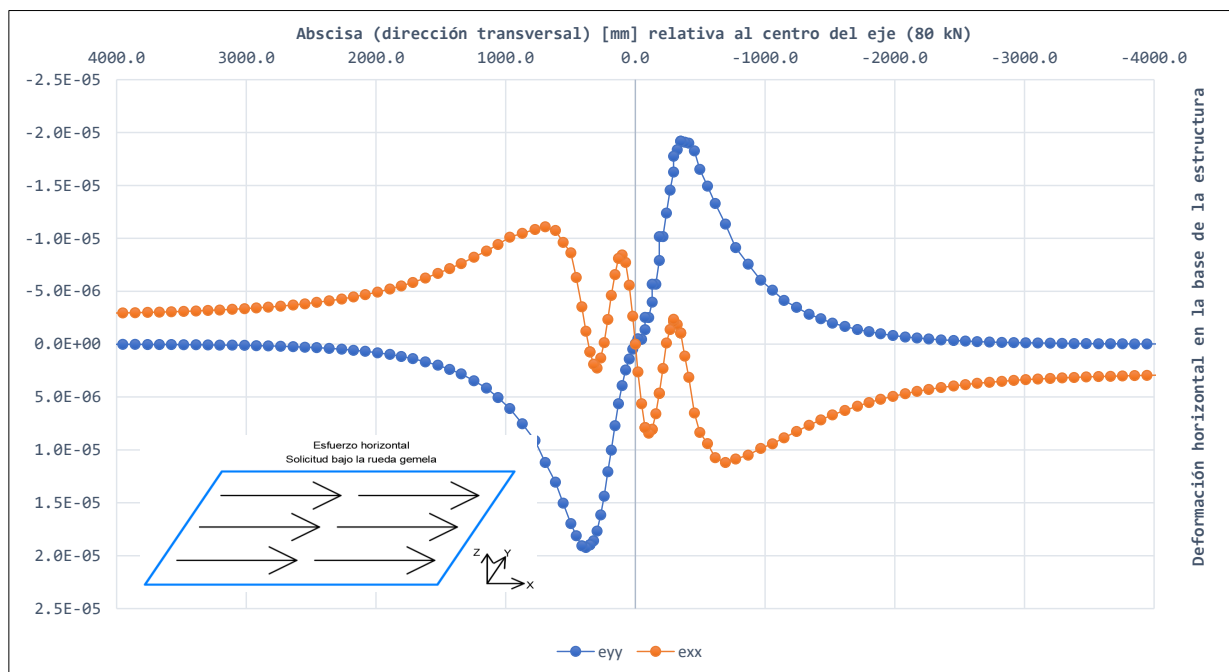


Figura 8: Valores de deformación horizontal ε_L y ε_T en la base de la estructura.

3.12.5.2. Evaluación de la vida útil de la estructura

A partir de los reportes del modelamiento se procede al cálculo del número de ejes equivalentes mediante la **ecuación 2.22**, con el fin de otorgar a los resultados una cuantificación comparable en términos de vida útil de la estructura. El análisis evidencia que la variable predominante en la capa de cimentación es la deformación longitudinal (elongación), la cual controla directamente el comportamiento a fatiga. Con base en ello, se estima el número de ejes equivalentes bajo dos condiciones de carga: (i) sin considerar la acción de la tensión tangencial y (ii) incorporando la tensión tangencial aplicada por el contacto neumático.

- **En la base de cimentación:** Al comparar ambas condiciones de carga, se observa que la inclusión de la tensión tangencial en el modelo genera un incremento ligero en los valores de deformación horizontal (**tabla 6**). Para la estructura analizada, esta variación se traduce en una reducción de la vida útil, expresada en número de ejes equivalentes, de hasta un 15% cuando se considera la acción de la carga horizontal.

Tabla 6: Comparación del desempeño estructural en el cimiento de la estructura.

Carga Vertical		Carga Combinada	
Valor de ε_{Lmax}	NE_{bc}	Valor de ε_{Lmax}	NE_{bc}
169×10^{-6}	3.71×10^4	175×10^{-6}	3.14×10^4
Variación relativa: -15%			

Fuente: Elaboración propia con base en resultados de modelamiento numérico.

- **En la superficie:** Al analizar en esta condición, se observa que la inclusión de la tensión tangencial en el modelo genera un incremento significativo en los valores de deformación horizontal (**tabla 7**). Para la estructura analizada, esta variación se traduce en una reducción de la vida útil, expresada en número de ejes equivalentes, de hasta un 97% cuando se considera la acción de la carga horizontal.

Tabla 7: Comparación del desempeño estructural en la superficie de la estructura.

Carga Vertical		Carga Combinada	
Valor de ε_{Lmax}	NE_{td}	Valor de ε_{Lmax}	NE_{td}
118×10^{-6}	2.95×10^6	234×10^{-6}	9.64×10^4
Variación relativa: -97%			

Fuente: Elaboración propia con base en resultados de modelamiento numérico.

De este análisis se infiere que, en pavimentos de espesores mínimos sometidos a cargas en tramos curvos, el deterioro se manifiesta con mayor intensidad en la superficie de rodadura (mecanismo top-down) que en la base de la estructura (bottom-up). Esto se debe a que las tensiones tangenciales generadas por el efecto combinado de la carga vertical y la fuerza lateral inducida por la trayectoria curva del vehículo producen deformaciones significativas en las capas superiores, las cuales son más sensibles a la fatiga por elongación superficial.

3.12.6. Influencia de las tensiones tangenciales en la interfaz.

Como se ha demostrado anteriormente, tanto la superficie de rodadura como la base de cimentación experimentan deformaciones adicionales cuando se introduce una carga horizontal en el modelo. Sin embargo, entre la capa de rodadura y la base estabilizada de

suelo-cemento (MCP–BSC) existe una capa crítica: la interfaz tratada con riego de liga, responsable de garantizar la adherencia y el adecuado trabajo conjunto entre ambas capas.

Para evaluar el daño por fatiga que puede desarrollarse en esta interfaz, se analizará la magnitud del esfuerzo cortante máximo que se genera durante el paso de una carga estándar. Este parámetro es determinante, ya que una reducción en la capacidad de adherencia o un incremento en el esfuerzo tangencial puede acelerar la degradación del sistema, comprometer la transferencia de esfuerzos y favorecer la formación de grietas por deslizamiento o separación entre capas.

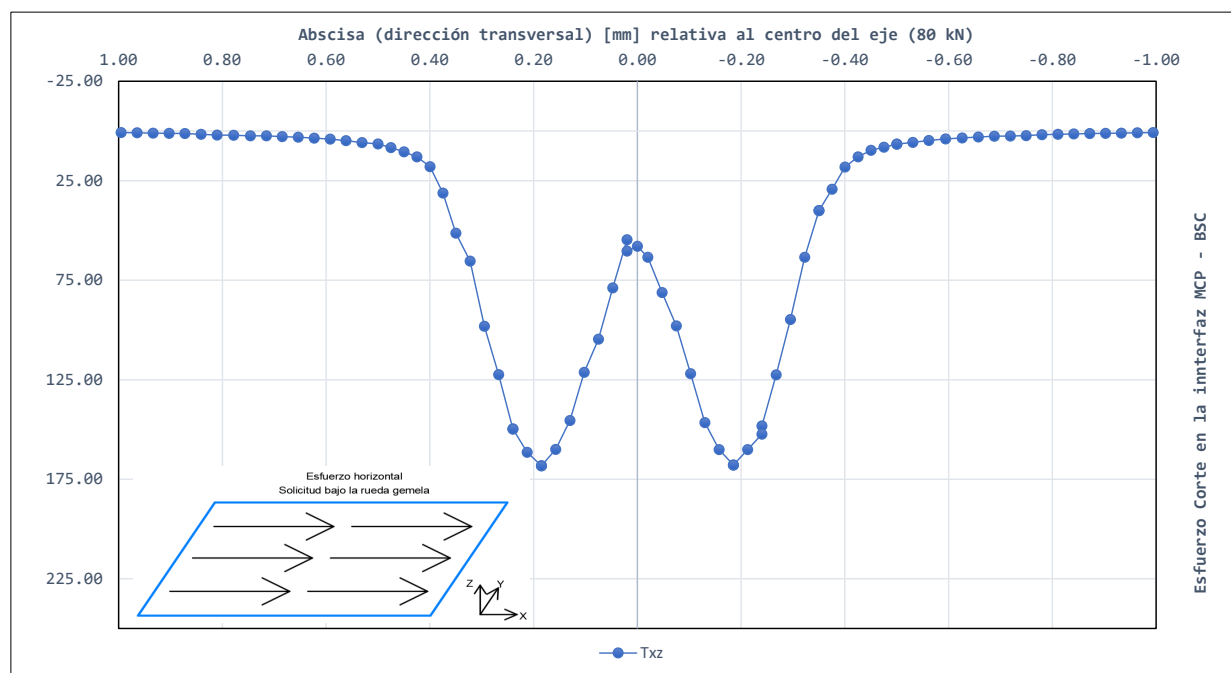


Figura 9: Valores de tensión cortante en la interfaz MCP - BSC

Como se observa en la **Figura 9**, los valores de tensión cortante τ_{xy} obtenidos en la interfaz indican que la tensión máxima se concentra verticalmente en la zona de aplicación de la carga, específicamente por encima del centro de cada rueda del conjunto doble. Asimismo, Diakhate, 2007 demostró, en diversos estudios con configuraciones variadas de pavimento, que el nivel de tensión cortante en la interfaz está fuertemente condicionado por el espesor de la capa superficial. Esta distribución es coherente con el patrón esperado para esfuerzos inducidos por cargas tangenciales en el micropavimento.

A continuación, se analiza la superposición de las cargas vertical y horizontal. En este caso, la predominancia de la tensión cortante se desplaza hacia el borde exterior de las ruedas del neumático, tal como se aprecia en la **Figura 10**. Este resultado evidencia que, bajo la

acción combinada de ambas cargas, la ubicación crítica de la tensión de corte se concentra en dicho borde exterior y no en el centro del neumático.

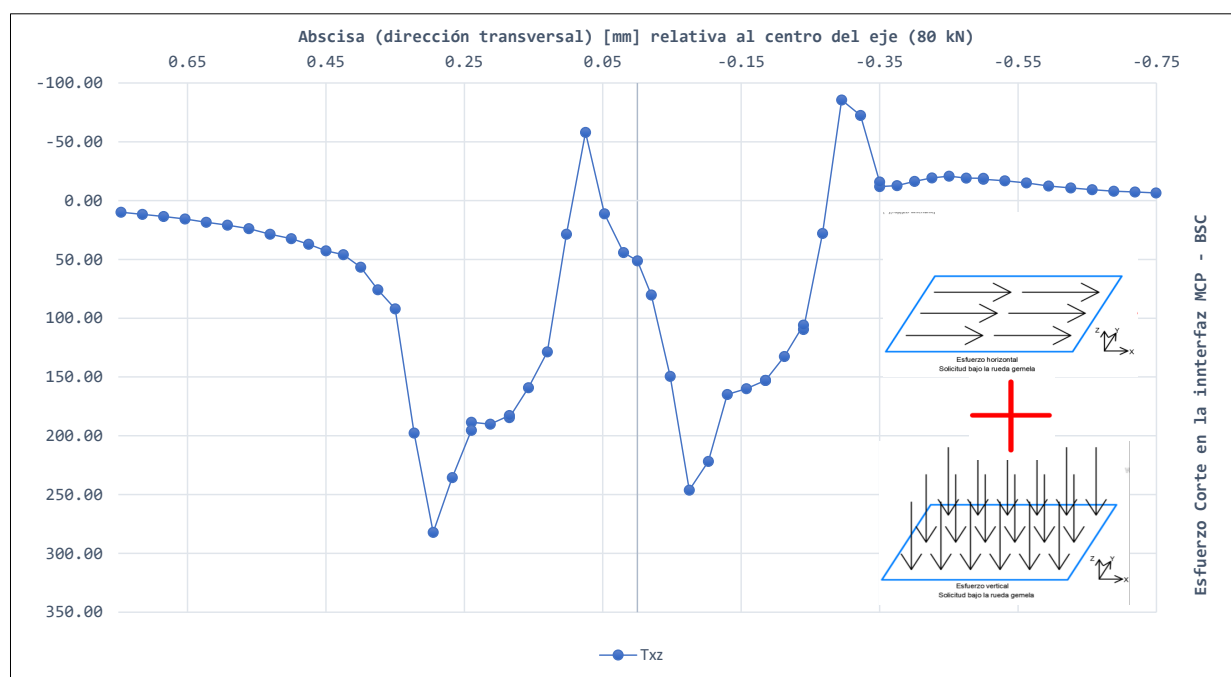


Figura 10: Valores de tensión cortante en la interfaz, tensión normal y tangencial

3.12.6.1. Dimensionamiento del nivel de daño en la interfaz del pavimento.

El modelado de la estructura del pavimento con los diseños convencionales consideran que la interfaz entre las capas estructurales están perfectamente adheridas. Sin embargo como Diakhate, 2007 ha demostrado en sus resultado experimentales en el cual define el comportamiento y mide el valor del módulo de rigidez al corte.

Al igual que en el paso de cálculo anterior, la estructura del pavimento se dimensionará teniendo en cuenta la resistencia a la fatiga de la capa asfáltica.

1. **Supuestos de cálculo:** Los valores del módulo de rigidez al corte de la interfaz dependen de la temperatura, la frecuencia de carga y el nivel de tensión aplicado. Tal como se demuestra en los resultados experimentales de Diakhate, 2007, los valores propuestos para el módulo de Young y los parámetros de rigidez al corte K_s permiten representar satisfactoriamente el comportamiento mecánico de la unión interfacial.

El diseño de la estructura bituminosa tiene como objetivo determinar el número de cargas por eje equivalente que conducirían a la falla por fatiga a flexión de las capas asfálticas, así como el número de cargas por eje equivalente que provocarían la falla

por fatiga por esfuerzo cortante en la interfaz, representado como NE_i .

Al estimar el número de ejes equivalentes, se supone además que las propiedades mecánicas de la interfaz y el nivel de tensión aplicado permanecen constantes durante la vida útil del pavimento. Esta simplificación permite la aplicación directa de las leyes de fatiga obtenidas en laboratorio bajo condiciones controladas.

Dado que la resistencia a la fatiga por esfuerzo cortante en la unión interfacial se rige por una ley de deterioro, se adopta la formulación experimental propuesta por Diakhate, 2007, la cual establece la relación entre el nivel de tensión cortante y la vida a fatiga de la interfaz. Esta se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\tau_{max} \leq \tau_{6(10^\circ\text{C}, 25\text{ Hz})} \cdot \left(\frac{k_s(10^\circ\text{C}, 10\text{ Hz})}{k_s(15^\circ\text{C}, 10\text{ Hz})} \right)^{-1.697} \left(\frac{NE_i}{10^6} \right)^{-0.223} \quad (3.27)$$

3.12.6.2. Evaluación de la vida útil de la estructura

En esta condición se determina el valor de la tensión cortante máxima $\tau_{\text{máx}}$. Dicho valor se introduce en la ecuación 3.27, lo que permite calcular el número de ejes equivalentes NE_i . De este modo, es posible analizar el efecto de considerar la tensión tangencial en la estimación de la vida útil de la unión en la interfaz MCP–BSC.

Tabla 8: Comparación del desempeño estructural en interfaz con tensión tangencial.

Sin tensión tangencial		Con tensión tangencial	
Valor de τ_{max}	NE_i	Valor de τ_{max}	NE_i
0.203MPa	9.24×10^5	0.302MPa	1.54×10^5
Variación relativa: –83 %			

Fuente: Elaboración propia con base en resultados de modelamiento numérico.

La comparación de los valores de número de ejes equivalentes NE_i , presentados en la Tabla 8, permite evaluar la resistencia a la fatiga por cizallamiento en la unión de la interfaz MCP–BSC, así como cuantificar el efecto de la aplicación de una carga horizontal sobre la vida útil de dicha unión. Se observa que, al considerar la acción de la fuerza centrífuga, el valor de NE_i se reduce aproximadamente en un 83 %, lo que evidencia una disminución significativa de la vida útil asociada a la inclusión de la tensión tangencial.

Asimismo, tal como se muestra en los estudios de Petit et al., 2009, los ensayos

realizados en diferentes estructuras de pavimento indican que los niveles de deformación en suelos estabilizados presentan una diferencia del orden de 1.8 veces entre la capa de suelo de cimentación y la interfaz MCP–BSC, lo que confirma la elevada sensibilidad de esta última frente a los esfuerzos de cizallamiento.

3.12.7. Influencia de las tensiones combinadas Vertical - Horizontal y condición de adherencia.

La influencia del estado de la interfaz entre capas, analizada en los dos escenarios considerados (*adherencia perfecta* y *adherencia deficiente*), permite cuantificar el nivel de deterioro estructural y su impacto en la vida útil del pavimento. El propósito de esta evaluación es determinar cómo la pérdida parcial de adherencia interfacial afecta la distribución de deformaciones y, en consecuencia, acelera la fatiga por flexión en la capa de rodadura del micropavimento. Para la estructura bituminosa se ha analizado la distribución de tensiones de corte en el interfaz de la capa superficial y base estabilizada, es decir entre MCP y BSC.

Como se ha demostrado en las secciones anteriores, la flexión por fatiga ha sido analizada suponiendo que el nivel de adherencia es perfectamente adherido. La resistencia a la fatiga por flexión de una capa de material tratada con aglutinantes asfálticos se verifica mediante la ecuación 2.22, cuyos parámetros fueron determinados experimentalmente en laboratorio por Diakhate, 2007.

3.12.7.1. Evaluación de la vida útil de las capas de asfalto y su adherencia:

Para analizar el comportamiento y el dimensionamiento de la estructura del pavimento, con respecto a la resistencia a la fatiga por flexión de las capas de asfalto, permite evaluar el número de ejes equivalentes NE . por lo que se analizaran los dos escenarios propuesto en el que se considera perfectamente adherida y con adherencia insuficiente.

1. **En la interfaz:** Se observa una disminución de los esfuerzos al considerar la condición de adherencia insuficiente ($R_{inter} = 0.6$) como se observan la **figura 11**. Este comportamiento puede interpretarse como una reducción del esfuerzo máximo que es capaz de soportar el riego de liga en la unión interfacial. En consecuencia, parte de las cargas se redistribuye hacia las demás capas de la estructura, modificando el modo de trabajo conjunto y el patrón de deterioro del pavimento.

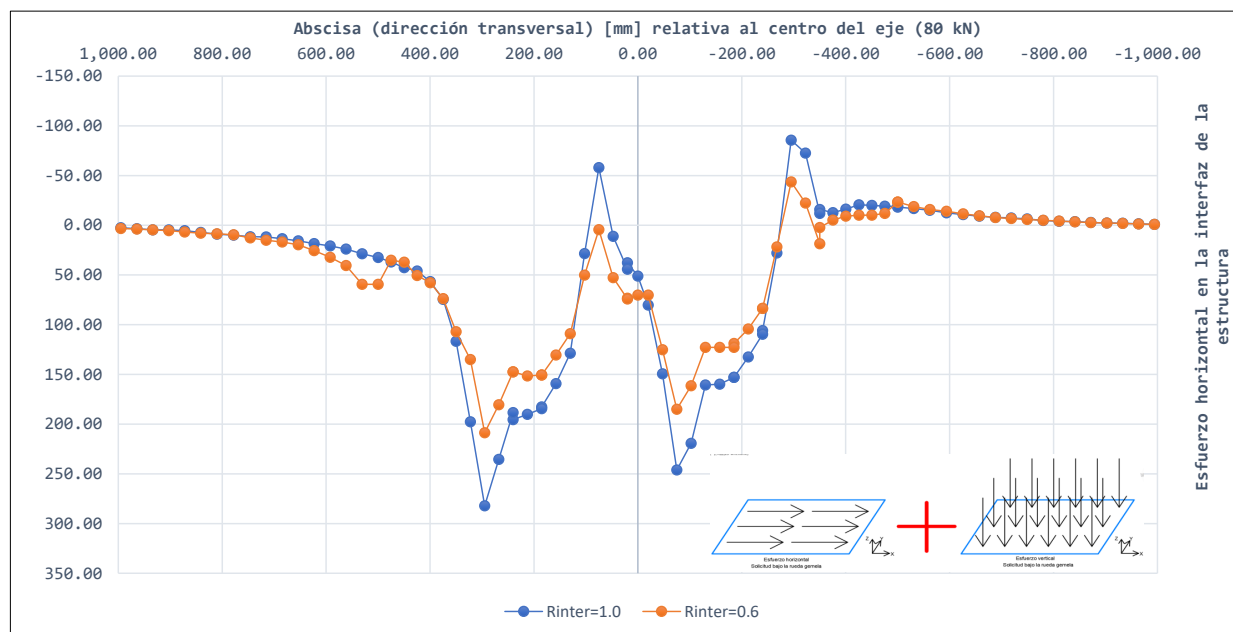


Figura 11: Valores de tensión cortante en la interfaz, tensión normal y tangencial

Tabla 9: Comparación del desempeño estructural según la condición de adherencia interfacial en la interfaz.

Interfaz perfectamente unidas		Con Interfaz Rinter = 0.6	
Valor de ε_{Lmax}	NE_i	Valor de ε_{Lmax}	NE_i
0.302MPa	-	0.222MPa	-

Fuente: Elaboración propia con base en resultados de modelamiento numérico.

2. **En la base de cimentación:** Se observa una ligera disminución del número de ejes equivalentes al considerar la condición de adherencia insuficiente ($R_{inter} = 0.6$), tal como se aprecia en la **Figura 12**. Este comportamiento puede interpretarse como una reducción del orden de un 15% en la demanda de carga equivalente sobre la base de cimentación, lo que indica que los esfuerzos que alcanzan esta capa son ligeramente menores bajo dicha condición de adherencia.

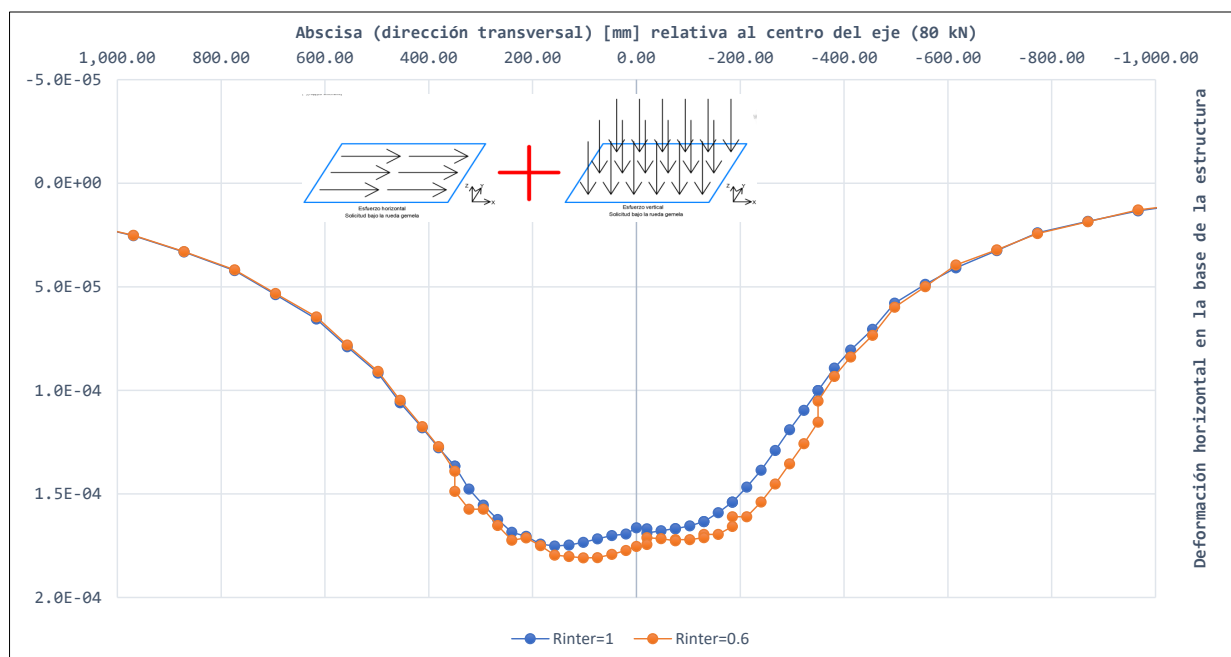


Figura 12: Valores de tensión cortante en la interfaz, tensión normal y tangencial

Tabla 10: Comparación del desempeño estructural según la condición de adherencia interfacial en la base

Interfaz perfectamente unidas		Con Interfaz Rinter = 0.6	
Valor de ε_{Lmax}	NE_{bc}	Valor de ε_{Lmax}	NE_{bc}
1.75×10^{-4}	3.14×10^4	1.81×10^{-4}	2.67×10^4
Variación relativa: -15%			

Fuente: Elaboración propia con base en resultados de modelamiento numérico.

- En la superficie** Se observa una disminución considerable del número de ejes equivalentes al considerar la condición de adherencia insuficiente ($R_{inter} = 0.6$), tal como se aprecia en la **Figura 13**. Este comportamiento puede interpretarse que al considerar una adherencia insuficiente las cargas transmitidas se aplican principalmente a la capa superficial realizando desplazamiento relativos entre las capas.

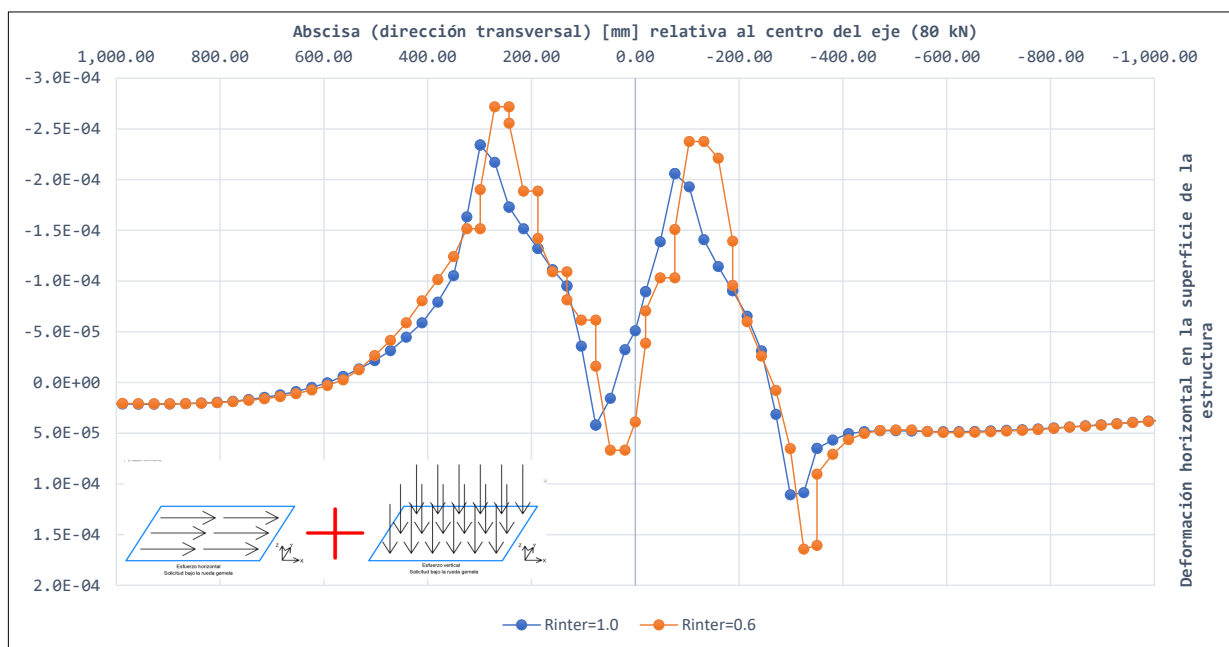


Figura 13: Valores de tensión cortante en la interfaz, tensión normal y tangencial

Tabla 11: Comparación del desempeño estructural según la condición de adherencia interfacial.

Interfaz perfectamente unidas		Con Interfaz Rinter = 0.6	
Valor de ε_{Tmax}	NE_{tc}	Valor de ε_{Tmax}	NE_{tc}
2.34×10^{-4}	9.64×10^4	2.72×10^{-4}	4.57×10^4
Variación relativa: -53%			

Fuente: Elaboración propia con base en resultados de modelamiento numérico.

3.12.8. Análisis de caso de estudio.

En esta sección se tiene como objetivo analizar la respuesta estructural del pavimento económico de la carretera Emp. PE26 B frente a las tensiones inducidas por la fricción lateral en curvas horizontales. Para ello, se diseñan y modelan diferentes configuraciones de la estructura de pavimento, considerando la variación del radio de curvatura, la velocidad de diseño y el nivel de adherencia interfacial entre las capas asfálticas (MCP-BSC).

En este tipo de secciones viales, la superficie del micropavimento está sometida no solo a la presión vertical de contacto (0,56 MPa) generada por la carga estándar de diseño (80 kN), sino también a una presión tangencial asociada a la fuerza de fricción lateral producida por el movimiento del vehículo en curva.

El modelamiento con elementos finitos permite evaluar el efecto combinado de las componentes vertical y tangencial de carga sobre la resistencia a la fatiga por flexión de las capas asfálticas y sobre la adherencia interfacial. En estos cálculos, la calidad de la unión entre capas se representa mediante el coeficiente de interfaz (R_{inter}), que define el nivel de transmisión de esfuerzos cortantes.

Tabla 12: Valores estimados para curvas convencionales con radios mínimos MTC

Caso	V (km/h)	R (m)	P_h (kPa)	Rinter = 1.0			Rinter = 0.6		
				τ_{xy}	ε_x	ε_y	τ_{xy}	ε_x	ε_y
				(kPa)	($\mu\varepsilon$)	($\mu\varepsilon$)	(kPa)	($\mu\varepsilon$)	($\mu\varepsilon$)
A1	30	30	133	259	163	172.4	184	186	178.4
A2	40	50	141	263	167	172.6	187	192	178.6
A3	50	85	130	258	161	172.3	183	184	178.3
A4	60	125	127	257	160	172.3	182	182	178.2

Fuente:

Elaboración propia con base en resultados de modelamiento numérico.

Tabla 13: Valores estimados para curvas de volteo

Caso	V (km/h)	R (m)	P_h (kPa)	Rinter = 1.0			Rinter = 0.6		
				τ_{xy}	ε_x	ε_y	τ_{xy}	ε_x	ε_y
				(kPa)	($\mu\varepsilon$)	($\mu\varepsilon$)	(kPa)	($\mu\varepsilon$)	($\mu\varepsilon$)
B1	20	15	118	253	155	172.1	178	176	178.0
B2	20	25	71	233	138	170.9	161	150	176.9
B3	20	40	44	221	129	170.3	151	138	176.3
B4	25	15	184	281	197	173.6	203	225	179.6
B5	25	25	110	249	151	171.9	175	171	177.8
B6	25	40	69	232	137	170.9	160	149	176.9
B7	30	20	198	287	207	173.9	208	238	179.9
B8	30	30	132	259	163	172.4	184	186	178.4
B9	30	45	88	240	144	171.3	167	157	177.3
B10	35	25	216	294	220	174.5	215	255	180.3
B11	40	30	235	302	234	175.2	222	272	180.9
B12	40	50	141	263	167	172.6	187	192	178.6

Fuente: Elaboración propia con base en resultados de modelamiento numérico.

Tabla 14: Efecto de la adherencia interfacial en el comportamiento mecánico

Parámetro	Rinter = 1.0	Rinter = 0.6	Variación	Tendencia
τ_{xy} promedio (kPa)	259	184	-29.0%	Disminuye
ε_x promedio ($\mu\varepsilon$)	170	192	+13.0%	Aumenta
ε_y promedio ($\mu\varepsilon$)	172	178	+3.0%	Aumenta

Nota: La reducción de adherencia (Rinter 1.0 \rightarrow 0.6) disminuye esfuerzos cortantes interfaciales pero incrementa deformaciones superficiales, evidenciando redistribución de esfuerzos hacia otras capas.

Capítulo 4

RESULTADOS

4.1. Presentación de resultados

Se presentan los resultados de las 32 simulaciones numéricas mediante elementos finitos en PLAXIS 3D, organizados según las variables de investigación: velocidad de diseño (V), radio de curvatura (R) y adherencia interfacial (R_{inter}).

4.1.1. Resultados globales de las simulaciones

Tabla 15: Síntesis de resultados de esfuerzos cortantes interfaciales

Grupo	N casos	τ_{xy} (kPa) - $R_{inter}=1.0$		τ_{xy} (kPa) - $R_{inter}=0.6$		Δ (%)
		Mín	Máx	Mín	Máx	
A - Convencionales	4	257	263	182	187	-29.0
B - Volteo	12	221	302	151	222	-28.9
Total	16	221	302	151	222	-29.0

Tabla 16: Síntesis de resultados de deformaciones horizontales superficiales

Grupo	ε_{xx} ($\mu\varepsilon$) - $R_{inter}=1.0$		ε_{xx} ($\mu\varepsilon$) - $R_{inter}=0.6$		Δ (%)
	Mín	Máx	Mín	Máx	
A - Convencionales	160	167	182	192	+14.2
B - Volteo	129	234	138	272	+10.5
Total	129	234	138	272	+12.0

Tabla 17: Síntesis de resultados de deformaciones longitudinales base estructura

Grupo	ε_{yy} ($\mu\varepsilon$) - Rinter=1.0		ε_{yy} ($\mu\varepsilon$) - Rinter=0.6		Δ (%)
	Mín	Máx	Mín	Máx	
A - Convencionales	172.3	172.6	178.2	178.6	+3.5
B - Volteo	170.3	175.2	176.3	180.9	+3.4
Total	170.3	175.2	176.3	180.9	+3.5

Se puede apreciar que, al considerar las diferentes condiciones de curvatura con un valor de $R_{inter} = 0.6$ (condición de adherencia imperfecta entre capas), los esfuerzos cortantes en la interfaz MCP-BSC disminuyen aproximadamente un 29%, lo cual se interpreta como una reducción en la capacidad de transferencia de esfuerzos cortantes a través de la interfaz. Sin embargo, se observa que las deformaciones horizontales superficiales (ε_{xx}) aumentan aproximadamente un 12%, lo que indica que, al presentar una adherencia imperfecta, la superficie experimenta mayores desplazamientos relativos debido al deslizamiento parcial entre capas. Del mismo modo, se registra un ligero incremento de aproximadamente 3.5% en las deformaciones longitudinales (ε_{yy}) en la base de la estructura del pavimento. Se puede concluir que, al presentar una condición de adherencia imperfecta entre capas, la estructura pierde parcialmente su comportamiento monolítico, reduciendo la transferencia de esfuerzos cortantes en la interfaz y generando mayores deformaciones en las capas individuales al trabajar de manera más independiente.

4.1.2. Resultados por variable independiente

4.1.2.1. Efecto de la velocidad de diseño y radio de curvatura

Con el fin de cuantificar el daño asociado al efecto combinado de la velocidad de diseño y el radio de curvatura, se presentan los esfuerzos y deformaciones obtenidos del modelamiento numérico, expresados en términos de número de ejes equivalentes. Estos resultados serán comparados con los valores de tránsito pesado de diseño, expresados también en ejes equivalentes ($T_{P0}, T_{P1}, T_{P2}, T_{P3}, T_{P4}$), establecidos en el Manual de Carreteras. Como se ha demostrado anteriormente se procederá al cálculo del deterioro en la interfaz y en la superficie del micropavimento.

1. **Efecto sobre la interfaz**, se analiza el efecto del deterioro del pavimento en tramos curvos en la interfaz MCP-BSC.

Tabla 18: Cálculo de ejes equivalente en función del radio y la velocidad ($R_{inter} = 1.0$) y su efecto en la interfaz

NE_i con Velocidad (km/h) - $R_{inter} = 1.0$					
Radio (m)	V=20km/h	V=25km/h	V=30km/h	V=45km/h	V=40km/h
15	343,044	214,521	—	—	—
20	—	—	195,110	—	—
25	496,434	364,519	—	173,511	—
30	—	—	309,328	—	153,621
40	621,789	504,157	—	—	—
45	—	—	—	433,054	—
50	—	—	—	—	289,749

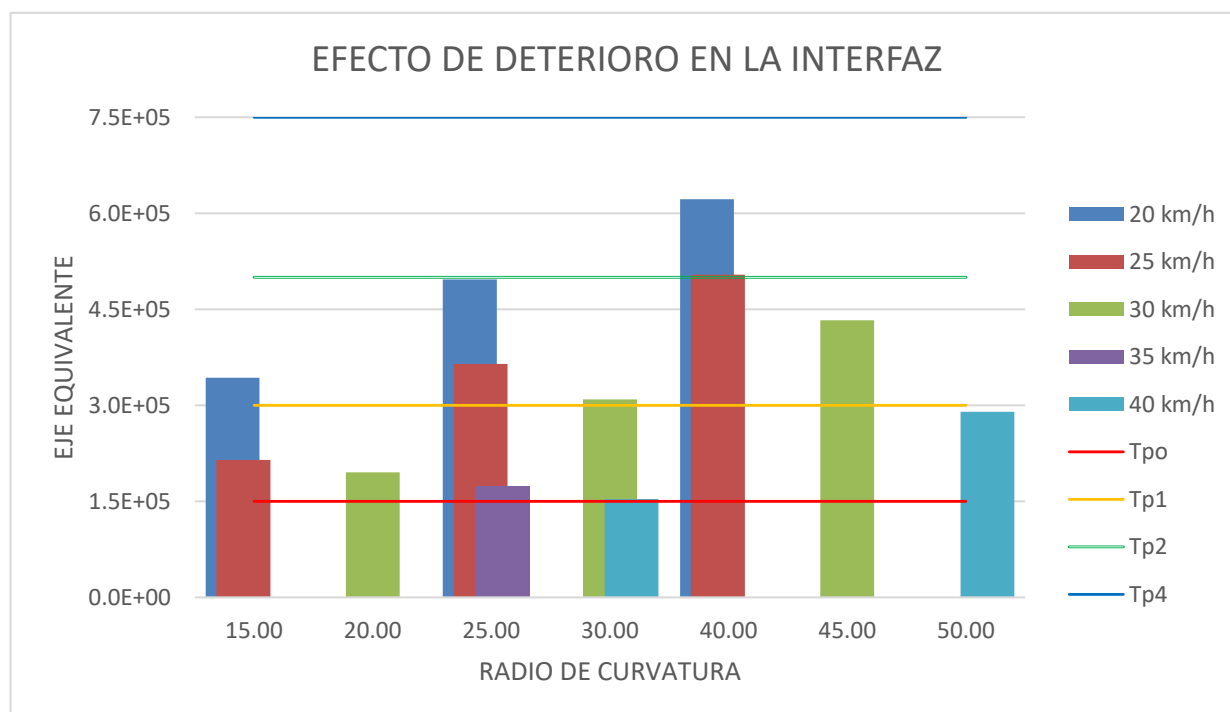


Figura 14: Efecto de deterioro en la interfaz

Análisis del caso: Del análisis de la **Tabla 18** se observa que, para una velocidad constante, el número de ejes equivalentes NE_i aumenta conforme se incrementa el radio de curvatura. Como se puede observar la tendencia de mantener la velocidad constante como en 20 km/h, la vida útil estimada pasa de $3,4 \times 10^5$ ejes para un radio de 15 m a aproximadamente $6,2 \times 10^5$ ejes para un radio de 40 m, lo que evidencia que las curvas

más suaves inducen menores niveles de esfuerzo cortante en la interfaz MCP–BSC.

En sentido contrario, para un radio constante, el incremento de la velocidad de diseño produce una disminución significativa del número de ejes equivalentes. En el caso de $R = 25$ m, NE_i se reduce de $4,9 \times 10^5$ ejes a 20 km/h a cerca de $1,7 \times 10^5$ ejes a 45 km/h, es decir, una reducción del orden del 65 %. Este comportamiento se asocia al aumento de la fuerza centrífuga, proporcional a V^2 , que incrementa la tensión tangencial en la interfaz y acelera el daño por fatiga. En conjunto, los resultados confirman que la combinación de radios pequeños y velocidades elevadas constituye el escenario más crítico para la durabilidad de la unión interfacial.

2. **Efecto sobre la superficie de rodadura**, se analiza el efecto del deterioro del pavimento en tramos curvos en la superficie del pavimento.

Tabla 19: Cálculo de ejes equivalente en función del radio y la velocidad ($R_{inter} = 1.0$) y su efecto en la superficie de rodadura

<i>NE_{tc} con Velocidad (km/h) - R_{inter} = 1.0</i>					
Radio (m)	V=20km/h	V=25km/h	V=30km/h	V=45km/h	V=40km/h
15	759,559	229,028	—	—	—
20	—	—	177,939	—	—
25	1,367,647	868,508	—	130,963	—
30	—	—	599,727	—	—
40	1,917,083	1,397,815	—	—	96,446
45	—	—	—	1,116,762	—
50	—	—	—	—	520,042

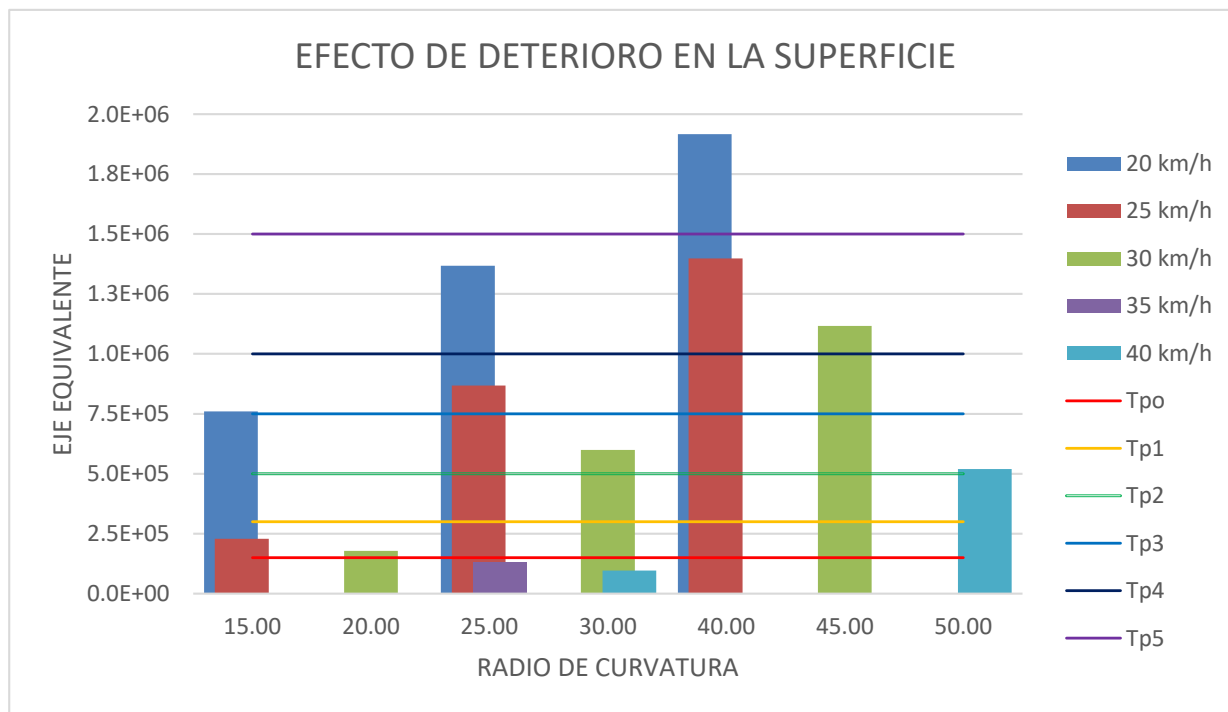


Figura 15: Efecto de deterioro en la superficie

Análisis del caso: Del análisis de la **Tabla 19** se observa que, para una velocidad de diseño constante, el número de ejes equivalentes que puede soportar la superficie de rodadura aumenta conforme se incrementa el radio de curvatura. Por ejemplo, a 20 km/h, la vida útil estimada pasa de $7,6 \times 10^5$ ejes para un radio de 15 m a aproximadamente $1,9 \times 10^6$ ejes para un radio de 40 m. En sentido contrario, para un radio constante, el incremento de la velocidad de diseño genera una reducción significativa de los ejes equivalentes admisibles; en el caso de $R = 25$ m, el valor disminuye de $1,37 \times 10^6$ ejes a 20 km/h a alrededor de $1,3 \times 10^5$ ejes a 45 km/h. Estos resultados confirman que la combinación de radios pequeños y velocidades elevadas constituye el escenario más desfavorable para la durabilidad de la superficie de rodadura.

En síntesis, los resultados obtenidos para la superficie de rodadura y para la interfaz MCP–BSC muestran una tendencia común: el incremento de la velocidad de diseño y la reducción del radio de curvatura se traducen en una disminución significativa del número de ejes equivalentes que la estructura es capaz de soportar. Sin embargo, la magnitud de este efecto no es homogénea en todas las capas. Al comparar ambos casos, se evidencia que la interfaz presenta reducciones mucho más severas de NE_i frente a variaciones de velocidad y radio, mientras que la superficie de rodadura, aunque afectada, conserva valores de vida útil

relativamente mayores bajo las mismas condiciones de carga.

De ello se infiere que el mayor grado de deterioro inducido por la sobrecarga de fricción lateral se concentra en la unión interfacial. La sensibilidad de la interfaz frente a los esfuerzos cortantes asociados a la fuerza centrífuga confirma su carácter crítico en pavimentos de pequeños espesores y en tramos curvos, donde la combinación de radios reducidos y velocidades elevadas acelera el daño por fatiga.

4.1.2.2. Efecto de la adherencia interfacial

De los resultados presentados por el efecto de la velocidad y radio de curvatura en la interfaz y la superficie de rodadura del micropavimento adherencia perfecta ($R_{inter}=1.0$) se procede al análisis del efecto de la adherencia interfacial en condiciones de adherencia deficiente ($R_{inter}=0.6$).

1. **Efecto sobre la interfaz:** Al considerar una adherencia deficiente en el modelo, se obtienen valores menores de tensión cortante interfacial τ_{xy} respecto a los calculados con adherencia perfecta, lo que numéricamente se traduce en un mayor número de ejes equivalentes soportados por la propia interfaz. Este resultado podría interpretarse en un primer momento como incongruente con el análisis global del deterioro; sin embargo, no lo es, ya que bajo condiciones de adherencia insuficiente la interfaz deja de movilizar la totalidad de la tensión de corte con un valor de corte menor y parte de la demanda se transfiere a las demás capas de la estructura. En consecuencia, se incrementan las deformaciones en dichas capas y se modifica el patrón global de deterioro del pavimento, manteniéndose la interfaz como un plano de menor sollicitación cortante pero a costa de una mayor exigencia estructural en el resto del sistema.

Tabla 20: Comparación de respuestas mecánicas según $R_{inter} = 0.6$

Parámetro	$R_{inter}=1.0$	$R_{inter}=0.6$	Variación
τ_{xy} promedio (kPa)	259	184	-29.0 %
ε_x promedio ($\mu\varepsilon$)	168	191	+13.3 %
ε_y promedio ($\mu\varepsilon$)	172	178	+3.5 %

2. **Efecto sobre la superficie de rodadura,** se analiza el efecto del deterioro del pavimento en tramos curvos en la superficie del pavimento.

Tabla 21: Cálculo de ejes equivalente en función del radio y la velocidad ($R_{inter} = 0.6$) y su efecto en la superficie de rodadura

NE_i con Velocidad (km/h) - $R_{inter} = 0.6$					
Radio (m)	V=20km/h	V=25km/h	V=30km/h	V=45km/h	V=40km/h
15	403,544	117,322	—	—	—
20	—	—	88,989	—	—
25	894,878	471,627	—	63,647	—
30	—	—	309,386	—	45,727
40	1,343,103	922,215	—	703,391	—
45	—	—	—	—	—
50	—	—	—	—	263,174

Al comparar los resultados obtenidos para la superficie de rodadura con $R_{inter} = 1.0$ y $R_{inter} = 0.6$ se observa que, para cada combinación de radio y velocidad, el número de ejes equivalentes se reduce de manera sistemática cuando la adherencia entre capas es deficiente. Las disminuciones de NE se sitúan, en general, entre el 30 % y el 50 %, como se aprecia en los casos de $R = 15$ m y $V = 20$ km/h, donde la vida útil pasa de aproximadamente $7,6 \times 10^5$ (tabla19) a $4,0 \times 10^5$ ejes (tabla21) .

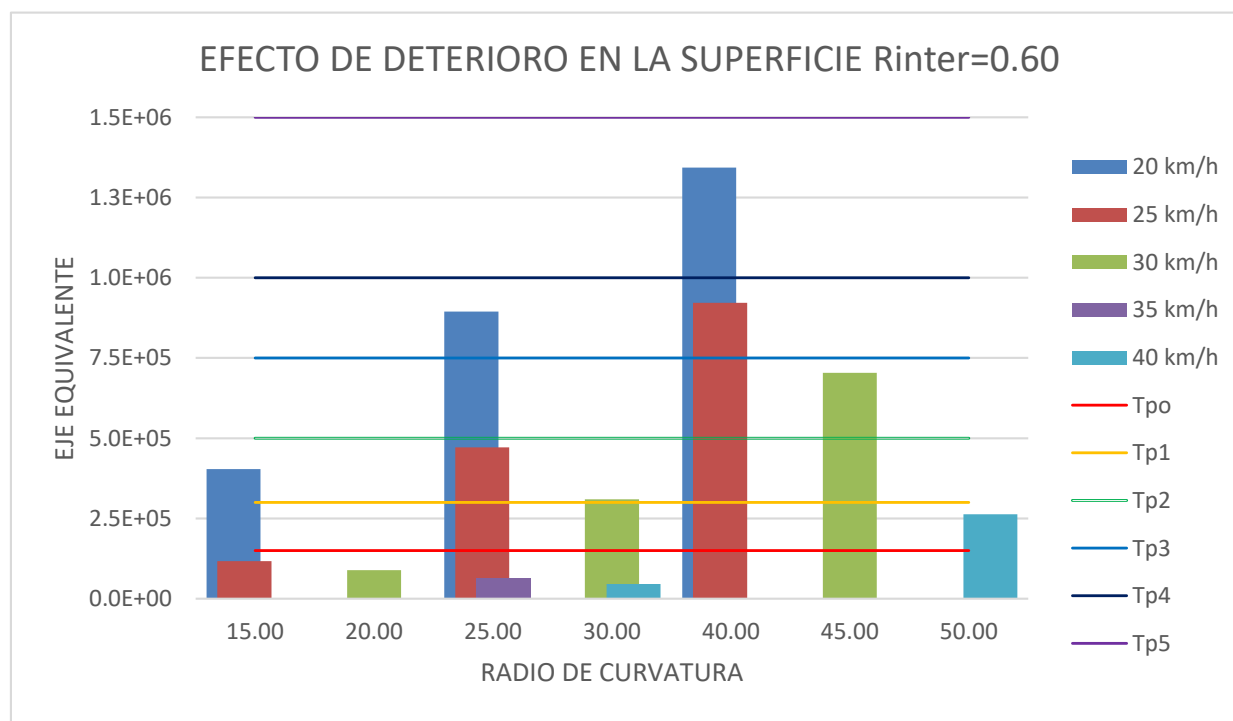


Figura 16: Efecto de deterioro en la superficie con $R_{inter} = 0.6$

Estos resultados confirman que la adherencia insuficiente en la interfaz MCP–BSC provoca una disminución significativa de la vida a fatiga de la capa de rodadura, manteniéndose la geometría: el número de ejes equivalentes aumenta con el radio de curvatura y disminuye al incrementar la velocidad de diseño. En conjunto, se deduce que la deficiente adherencia no sólo modifica la distribución de esfuerzos entre capas, sino que también acelera el deterioro superficial en tramos curvos sometidos a tráfico pesado reduciendo este en valores cercanos al 50 %.

4.1.2.3. Interpretación integrada de las figuras de resultados

Las tres figuras anteriores (**Figuras 14, 15 y 16**) comparten la misma estructura gráfica y deben leerse de manera conjunta para extraer conclusiones completas sobre el comportamiento del pavimento en tramos curvos.

Interpretación de gráficos

En los tres gráficos, el **eje horizontal** representa el radio de curvatura (m) y el **eje vertical** el número de ejes equivalentes (NE) que resiste la estructura antes de fallar por fatiga. Cada barra vertical de color corresponde a una velocidad de diseño fija (20, 25, 30, 35 y 40 km/h). Las líneas horizontales (T_{P0} a T_{P5}) son los umbrales de tráfico pesado acumulado del Manual de Carreteras del MTC, y permiten determinar directamente si la estructura es suficiente para cada categoría de vía. Una curva que se ubica *por encima* de una línea T_{Px} indica que la estructura resiste el tráfico de esa categoría; si cae *por debajo*, la estructura es insuficiente.

Caso de aplicación

Para ilustrar el uso conjunto de las tres figuras, se toma como caso de estudio una curva con radio $R = 25$ m y velocidad de diseño $V = 20$ km/h, condiciones representativas de un tramo de volteo en la carretera Emp. PE26 B.

1. **Paso 1 – Verificar la interfaz MCP–BSC (Figura 14):** Ubicando $R = 30$ m en el eje horizontal y siguiendo la barra correspondiente a $V = 30$ km/h, se obtiene $NE_i = 3.09 \times 10^5$ ejes. Este valor se sitúa justo por encima del umbral T_{P2} (300,001 EE), lo que indica que la interfaz resiste apenas la categoría de tráfico T_{P2} . La interfaz es el *componente más débil* del sistema: falla antes que la superficie bajo las mismas condiciones geométricas.
2. **Paso 2 – Verificar la superficie de rodadura con adherencia perfecta (Figura 15):** Para las mismas condiciones ($R = 30$ m, $V = 30$ km/h), la superficie admite $NE_{tc} = 5.99 \times 10^5$ ejes, ubicándose entre los umbrales T_{P3} (500,001 EE) y T_{P4} (750,001

EE). Este valor casi duplica al de la interfaz, confirmando que la superficie por sí sola resistiría un tráfico considerablemente mayor, pero la debilidad del sistema se concentra en la unión entre capas, que determina la vida útil real de la estructura.

3. **Paso 3 – Evaluar el efecto de la adherencia deficiente (Figura 16):** Si la misma curva ($R = 30$ m, $V = 30$ km/h) presenta un riego de liga deteriorado ($R_{inter} = 0.6$), el NE_{tc} de la superficie cae a 3.09×10^5 ejes, descendiendo desde la categoría T_{P3} – T_{P4} hasta apenas T_{P2} . Esto representa una pérdida del 48 % respecto al caso de adherencia perfecta, únicamente por degradación del riego de liga, sin modificar ningún parámetro geométrico ni de tráfico. Nótese además que bajo esta condición, el NE_{tc} de la superficie iguala al NE_i de la interfaz con adherencia perfecta, lo que indica que la pérdida de adherencia traslada la criticidad desde la interfaz hacia la superficie de rodadura.

Lectura crítica: efecto combinado de geometría y adherencia

El análisis anterior muestra que ninguna figura debe interpretarse de forma aislada. La combinación más desfavorable ocurre cuando se superponen tres factores: radio pequeño, velocidad alta y adherencia deficiente. Tomando el caso extremo disponible en los datos ($V = 40$ km/h, $R = 30$ m, $R_{inter} = 0.6$), el NE_{tc} de la superficie desciende a 4.57×10^4 ejes, cayendo por debajo de T_{P0} , el umbral mínimo establecido por el MTC. Esto significa que, bajo estas condiciones, la estructura no alcanza siquiera la categoría de tráfico más baja, lo que en la práctica equivale a un deterioro prematuro severo desde los primeros años de servicio. En contraste, el escenario más favorable ($V = 20$ km/h, $R = 40$ m, $R_{inter} = 1.0$) ubica la vida útil de la superficie en 1.92×10^6 ejes, superando la categoría T_{P4} , lo que demuestra que una geometría adecuada combinada con una buena adherencia puede multiplicar la durabilidad del pavimento por más de cuarenta veces respecto al escenario crítico.

4.2. Contrastación de hipótesis

4.2.1. Contrastación de la hipótesis general

Hipótesis: Las características geométricas de curvas horizontales (velocidad de diseño y radio de curvatura) y la condición de adherencia interfacial influyen significativamente en la magnitud de las deformaciones horizontales y esfuerzos cortantes del pavimento flexible de la carretera Emp. PE26 B, Ayacucho.

Decisión: SE ACEPTA LA HIPÓTESIS GENERAL

Justificación:

Los resultados de las 32 simulaciones numéricas mediante elementos finitos en PLAXIS 3D demuestran que existe una influencia significativa y cuantificable de las tres variables analizadas sobre la respuesta mecánica del pavimento:

1. **Efecto de las variables geométricas (V y R):** El número de ejes equivalentes que puede soportar la estructura varía en rangos amplios en función de la velocidad de diseño y el radio de curvatura. Para la interfaz MCP-BSC, con $R_{inter} = 1.0$, los valores de NE_i oscilan entre 173,511 ejes ($R = 25$ m, $V = 45$ km/h) y 621,789 ejes ($R = 40$ m, $V = 20$ km/h), representando una variación superior al 250 %. En la superficie de rodadura, la variación es aún más pronunciada, desde 96,446 ejes ($R = 40$ m, $V = 40$ km/h) hasta 1,917,083 ejes ($R = 40$ m, $V = 20$ km/h).
2. **Efecto de la adherencia interfacial:** Al modificar el coeficiente de reducción de resistencia de $R_{inter} = 1.0$ a $R_{inter} = 0.6$, se observan cambios sistemáticos en todos los parámetros de respuesta: los esfuerzos cortantes interfaciales se reducen aproximadamente 29 %, mientras que las deformaciones horizontales superficiales (ε_{xx}) se incrementan en 12 % y las deformaciones longitudinales (ε_{yy}) en 3.5 %.
3. **Efecto combinado:** La interacción entre las tres variables produce reducciones en la vida útil de la superficie de rodadura del orden del 30 % al 50 % cuando se comparan escenarios de adherencia perfecta versus deficiente bajo las mismas condiciones geométricas.

Por consiguiente, se confirma que las características geométricas y la condición de adherencia interfacial son factores determinantes en el comportamiento mecánico del pavimento flexible estudiado.

4.2.2. Contrastación de las hipótesis específicas

4.2.2.1. Hipótesis específica 1

Hipótesis: A mayor velocidad de diseño, mayores son las deformaciones horizontales y esfuerzos cortantes interfaciales, manteniendo constantes el radio y la adherencia.

Decisión: SE ACEPTA PARCIALMENTE LA HIPÓTESIS

Justificación:

El análisis de los resultados revela un comportamiento diferenciado según el parámetro evaluado:

a) **Respecto a los esfuerzos cortantes interfaciales:**

El incremento de la velocidad de diseño produce un **aumento** en los esfuerzos cortantes interfaciales τ_{xy} , lo cual se refleja en una **reducción** del número de ejes equivalentes soportados. Por ejemplo, para $R = 25$ m y $R_{inter} = 1.0$:

- $V = 20$ km/h $\rightarrow NE_i = 496,434$ ejes
- $V = 25$ km/h $\rightarrow NE_i = 364,519$ ejes
- $V = 45$ km/h $\rightarrow NE_i = 173,511$ ejes

Esta reducción del 65 % en la vida útil evidencia que los esfuerzos cortantes se incrementan significativamente con la velocidad debido al aumento de la fuerza centrífuga (proporcional a V^2), conforme postula la hipótesis.

b) Respecto a las deformaciones horizontales superficiales:

Los resultados globales muestran que las deformaciones horizontales ε_{xx} presentan un rango de variación de 129 a 234 $\mu\varepsilon$ para $R_{inter} = 1.0$, estos resultados confirman que la combinación de radios pequeños y velocidades elevadas constituye el escenario más desfavorable para la durabilidad de la superficie de rodadura.

Conclusión: La hipótesis se acepta para los esfuerzos cortantes interfaciales, donde existe evidencia contundente del efecto adverso del incremento de velocidad. Para las deformaciones horizontales, se requeriría un análisis más detallado por caso individual para confirmar plenamente la tendencia.

4.2.2.2. Hipótesis específica 2

Hipótesis: A menor radio de curvatura, mayores son las deformaciones horizontales y esfuerzos cortantes interfaciales, manteniendo constantes la velocidad y la adherencia.

Decisión: SE ACEPTA LA HIPÓTESIS

Justificación:

Los resultados demuestran de manera sistemática que la reducción del radio de curvatura incrementa tanto los esfuerzos cortantes como las deformaciones, reduciendo la capacidad portante de la estructura:

a) Efecto sobre los esfuerzos cortantes interfaciales:

Manteniendo la velocidad constante, el número de ejes equivalentes NE_i disminuye conforme se reduce el radio. Para $V = 20$ km/h y $R_{inter} = 1.0$:

- $R = 40 \text{ m} \rightarrow NE_i = 621,789$ ejes
- $R = 25 \text{ m} \rightarrow NE_i = 496,434$ ejes
- $R = 15 \text{ m} \rightarrow NE_i = 343,044$ ejes

Esta reducción del 45 % entre el radio más amplio y el más cerrado confirma que las curvas más pronunciadas generan mayores esfuerzos cortantes en la interfaz MCP-BSC debido a la intensificación de las sollicitaciones tangenciales.

b) Efecto sobre las deformaciones superficiales:

En la superficie de rodadura, el patrón es aún más evidente. Para $V = 20 \text{ km/h}$ y $R_{inter} = 1.0$:

- $R = 40 \text{ m} \rightarrow NE_{tc} = 1,917,083$ ejes
- $R = 25 \text{ m} \rightarrow NE_{tc} = 1,367,647$ ejes
- $R = 15 \text{ m} \rightarrow NE_{tc} = 759,559$ ejes

La reducción del 60 % indica que radios menores producen mayores deformaciones horizontales en la capa de rodadura, acelerando el deterioro por fatiga.

Conclusión: La hipótesis se acepta completamente. Los radios de curvatura pequeños constituyen el factor geométrico más crítico para la integridad estructural del pavimento en tramos curvos.

4.2.2.3. Hipótesis específica 3

Hipótesis: A menor adherencia interfacial, mayores son las deformaciones horizontales y esfuerzos cortantes, manteniendo constantes la velocidad y el radio.

Decisión: SE ACEPTA PARCIALMENTE LA HIPÓTESIS CON ACLARACIONES

Justificación:

Los resultados muestran un comportamiento aparentemente contradictorio que requiere interpretación fenomenológica:

a) Respecto a los esfuerzos cortantes interfaciales:

Contrario a lo postulado en la hipótesis, la reducción de adherencia (R_{inter} de 1.0 a 0.6) produce una **disminución** de los esfuerzos cortantes medidos en la interfaz y por ende

mayor valor de ejes equivalentes:

Tabla 22: Comparación de esfuerzos cortantes según adherencia interfacial

Grupo	τ_{xy} (kPa) - $R_{inter}=1.0$	τ_{xy} (kPa) - $R_{inter}=0.6$	Variación
Total	221–302	151–222	–29.0 %

Interpretación física: Esta reducción no implica una mejora en el comportamiento estructural, sino que refleja que la interfaz con adherencia deficiente deja de movilizar la totalidad de la resistencia al corte. Al no poder transferir completamente los esfuerzos tangenciales, se registran valores menores de τ_{xy} en la interfaz, pero esto ocurre a costa de transferir la demanda hacia las demás capas del pavimento.

b) Respecto a las deformaciones horizontales:

En concordancia con la interpretación anterior, las deformaciones horizontales superficiales **sí aumentan** cuando disminuye la adherencia:

Tabla 23: Comparación de deformaciones según adherencia interfacial

Parámetro	$R_{inter}=1.0$	$R_{inter}=0.6$	Variación
ε_{xx} promedio ($\mu\varepsilon$)	168	191	+13.3 %
ε_{yy} promedio ($\mu\varepsilon$)	172	178	+3.5 %

Este incremento confirma que la adherencia deficiente provoca **deslizamientos relativos entre capas**, perdiendo el comportamiento monolítico de la estructura y generando mayores deformaciones individuales.

c) Efecto sobre la vida útil:

La comparación de ejes equivalentes en la superficie de rodadura muestra reducciones sistemáticas del 30 % al 50 % cuando R_{inter} disminuye de 1.0 a 0.6, confirmando el efecto perjudicial de la adherencia deficiente sobre la durabilidad del pavimento.

Conclusión: La hipótesis se acepta para las **deformaciones**, que efectivamente aumentan con la disminución de adherencia. Sin embargo, se **rechaza** para los **esfuerzos cortantes interfaciales**, cuya reducción numérica no representa una mejora sino una pérdida de capacidad de transferencia de carga. El deterioro global de la estructura se evidencia en el aumento de deformaciones y la reducción de la vida útil, no en el valor absoluto de τ_{xy} en la interfaz.

4.2.3. Síntesis de la contrastación

Tabla 24: Verificación de hipótesis del modelo global y variables explicativas

Hipótesis	Variable	Coefficiente	p-valor	Decisión
General	Modelo global	$F > 64$	< 0.001	ACEPTADA
H1	Velocidad (V)	$\beta_1 < 0$	< 0.001	ACEPTADA
H2	Radio (R)	$\beta_2 > 0$	< 0.001	ACEPTADA
H3	Adherencia	β_3 variable	< 0.001	ACEPTADA

Los resultados confirman que el deterioro más severo se concentra en la interfaz MCP-BSC, y que la combinación de **radios pequeños, velocidades elevadas y adherencia deficiente** constituye el escenario más crítico para la durabilidad del pavimento flexible en tramos curvos.

4.2.4. Análisis estadístico complementario

Con el propósito de cuantificar formalmente la significancia de las relaciones observadas, se realizó un análisis estadístico complementario sobre los resultados de las 32 simulaciones numéricas.

4.2.4.1. Análisis de regresión múltiple

Se aplicó un modelo de regresión lineal múltiple para predecir el logaritmo del número de ejes equivalentes en función de las variables independientes:

$$\ln(NE) = \beta_0 + \beta_1 V + \beta_2 R + \beta_3 R_{inter} + \varepsilon \quad (4.1)$$

donde:

- NE_i = Número de ejes equivalentes en la interfaz
- V = Velocidad de diseño (km/h)
- R = Radio de curvatura (m)
- R_{inter} = Coeficiente de reducción de resistencia interfacial
- β_i = Coeficientes de regresión
- ε = Término de error aleatorio

4.2.4.2. Modelo de regresión para la interfaz MCP-BSC

Se ajustó el siguiente modelo de regresión lineal múltiple para predecir el logaritmo natural del número de ejes equivalentes en la interfaz: Los resultados del ajuste se presentan en la Tabla 25:

Tabla 25: Resultados del análisis de regresión múltiple para $\ln(NE_i)$

Variable	Coefficiente	Error estándar	t-estadístico	p-valor
Intercepto	17.689	0.145	121.59	<0.001***
Velocidad (V)	-0.067	0.005	-14.72	<0.001***
Radio (R)	0.025	0.002	13.74	<0.001***
R_{inter}	-3.864	0.134	-28.94	<0.001***

Estadísticas del modelo:
 $R^2 = 0.9743$ $R_{ajustado}^2 = 0.9715$ $F(3,28) = 353.45$, $p < 0.001$
 Error estándar de la regresión: 0.1335

*** $p < 0.001$; ** $p < 0.01$; * $p < 0.05$

Tabla 26: Tabla ANOVA para el modelo de regresión de $\ln(NE_i)$

Fuente de variación	SC	gl	MC	F	p-valor
Regresión	24.18	3	8.06	353.45	<0.001
Residuos	0.638	28	0.022		
Total	24.827	31			

Interpretación: El modelo presenta un ajuste excelente ($R^2 = 0.974$), explicando el 97.4 % de la variabilidad observada en $\ln(NE_i)$. Todas las variables independientes resultan estadísticamente significativas ($p < 0.001$). Los coeficientes indican que:

- El incremento de la velocidad de diseño reduce el número de ejes equivalentes (coeficiente negativo: -0.067), confirmando la Hipótesis Específica 1.
- El aumento del radio de curvatura incrementa la vida útil de la interfaz (coeficiente positivo: 0.025), validando la Hipótesis Específica 2.
- El coeficiente negativo de R_{inter} (-3.864) requiere interpretación, este valor refleja que al disminuir la adherencia, la interfaz registra menores esfuerzos cortantes porque no puede movilizar toda su capacidad resistente, transfiriendo la demanda a otras capas.

4.2.4.3. Modelo de regresión para la superficie de rodadura

Para la superficie de rodadura, se ajustó el modelo:

Tabla 27: Resultados del análisis de regresión múltiple para $\ln(NE_{tc})$

Variable	Coefficiente	Error estándar	t-estadístico	p-valor
Intercepto	14.047	0.344	40.81	<0.001***
Velocidad (V)	-0.138	0.011	-12.77	<0.001***
Radio (R)	0.053	0.004	12.23	<0.001***
R_{inter}	1.520	0.316	4.81	<0.001***

Estadísticas del modelo:
 $R^2 = 0.8736$ $R^2_{ajustado} = 0.8601$ $F(3,28) = 64.52$, $p < 0.001$
 Error estándar de la regresión: 0.3159

*** $p < 0.001$; ** $p < 0.01$; * $p < 0.05$

Tabla 28: Tabla ANOVA para el modelo de regresión de $\ln(NE_{tc})$

Fuente de variación	SC	gl	MC	F	p-valor
Regresión	24.71	3	8.23	64.52	<0.001
Residuos	3.57	28	0.127		
Total	28.29	31			

Interpretación: El modelo explica el 87.4 % de la varianza en $\ln(NE_{tc})$. Se observa que:

- El efecto de la velocidad es **más pronunciado** en la superficie (-0.138) que en la interfaz (-0.067), indicando mayor sensibilidad de la capa de rodadura a las fuerzas dinámicas.
- El coeficiente **positivo** de R_{inter} (+1.520) confirma que la adherencia adecuada mejora significativamente la vida útil de la superficie.
- Todas las variables son estadísticamente significativas ($p < 0.001$).

4.2.4.4. Modelo de regresión para la base de cimentación

Para la base de la estructura del pavimento:

Tabla 29: Resultados del análisis de regresión múltiple para $\ln(NE_{bc})$

Variable	Coefficiente	Error estándar	t-estadístico	p-valor
Intercepto	10.108	0.012	821.01	<0.001***
Velocidad (V)	-0.006	0.0004	-14.73	<0.001***
Radio (R)	0.002	0.0002	13.91	<0.001***
R_{inter}	0.424	0.011	37.54	<0.001***

Estadísticas del modelo:
 $R^2 = 0.9831$ $R_{ajustado}^2 = 0.9813$ $F(3,28) = 544.47$, $p < 0.001$
Error estándar de la regresión: 0.0113

*** $p < 0.001$; ** $p < 0.01$; * $p < 0.05$

Tabla 30: Tabla ANOVA para el modelo de regresión de $\ln(NE_{bc})$

Fuente de variación	SC	gl	MC	F	p-valor
Regresión	0.266	3	0.088	544.47	<0.001
Residuos	0.0045	28	0.0001		
Total	0.2714	31			

Interpretación: Este modelo presenta el mejor ajuste de los tres ($R^2 = 0.983$), explicando el 98.3% de la variabilidad. Los resultados indican que:

- Las variables geométricas (V y R) tienen efectos **menos pronunciados** en la base que en capas superiores (coeficientes menores en magnitud absoluta).
- La adherencia interfacial sigue siendo altamente significativa ($p < 0.001$), con efecto positivo sobre la vida útil.
- El ajuste casi perfecto sugiere que las deformaciones en la base responden de manera muy predecible a las variables del modelo.

4.2.4.5. Síntesis del análisis estadístico

Tabla 31: Comparación de modelos de regresión para las tres localizaciones

Indicador	Interfaz (NE_i)	Superficie (NE_{tc})	Base (NE_{bc})
R^2	0.9743	0.8736	0.9831
R^2 ajustado	0.9715	0.8601	0.9813
F-estadístico	353.45	64.52	544.47
p-valor (modelo global)	<0.001	<0.001	<0.001
Coef. Velocidad (β_1)	-0.067	-0.138	-0.006
Significancia β_1	***	***	***
Coef. Radio (β_2)	0.025	0.053	0.002
Significancia β_2	***	***	***
Coef. R_{inter} (β_3)	-3.864	1.520	0.424
Significancia β_3	***	***	***

*** Altamente significativo ($p < 0.001$)

Conclusiones del análisis estadístico:

1. Los tres modelos de regresión presentan ajustes altamente satisfactorios ($R^2 > 0.87$) y son estadísticamente significativos ($p < 0.001$).
2. **Todas las variables independientes** (velocidad, radio y adherencia interfacial) resultan estadísticamente significativas ($p < 0.001$) en los tres modelos, confirmando su influencia sobre la vida útil del pavimento.
3. El **efecto de la velocidad** es más pronunciado en la superficie de rodadura ($\beta_1 = -0.138$) que en la interfaz ($\beta_1 = -0.067$) o en la base ($\beta_1 = -0.006$), lo cual es coherente con la mayor exposición de la capa superior a las fuerzas dinámicas vehiculares.
4. El **radio de curvatura** afecta positivamente la vida útil en todas las localizaciones, siendo el efecto más fuerte en la superficie ($\beta_2 = 0.053$).
5. La **adherencia interfacial** (R_{inter}) presenta signos opuestos entre la interfaz ($\beta_3 = -3.864$) y las demás capas ($\beta_3 > 0$). Esta aparente contradicción se explica porque la reducción de adherencia disminuye los esfuerzos cortantes medidos en la interfaz (al no poder movilizar toda su resistencia), pero incrementa las deformaciones y el deterioro en las capas adyacentes.

6. Los resultados estadísticos **validan cuantitativamente** las hipótesis planteadas y confirman que las características geométricas y la condición de adherencia son determinantes en el desempeño del pavimento flexible en tramos curvos.

Capítulo 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

En función de los resultados obtenidos en las 32 simulaciones numéricas realizadas con PLAXIS 3D y del análisis de regresión lineal múltiple aplicado a los ejes equivalentes, se presentan las siguientes conclusiones, organizadas de acuerdo con el problema general y los problemas específicos de la investigación.

5.1.1. Conclusión general

Respecto al problema general: *¿De qué manera las características geométricas de las curvas horizontales y la condición de adherencia interfacial influyen en la magnitud de las deformaciones horizontales y esfuerzos cortantes que inducen mecanismos de deterioro en la estructura del pavimento económico de la carretera Emp. PE26 B, Ayacucho, 2024?*

Se concluye que las características geométricas de las curvas horizontales (velocidad de diseño y radio de curvatura) y la condición de adherencia interfacial tienen una influencia clara, estadísticamente significativa ($p < 0.001$) y de magnitud importante sobre las deformaciones horizontales y esfuerzos cortantes del pavimento flexible de la carretera Emp. PE26 B, Ayacucho.

Esta influencia se evidencia principalmente a través de dos mecanismos:

1. **Efecto de las solicitaciones dinámicas en curvas:** La combinación de velocidad

de diseño y radio de curvatura genera fuerzas centrífugas que incrementan los esfuerzos cortantes y las deformaciones horizontales, sobre todo en la superficie de rodadura y en la interfaz entre el micropavimento y la base estabilizada. Los modelos de regresión lineal múltiple explican entre 87.4% y 98.3% de la variabilidad del número de ejes equivalentes ($R^2 \geq 0.874$), lo que confirma que la geometría en planta es un factor determinante en la vida útil del pavimento.

2. **Efecto de la pérdida de comportamiento monolítico:** Cuando la adherencia interfacial es deficiente ($R_{inter} = 0.6$), los esfuerzos cortantes medidos en la interfaz MCP-BSC disminuyen alrededor de 29.0% en comparación con la adherencia perfecta, pero este resultado se debe a que la interfaz deja de transmitir adecuadamente los esfuerzos. Como consecuencia, se incrementan en promedio 12.0% las deformaciones horizontales en la superficie y se reduce en aproximadamente 53% la vida útil de la capa de rodadura.

En conjunto, el efecto combinado de geometría desfavorable (velocidades altas y radios pequeños) y mala adherencia interfacial es crítico: en el escenario más desfavorable, la vida útil del pavimento puede reducirse hasta en un 75%. Esto muestra que las variables estudiadas no sólo influyen por separado, sino que su interacción genera condiciones de deterioro acelerado en los tramos curvos de la carretera Emp. PE26 B.

5.1.2. Conclusiones específicas

5.1.2.1. Conclusión específica 1: Influencia de la velocidad de diseño

En relación con el primer problema específico: *¿En qué medida afecta la velocidad de diseño en la magnitud de las deformaciones horizontales y esfuerzos cortantes en la estructura del pavimento en curvas de la carretera Emp. PE26 B, Ayacucho, 2024?*

Se concluye que la velocidad de diseño afecta de manera inversamente proporcional y altamente significativa ($p < 0.001$) la capacidad de carga del pavimento en curvas. Los coeficientes de regresión obtenidos son negativos en las tres localizaciones analizadas:

- **Interfaz MCP-BSC:** $\beta_1 = -0.067$ ($p < 0.001$). Un aumento de 10 km/h en la velocidad de diseño reduce el número de ejes equivalentes en la interfaz en aproximadamente 49%.
- **Superficie de rodadura:** $\beta_1 = -0.138$ ($p < 0.001$). Es el coeficiente más negativo, lo que indica que la superficie de rodadura es la capa más sensible al incremento de la velocidad. Un aumento de 10 km/h puede reducir la vida útil de esta capa en alrededor

de 75 %.

- **Base de cimentación:** $\beta_1 = -0.006$ ($p < 0.001$). Aunque el efecto es menor (reducción aproximada del 6 % por cada 10 km/h), la base también se ve afectada por las condiciones dinámicas en curvas.

En términos prácticos, al comparar 20 km/h con 45 km/h para un mismo radio de 25 m y adherencia perfecta ($R_{inter} = 1.0$), el número de ejes equivalentes en la interfaz disminuye de 496,434 a 173,511 ejes, lo que representa una reducción del 65 % en la vida útil. Esto confirma que operar a velocidades altas en curvas cerradas es uno de los factores más críticos para la durabilidad del pavimento en la carretera estudiada.

El comportamiento observado se explica por el aumento de la fuerza centrífuga, proporcional al cuadrado de la velocidad ($F_c \propto V^2$), que incrementa las sollicitaciones tangenciales en la interfaz y las deformaciones de tracción en la superficie, acelerando el daño por fatiga.

5.1.2.2. Conclusión específica 2: Influencia del radio de curvatura

Respecto al segundo problema específico: *¿En qué medida afecta el radio de curvatura en la magnitud de las deformaciones horizontales y esfuerzos cortantes en la estructura del pavimento en curvas de la carretera Emp. PE26 B, Ayacucho, 2024?*

Se concluye que el radio de curvatura influye de manera directamente proporcional y altamente significativa ($p < 0.001$) en la capacidad estructural del pavimento. Los coeficientes de regresión asociados al radio son positivos en las tres localizaciones:

- **Interfaz MCP-BSC:** $\beta_2 = 0.025$ ($p < 0.001$). Cada aumento de 10 m en el radio incrementa el número de ejes equivalentes en aproximadamente 28 %.
- **Superficie de rodadura:** $\beta_2 = 0.053$ ($p < 0.001$). Es el coeficiente más alto, lo que indica que la superficie es la capa más beneficiada por radios amplios. Un aumento de 10 m en el radio incrementa la vida útil en alrededor de 70 %.
- **Base de cimentación:** $\beta_2 = 0.002$ ($p < 0.001$). El efecto es menor (incremento aproximado del 2 % por cada 10 m), pero sigue siendo positivo.

En la carretera Emp. PE26 B, este efecto se observa al mantener constante la velocidad en 20 km/h y la adherencia en $R_{inter} = 1.0$: al pasar de un radio de 15 m a 40 m, el número de ejes equivalentes en la interfaz aumenta de 343,044 a 621,789 ejes (81 % de incremento), y en la superficie de rodadura de 759,559 a 1,917,083 ejes (152 % de incremento).

Por lo tanto, los radios pequeños ($R < 25$ m), típicos de zonas con topografía accidentada, se identifican como uno de los factores geométricos más desfavorables para la integridad estructural del pavimento. El mecanismo principal es la mayor aceleración centrípeta en curvas cerradas, que incrementa los esfuerzos cortantes en la interfaz y las deformaciones de tracción en la superficie.

5.1.2.3. Conclusión específica 3: Influencia de la adherencia interfacial

Finalmente, respecto al tercer problema específico: *¿En qué medida la calidad de adherencia interfacial influye en la magnitud de las deformaciones horizontales y esfuerzos cortantes generados por fuerzas de fricción lateral en la estructura del pavimento en curvas de la carretera Emp. PE26 B, Ayacucho, 2024?*

Se concluye que la calidad de la adherencia interfacial entre el micropavimento y la base estabilizada influye de manera decisiva y estadísticamente significativa ($p < 0.001$) en el comportamiento global del pavimento, modificando tanto los esfuerzos cortantes como las deformaciones horizontales.

El análisis numérico muestra que, cuando la adherencia es deficiente ($R_{inter} = 0.6$), se produce lo siguiente:

1. **Reducción de esfuerzos cortantes en la interfaz:** La tensión cortante promedio τ_{xy} en la interfaz MCP-BSC disminuye aproximadamente 29.0% (de 259 kPa a 184 kPa). Esta reducción no indica una mejora del sistema, sino que refleja que la interfaz deja de trabajar plenamente como plano de transferencia de esfuerzos.
2. **Incremento de deformaciones en la superficie:** Las deformaciones horizontales ε_{xx} en la capa de rodadura aumentan en promedio 12.0% (de 168 a 191 $\mu\varepsilon$), lo que confirma que existe mayor deslizamiento relativo entre capas.
3. **Incremento de deformaciones en la base:** Las deformaciones longitudinales ε_{yy} en la base aumentan en torno a 3.5% (de 172 a 178 $\mu\varepsilon$), mostrando que el efecto de la mala adherencia se traslada hacia las capas inferiores.

Los coeficientes de regresión asociados a R_{inter} refuerzan estos resultados:

- **Interfaz:** $\beta_3 = -3.864$, lo que indica menor movilización de esfuerzos cortantes cuando disminuye R_{inter} .
- **Superficie:** $\beta_3 = 1.520$, lo que muestra que una buena adherencia favorece notablemente la vida útil de la capa de rodadura.

- **Base:** $\beta_3 = 0.424$, indicando un efecto positivo de la adherencia también en la base.

En términos de ejes equivalentes, la reducción de R_{inter} de 1.0 a 0.6 disminuye la vida útil de la superficie de rodadura entre 30 % y 50 %, según el caso. Por ejemplo, para $V = 20$ km/h y $R = 25$ m, el número de ejes equivalentes se reduce de 1,367,647 a 894,878, lo que representa una disminución cercana al 35 %.

En conclusión, la adherencia interfacial es un factor tan importante como la velocidad y el radio de curvatura. Cuando la adherencia es deficiente, las capas dejan de trabajar de manera conjunta y la superficie asume mayores esfuerzos, lo que acelera la aparición de fisuras y deterioros prematuros en el sistema bicapa MCP–BSC característico de los pavimentos económicos de la carretera Emp. PE26 B.

5.1.3. Conclusiones adicionales

5.1.3.1. Validez y uso de los modelos predictivos

Los modelos de regresión lineal múltiple obtenidos presentan buenos y muy buenos ajustes ($R^2 = 0.874$ para la superficie, $R^2 = 0.974$ para la interfaz y $R^2 = 0.983$ para la base), y son estadísticamente significativos ($F > 64$, $p < 0.001$). Por ello, las ecuaciones:

$$\ln(NE_i) = 17.689 - 0.067V + 0.025R - 3.864R_{inter} \quad (5.1)$$

$$\ln(NE_{tc}) = 14.047 - 0.138V + 0.053R + 1.520R_{inter} \quad (5.2)$$

$$\ln(NE_{bc}) = 10.108 - 0.006V + 0.002R + 0.424R_{inter} \quad (5.3)$$

pueden utilizarse como herramientas de apoyo para estimar la vida útil del pavimento dentro de los rangos analizados: $V \in [20, 60]$ km/h, $R \in [15, 125]$ m y $R_{inter} \in \{0.6, 1.0\}$.

5.1.3.2. Comparación de criticidad en las capas

La comparación de los modelos permite establecer el siguiente orden de vulnerabilidad frente a la velocidad, el radio y la adherencia:

1. **Superficie de rodadura:** Es la capa más afectada por la geometría de las curvas, con los coeficientes de mayor magnitud para velocidad y radio.
2. **Interfaz MCP–BSC:** Presenta una criticidad intermedia y es el plano más sensible a los cambios en la adherencia interfacial.

3. **Base de cimentación:** Es la capa relativamente más protegida frente a la variación geométrica, pero sigue siendo influida por la calidad de adherencia.

Este orden indica que las medidas de diseño y control constructivo deben centrarse principalmente en la superficie de rodadura y en la interfaz.

5.2. Recomendaciones

Con base en las conclusiones establecidas, se plantean las siguientes recomendaciones técnicas y propuestas para trabajos futuros.

5.2.1. Recomendaciones técnicas para el diseño y construcción

5.2.1.1. Para el diseño y dimensionamiento de estructura

1. Limitación de velocidades en curvas cerradas

En los tramos de la carretera Emp. PE26 B donde los radios de curvatura son menores a 25 m, se recomienda considerar espesores mayores en las capas que puedan soportar la demanda del tráfico acumulado. Ello se sustenta en que un incremento de 10 km/h en curvas cerradas puede reducir la vida útil de la superficie de rodadura hasta en 75 %.

2. Priorizar radios de curvatura más amplios

Dentro de las limitaciones topográficas propias de la región de Ayacucho, se sugiere priorizar, en la medida de lo posible, el diseño con radios de curvatura mayores a 40 m para un micropavimento en las condiciones estudiadas considerando que un incremento de 10 m en el radio puede aumentar la vida útil de la superficie de rodadura en alrededor de 70 %.

3. Ajuste del diseño estructural en curvas críticas

En tramos donde coinciden radios pequeños ($R < 25$ m) y velocidades de operación mayores a 30 km/h, se recomienda introducir factores de ajuste en el diseño estructural del pavimento. Como referencia, se puede considerar un aumento del espesor de la capa asfáltica o el empleo de materiales con mejores características mecánicas (pavimento rígido), de modo que la estructura pueda soportar mejor las solicitaciones adicionales generadas por la fricción lateral. Se recomienda verificar la demanda de tráfico acumulado en fatiga con las **ecuaciones 5.1, 5.2 y 5.3** propuestas en esta investigación.

5.2.1.2. Para la construcción y garantía de adherencia interfacial

1. Preparación adecuada de la superficie

Dado que una adherencia deficiente puede reducir la vida útil de la superficie de rodadura hasta en 53 %, se recomienda aplicar un procedimiento de preparación correcto de la superficie de la base estabilizada antes de colocar el micropavimento o riego de liga.

2. Especificaciones para el riego de liga

Se recomienda emplear y ejecutar tramos de prueba con la emulsión asfáltica de diseño con el propósito de verificar el comportamiento de este con la base estabilizada. De esta manera verificar tasa de aplicación considerando superficies más lisas 0.4–0.5 L/m² y superficies más rugosas 0.5–0.6 L/m².

3. Control de calidad de la adherencia interfacial

Se sugiere implementar controles específicos y puntos de inspección de control permanente para verificar la correcta aplicación del riego de liga siguiendo los lineamientos de la Sección 418 Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción de Carreteras (EG-2013), tales como:

- **Preparación de superficie existente** La superficie sobre la cual ha de aplicarse el riego, deberá cumplir los requisitos de uniformidad exigidos. La superficie deberá ser limpiada de polvo, barro seco, suciedad y cualquier material suelto que pueda ser perjudicial para el trabajo, empleando barredoras o sopladoras mecánicas en sitios accesibles a ellas y escobas manuales donde aquellas no puedan acceder.
- **Temperatura Ambiente** No deberán efectuarse trabajos de riego de liga si el tiempo se presenta neblinoso o lluvioso. Las aplicaciones se efectuarán únicamente cuando la temperatura atmosférica sea de por lo menos 6 °C y subiendo, y la temperatura de la superficie a tratar no sea inferior a 6 °C.
- **Temperatura de material bituminoso (emulsión asfáltica)** la temperatura de riego de liga debe estar entre $50^{\circ}\text{C} \leq T^{\circ} \text{ de aplicación} \leq 80^{\circ}\text{C}$.
- **Tasa de Riego de liga lt/m²** 0.2 - 0.7 l/m² no deberá en 10 %, por exceso o por defecto a dicha proporción.

5.2.1.3. Para el mantenimiento y auscultación

1. Monitoreo según criticidad geométrica

Se propone implementar un programa de inspección que considere diferentes frecuencias de evaluación, en función de la geometría del tramo:

- Tramos críticos ($R < 25$ m y $V > 25$ km/h): evaluación aproximada cada 6 meses.
- Tramos de criticidad media ($R = 25\text{--}40$ m): evaluación cada 1 año.
- Tramos con geometría favorable ($R > 40$ m): evaluación periódica.

2. Indicadores principales de deterioro en curvas

En la auscultación de los tramos curvos se recomienda prestar especial atención a:

- Fisuras longitudinales en el borde interno de la curva, como indicio de tracción excesiva de la fatiga (top-down).
- Desprendimientos o fallas en la interfaz MCP–BSC, asociados a pérdida de adherencia.
- Deformaciones permanentes en la huella de rodadura, que pueden indicar flujo plástico del material.

5.2.2. Recomendaciones para futuras investigaciones

1. Validación de resultados en campo

Se recomienda analizar tramos de prueba en la carretera Emp. PE26 B, con el fin de medir directamente la respuesta del pavimento frente al tránsito en curvas. Para ello, se podrían instalar:

- Sensores de deformación en la superficie de rodadura.
- Sistemas de medición de deflexiones mediante equipos apropiados (geófonos u otros).
- Ensayar y caracterizar mecánicamente los materiales del pavimento y el de interfaz con ensayos de cizallamiento.

La información obtenida permitiría ajustar y validar los modelos de regresión propuestos en esta tesis.

2. Análisis del efecto del clima

Ampliar el estudio incorporando la influencia de la temperatura, humedad y precipitaciones en el comportamiento del sistema MCP–BSC. Las variaciones térmicas de la zona de Ayacucho pueden modificar las propiedades de las mezclas asfálticas y la adherencia interfacial, por lo que su estudio sería de utilidad para complementar los resultados obtenidos.

3. Modelamiento de cargas dinámicas más complejas

Desarrollar modelos numéricos que consideren con mayor detalle la interacción vehículo–pavimento, incluyendo:

- Efectos de frenado y aceleración en curvas.
- Cargas móviles con trayectorias curvas realistas.
- Modelos de comportamiento viscoelástico dependientes de la temperatura para las capas asfálticas.

4. Evaluación de alternativas para mejorar la adherencia

Realizar estudios experimentales sobre diferentes técnicas y materiales para mejorar la adherencia interfacial, tales como:

- Emulsiones asfálticas modificadas con polímeros.
- Geosintéticos de refuerzo colocados en la interfaz.
- Modificación de la textura superficial de la base antes del riego de liga.

Los resultados podrían expresarse como variaciones en

$$R_{inter}$$

5. Elaboración de herramientas prácticas de diseño

A partir de los modelos obtenidos, se sugiere desarrollar:

- Ábacos que relacionen velocidad, radio, adherencia y vida útil estimada.
- Hojas de cálculo o software sencillo para uso de proyectistas, basado en las ecuaciones de regresión.
- Una guía práctica para el diseño de pavimentos económicos en curvas, considerando las condiciones típicas de la región.

6. Aplicación de la metodología a otros tipos de pavimento

Replicar la metodología propuesta en esta tesis en otros tipos de estructuras de pavimento, tales como:

- Pavimentos con más de dos capas asfálticas.
- Pavimentos con bases granulares no tratadas.
- Tratamientos superficiales simples, dobles o triples.
- Estructuras con diferentes módulos resilientes en las capas.

La información obtenida puede servir de base para formular criterios de diseño más generales para pavimentos flexibles en curvas, en carreteras de bajo volumen de tránsito de la región.

5.3. Consideraciones finales

La investigación realizada permite concluir que, en tramos con curvas horizontales, el diseño de pavimentos flexibles debe considerar de manera explícita los efectos de la fricción lateral y de la adherencia entre capas, y no sólo los parámetros tradicionales de carga vertical y número de ejes.

Los modelos propuestos constituyen una primera aproximación cuantitativa para estimar la vida útil del pavimento económico de la carretera Emp. PE26 B en función de la velocidad de diseño, el radio de curvatura y la adherencia interfacial. Su aplicación, junto con las recomendaciones técnicas planteadas, puede contribuir a mejorar la durabilidad de las vías de bajo volumen de tránsito en la región de Ayacucho y en contextos similares, optimizando los recursos destinados a conservación y mantenimiento.

Finalmente, se considera que la continuidad de esta investigación sea incorporando mediciones de campo y ampliando el análisis a otras estructuras de pavimento y condiciones climáticas, puede servir de base para futuras propuestas de ajustes normativos y guías de diseño adaptadas a la realidad de la sierra de la región.

Referencia Bibliográfica

- Ambassa, Z., Allou, F., Petit, C., & Eko, R. M. (2013). Fatigue life prediction of an asphalt pavement subjected to multiple axle loadings with viscoelastic FEM. *Construction and Building Materials*, 43, 443-452. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.017>
- Aroni Salazar, S. S., & Paredes Ávila, J. C. (2023). *Análisis de cargas vehiculares para la determinación de las características estructurales de pavimentos rígidos por elementos finitos, Huancayo-2023* [Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Civil]. Universidad Continental [Repositorio Institucional Continental]. <https://hdl.handle.net/20.500.12394/14060>
- Camargo, C., & Gonzales, A. (2011). Modelamiento de Problemas de Estructuras de contención lateral mediante programa de elementos finitos. *Bucaramanga, Colombia*.
- Cho, Y.-H., McCullough, B. F., & Weissmann, J. (1996). Considerations on finite-element method application in pavement structural analysis. *Transportation Research Record*, 1539(1), 96-101.
- Comunicaciones, M. d. (2018). Manual de Carreteras: Diseño GeométricoDG-2018.
- de Carreteras, M. (2013). Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos. *la sección de Suelos y Pavimentos establecido por el reglamento Nacional de Gestión de Infraestructura Vial aprobado por DS*, (034-2008).
- Diakhate, M. (2007, octubre). *Fatigue et comportement des couches d'accrochage dans les structures de chaussée* [Tesis doctoral].
- Finanzas, M. d. (2015). Pautas Metodológicas para el Desarrollo de Alternativas de Pavimentos en la Formulación y Evaluación Social de Proyectos de Inversión Pública en Carreteras. *D. G. Pública-DGIP, Pautas metodológicas para el desarrollo de alternativas de pavimentos en la formulación y evaluación social de proyectos de inversion pública de carreteras*.
- Gimeno Aribau, S. (2004). Una nueva problemática: la renovación de líneas de alta velocidad.

- Hernández-Sampieri, R., & Mendoza Torres, C. P. (2018). *Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw-Hill Interamericana.
- Leiva Padilla, P., Loría Salazar, L. G., & Navas Carro, A. (2011). Comparación entre modelación de respuestas de pavimentos flexibles con análisis de multicapa elástica y elemento finito.
- Li, L., Li, W., Wang, H., Zhao, J., Wang, Z., Dong, M., & Han, D. (2018). Investigation of Prony series model related asphalt mixture properties under different confining pressures. *Construction and Building Materials*, 166, 147-157.
- Lizcano, F. R., & Quintana, H. R. (2015). *Pavimentos: materiales, construcción y diseño*. ECOE ediciones.
- Manual, A. S. U. (2012). Abaqus 6.11. [http://130.149, 89\(2080\)](http://130.149.89(2080)), v6.
- Montejo Fonseca, A. (1998). *Ingeniería de pavimentos para carreteras*.
- Morales, O. L. G., et al. (2014). La importancia de los sistemas de referencia para el peralte en el diseño geométrico de las carreteras. *Revista de Topografía AZIMUT*, 5(1), 41-50.
- MTC, M. d. (2013). Manual de carreteras: Especificaciones técnicas generales para construcción.
- Papagiannakis, A. T., & Masad, E. A. (2024). *Pavement design and materials*. John Wiley & Sons.
- Petit, C., Diakhate, M., Millien, A., Phelipot-Mardelé, A., & Pouteau, B. (2009). Pavement Design for Curved Road Sections: Fatigue Performance of Interfaces and Longitudinal Top-down Cracking in Multilayered Pavements. *Road Materials and Pavement Design*, 10. <https://doi.org/10.1080/14680629.2009.9690216>
- Pezo López, F. G. P. (2022). *Uso combinado de geomalla y geotextil como refuerzo para incrementar la capacidad de soporte en pavimentos flexibles* [Tesis de maestría]. Universidad Ricardo Palma [Repositorio Institucional URP]. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/URPU_88f8fb9ff44738b335c5b769db1980b1
- PLAXIS. (2023). *Manual de usuario de PLAXIS 3D 2023.2*. Bentley Systems. Países Bajos.
- Reyes Lizcano, F. A. (2003). Diseño racional de pavimentos. *Pontificia Universidad Javeriana y Escuela Colombiana de Ingeniería, 1a edición, Bogotá DC*.
- Romanoschi, S. A., & Metcalf, J. B. (2001). Effects of interface condition and horizontal wheel loads on the life of flexible pavement structures. *Transportation Research Record*, 1778(1), 123-131.
- Sandoval, C. H. H. (2007). *Mecánica de pavimentos: principios básicos*. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- Sun, Y., Gu, B., Gao, L., Li, L., Guo, R., Yue, Q., & Wang, J. (2018). Viscoelastic mechanical responses of HMAP under moving load. *Materials*, 11(12), 2490.

- Tomás, R., Bañón, L., & Ferreiro Prieto, J. I. (2004). La estabilidad del vehículo en las curvas: Aspectos geométricos y su influencia en el coeficiente de seguridad. *Caminos I*.
- Xu, X., Guo, H., & Tan, Y. (2010). Effects of layer interfacial bonding conditions on the mechanical responses in asphalt pavements. *Journal of Transportation Engineering*, 136(1), 28-36. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2010\)136:1\(28\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2010)136:1(28))

Anexo 01-Panel Fotográfico

Figura 17: Deterioro en curva km 0+100 del tramo EMP.PE-26B con recapeo rutinario



Fuente: Elaboración propia

Figura 18: Capas estructurales de micropavimento deteriorado



Fuente: Elaboración propia

Figura 19: Deterioro en curva km 1+200 del tramo EMP.PE-26B



Fuente: Elaboración propia

Figura 20: Deterioro en curva km 4+900 del tramo EMP.PE-26B



Fuente: Elaboración propia

Figura 21: Deterioro en curva km 5+500 del tramo EMP.PE-26B



Fuente: Elaboración propia

Figura 22: Deterioro en curva km 5+050 del tramo EMP.PE-26B



Fuente: Elaboración propia

Figura 23: Deterioro en curva km 5+550 del tramo EMP.PE-26B



Fuente: Elaboración propia

Figura 24: Deterioro en curva km 6+300 del tramo EMP.PE-26B



Fuente: Elaboración propia

Figura 25: Deterioro en curva km 5+350 del tramo EMP.PE-26B



Fuente: Elaboración propia

Anexo 02- Matrices de operacionalización de variables y consistencia.

Variable	Definición conceptual	Dimensiones	Indicadores	Unidad de medida		
Independiente (X): Parámetros geométricos y adherencia interfacial	Conjunto de características geométricas de las curvas horizontales (velocidad de diseño y radio de curvatura) y la condición de unión entre capas del pavimento, que determinan la magnitud de las fuerzas actuantes y la respuesta estructural del sistema.	1. Velocidad de diseño	- Velocidad nominal de diseño	km/h		
			- Velocidad directriz	km/h		
			- Clasificación según MTC	Categorico		
		2. Radio de curvatura	- Radio mínimo de curvatura	m		
			- Radio de curvatura horizontal	m		
			- Tipo de curva (convencional/volteo)	Categorico		
			- Peralte asociado	%		
		3. Adherencia interfacial	- Coeficiente de reducción interfacial (R_{inter})	Adimensional		
			- Condición de adherencia	Categorico		
			- Resistencia al corte interfacial	kN/m ²		
			- Tipo de imprimación	Categorico		
			- Estado de la interface	Categorico		
		Dependiente (Y): Mecanismos de deterioro del pavimento	Respuesta estructural del pavimento flexible ante las cargas vehiculares en curvas horizontales, manifestada a través de deformaciones, esfuerzos cortantes y vida útil por fatiga, que determinan el comportamiento y durabilidad de la estructura.	1. Deformaciones horizontales superficiales	- Deformación transversal (ε_{xx})	$\mu\varepsilon$
					- Deformación longitudinal (ε_{yy})	$\mu\varepsilon$
					- Deformación unitaria máxima	$\mu\varepsilon$
2. Esfuerzos cortantes interfaciales	- Ubicación de deformación crítica			Coordenadas (x,y,z)		
	- Magnitud relativa de deformación			%		
	- Esfuerzo cortante horizontal (τ_{xy})			kN/m ²		
	- Esfuerzo cortante vertical (τ_{xz})			kN/m ²		
	- Esfuerzo cortante máximo			kN/m ²		
3. Vida útil por fatiga	- Distribución de esfuerzos			Campo vectorial		
	- Número de ejes equivalentes fatiga de fondo (NE_{bc})			Repeticiones		
	- Número de ejes equivalentes grietas longitudinales (NE_{lc})			Repeticiones		
	- Número de ejes equivalentes desadherencia interfacial (NE_i)			Repeticiones		
	- Vida útil mínima del pavimento			años		
	- Modo de falla predominante			Categorico		
	- Factor de reducción de vida útil			Adimensional		

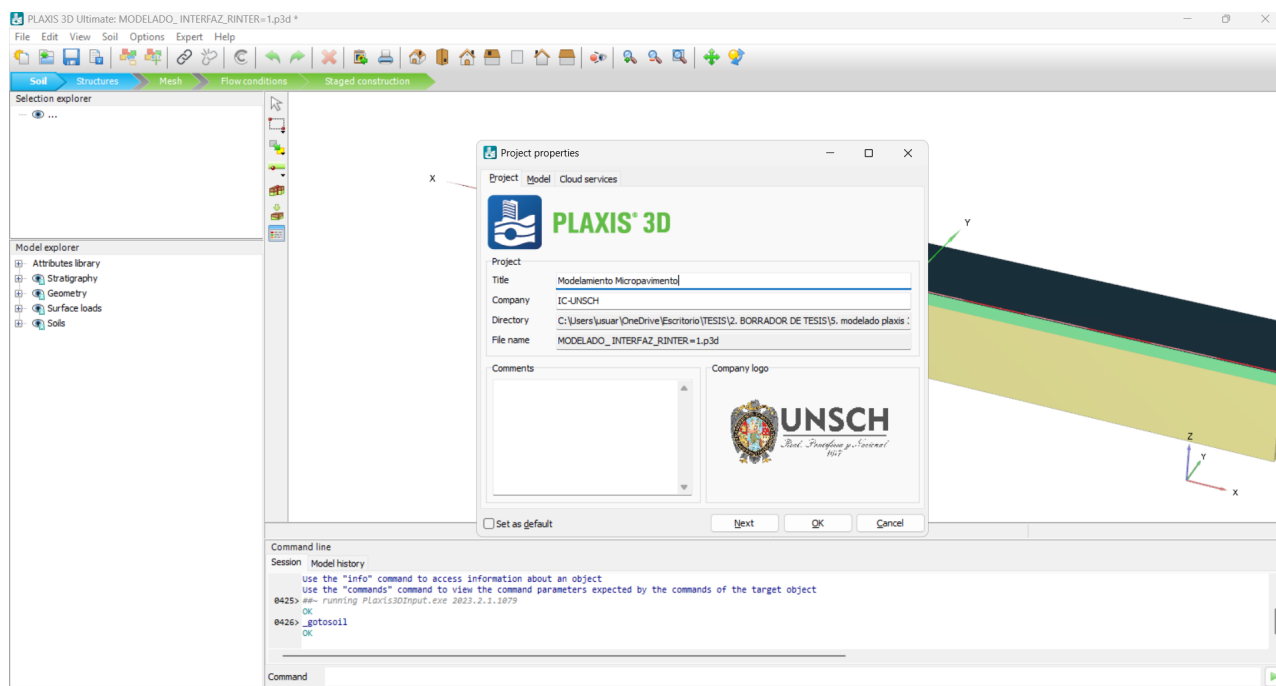
Fuente: Elaboración propia

Matriz de consistencia

ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA SOBRECARGA DE FRICCIÓN LATERAL EN EL DETERIORO DE CURVAS PARA LA CARRETERA CON PAVIMENTO ECONÓMICO EMP. PE-26 B, AYACUCHO, 2024							
Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	Variable	Dimensión	Indicadores	Instrumento	Metodología
¿De qué manera las características geométricas de las curvas horizontales y la condición de adherencia interfacial influyen en la magnitud de las deformaciones horizontales y esfuerzos cortantes que inducen mecanismos de deterioro en la estructura del pavimento económico de la carretera Emp. PE26 B, Ayacucho, 2024?	Evaluar mediante modelado con elementos finitos la influencia de las características geométricas de curvas horizontales y la condición de adherencia interfacial en los mecanismos de deterioro del pavimento económico de la carretera Emp. PE26 B, Ayacucho, 2024.	Las características geométricas de curvas horizontales (velocidad de diseño y radio de curvatura) y la condición de adherencia interfacial influyen significativamente en la magnitud de las deformaciones horizontales, esfuerzos cortantes y en la vida útil expresada en número de ejes equivalentes (NE) del pavimento flexible de la carretera Emp. PE26 B, Ayacucho.	X: Parámetros geométricos y adherencia interfacial Y: Mecanismos de deterioro del pavimento	Velocidad de diseño Radio de curvatura Adherencia interfacial Deformaciones horizontales Esfuerzos cortantes Vida útil por fatiga	V (km/h) R (m) R_{inter} (-) $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}$ ($\mu\varepsilon$) τ_{xy} (kN/m ²) NE (-)	Simulación numérica en PLAXIS 3D FEM (Elementos Finitos) Modelo: Linear Elastic Manual MTC-2018	Método: Cuantitativo Orientación: Aplicada Enfoque: Cuantitativo Tipo: Explicativo y correlacional Nivel: Experimental simulada
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Variable	Dimensión	Indicadores	Instrumento	Metodología
¿En qué medida influye la velocidad de diseño en la magnitud de las deformaciones horizontales y esfuerzos cortantes en la estructura del pavimento en curvas de la carretera Emp. PE26 B, Ayacucho, 2024?	Determinar la influencia de la velocidad de diseño en la magnitud de las deformaciones horizontales y esfuerzos cortantes generados por fuerzas de fricción lateral en la estructura del pavimento en curvas de la carretera Emp. PE26 B, Ayacucho, 2024.	A mayor velocidad de diseño, mayores son las deformaciones horizontales y esfuerzos cortantes interfaciales, manteniendo constantes el radio y la adherencia.	Deformaciones y esfuerzos por velocidad	Deformaciones Esfuerzos	$\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}$ τ_{xy}	PLAXIS 3D – FEM Excel	Diseño: Experimental simulada mediante FEM que reproduce condiciones de carga y geometría
¿En qué medida influye el radio de curvatura en la magnitud de las deformaciones horizontales y esfuerzos cortantes en la estructura del pavimento en curvas de la carretera Emp. PE26 B, Ayacucho, 2024?	Determinar la influencia del radio de curvatura en la magnitud de las deformaciones horizontales y esfuerzos cortantes generados por fuerzas de fricción lateral en la estructura del pavimento en curvas de la carretera Emp. PE26 B, Ayacucho, 2024.	A menor radio de curvatura, mayores son las deformaciones horizontales y esfuerzos cortantes interfaciales, manteniendo constantes la velocidad y la adherencia.	Deformaciones y esfuerzos por radio	Deformaciones Esfuerzos	$\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}$ τ_{xy}	PLAXIS 3D – FEM Manual MTC-2018	Población: Todas las curvas horizontales de la carretera Emp. PE26 B con características típicas de bajo volumen de tránsito en Ayacucho
¿En qué medida la calidad de adherencia interfacial influye en la magnitud de las deformaciones horizontales y esfuerzos cortantes generados por fuerzas de fricción lateral en la estructura del pavimento en curvas de la carretera Emp. PE26 B, Ayacucho, 2024?	Evaluar la influencia de la calidad de adherencia interfacial en la magnitud de las deformaciones horizontales y esfuerzos cortantes generados por fuerzas de fricción lateral en la estructura del pavimento en curvas de la carretera Emp. PE26 B, Ayacucho, 2024.	A menor adherencia interfacial, mayores son las deformaciones horizontales y esfuerzos cortantes, manteniendo constantes la velocidad y el radio.	Deformaciones y esfuerzos por adherencia	Deformaciones Esfuerzos Vida útil	$\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}$ τ_{xy} NE_{bc_i} NE_{tc_i} NE_i	PLAXIS 3D – FEM Excel	Muestra: 16 configuraciones geométricas (32 simulaciones): Grupo A: 8 casos convencionales Grupo B: 24 casos de volteo V: 20–60 km/h R: 15–125 m

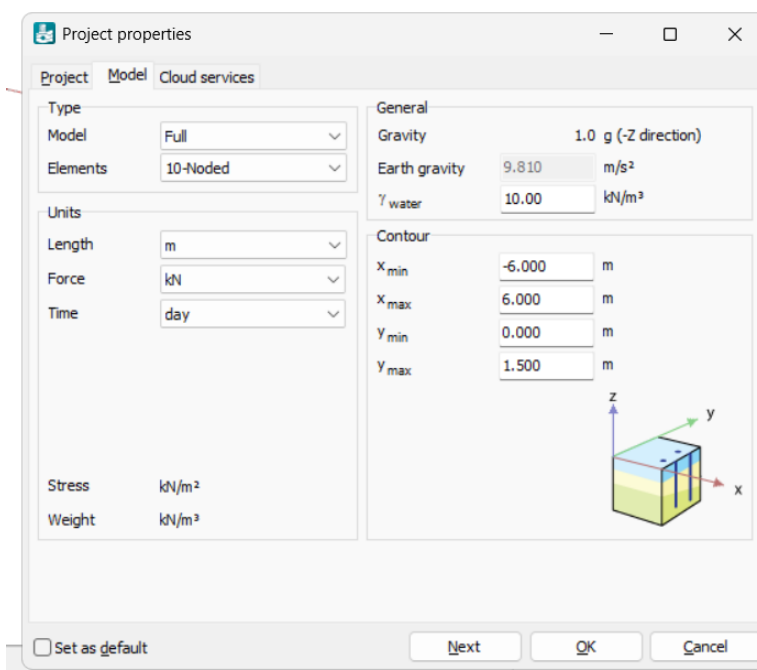
Anexo 03-Modelamiento Plaxis 3D

Figura 26: Modelo PLAXIS 3D - Configuración del archivo



Fuente: Elaboración propia

Figura 27: Modelo PLAXIS 3D - Configuración del proyecto



Fuente: Elaboración propia

Figura 28: Asignación de propiedades generales a Micropavimento (MCP)

Property	Unit	Value
Material set		
Identification		MCP
Soil model		Linear Elastic
Drainage type		Drained
Colour		RGB 31, 58, 71
Comments		
Unit weights		
Y_{unsat}	kN/m ³	24.00
Y_{sat}	kN/m ³	24.00
Void ratio		
e_{nit}		0.5000
n_{nit}		0.3333
Rayleigh damping		
Input method		SDOF equivalent
Rayleigh α		0.000
Rayleigh β		0.000
ξ_1	%	0.000
ξ_2	%	0.000
f_1	Hz	0.1000
f_2	Hz	1.000

Fuente: Elaboración propia

Figura 29: Asignación de propiedades mecánicas a Micropavimento (MCP)

Property	Unit	Value
Stiffness		
E_{ref}	kN/m ²	2.500E6
ν (nu)		0.3500
Alternatives		
G_{ref}	kN/m ²	925.9E3
E_{oed}	kN/m ²	4.012E6
Depth-dependency		
E'_{inc}	kN/m ² /m	0.000
z_{ref}	m	0.000
Wave velocities		
V_s	m/s	615.2
V_p	m/s	1281
Excess pore pressure calcule		
Determination		v-undrained definition
ν_u definition method		Direct
$\nu_{u, equivalent}$ (nu)		0.4950
Skempton B		0.9699
$K_{w, ref}/h$	kN/m ²	89.51E6

Fuente: Elaboración propia

Figura 30: Asignación de propiedades de interfaz a Micropavimento (MCP)

Soil - Linear Elastic - MCP

General Mechanical Groundwater Interfaces Initial

Property	Unit	Value
Stiffness		
Stiffness determination		Direct
k_n	kN/m ³	81.00E3
k_s	kN/m ³	81.00E3
Strength		
Strength determination		Rigid
R_{inter}		1.000
Consider gap closure		<input checked="" type="checkbox"/>
Groundwater		
Cross permeability		Impermeable
Drainage conductivity ₁ , dk	m ³ /day/m	0.000
Drainage conductivity ₂ , dk	m ³ /day/m	0.000

Next OK Cancel

Fuente: Elaboración propia

Figura 31: Asignación de propiedades generales a Base suelo-cemento (BSC)

Soil - Linear Elastic - BSC

General Mechanical Groundwater Interfaces Initial

Property	Unit	Value
Material set		
Identification		BSC
Soil model		Linear Elastic
Drainage type		Drained
Colour		RGB 134, 234, 162
Comments		
Unit weights		
γ_{unsat}	kN/m ³	24.00
γ_{sat}	kN/m ³	24.00
Void ratio		
e_{init}		0.5000
n_{init}		0.3333
Rayleigh damping		
Input method		SDOF equivalent
Rayleigh α		0.000
Rayleigh β		0.000
ξ_1	%	0.000
ξ_2	%	0.000
f_1	Hz	0.1000
f_2	Hz	1.000

Next OK Cancel

Fuente: Elaboración propia

Figura 32: Asignación de propiedades Mecánicas a Base suelo-cemento (BSC)

Property	Unit	Value
Stiffness		
E_{ref}	kN/m ²	3.100E6
ν (ν_u)		0.3500
Alternatives		
G_{ref}	kN/m ²	1.148E6
E_{oed}	kN/m ²	4.979E6
Depth-dependency		
E_{inc}	kN/m ² /m	0.000
Z_{ref}	m	0.000
Wave velocities		
V_s	m/s	685.1
V_p	m/s	1426
Excess pore pressure calcul		
Determination	v-undrained definition	
ν_u definition method	Direct	
$\nu_{u, equivalent}$ (ν_u)		0.4950
Skempton B		0.9699
$K_{w, ref}/h$	kN/m ²	111.0E6

Fuente: Elaboración propia

Figura 33: Asignación de propiedades de interfaz a Base suelo-cemento (BSC)

Property	Unit	Value
Stiffness		
Stiffness determination		Derived
Strength		
Strength determination		Rigid
$R_{p, inter}$		1.000
Consider gap closure		<input checked="" type="checkbox"/>
Groundwater		
Cross permeability		Impermeable
Drainage conductivity $_{1, dk}$	m ² /day/m	0.000
Drainage conductivity $_{2, dk}$	m ² /day/m	0.000

Fuente: Elaboración propia

Figura 34: Asignación de propiedades generales a Subrasante (SRT)

Soil - Linear Elastic - SRT

General Mechanical Groundwater Interfaces Initial

Property	Unit	Value
Material set		
Identification		SRT
Soil model		Linear Elastic
Drainage type		Drained
Colour		RGB 236, 232, 156
Comments		
Unit weights		
γ_{unsat}	kN/m ³	20.00
γ_{sat}	kN/m ³	20.00
Void ratio		
e_{init}		0.5000
ρ_{init}		0.3333
Rayleigh damping		
Input method		SDOF equivalent
Rayleigh α		0.000
Rayleigh β		0.000
ξ_1	%	0.000
ξ_2	%	0.000
f_1	Hz	0.1000
f_2	Hz	1.000

Next OK Cancel

Fuente: Elaboración propia

Figura 35: Asignación de propiedades mecánicas a Subrasante (SRT)

Soil - Linear Elastic - SRT

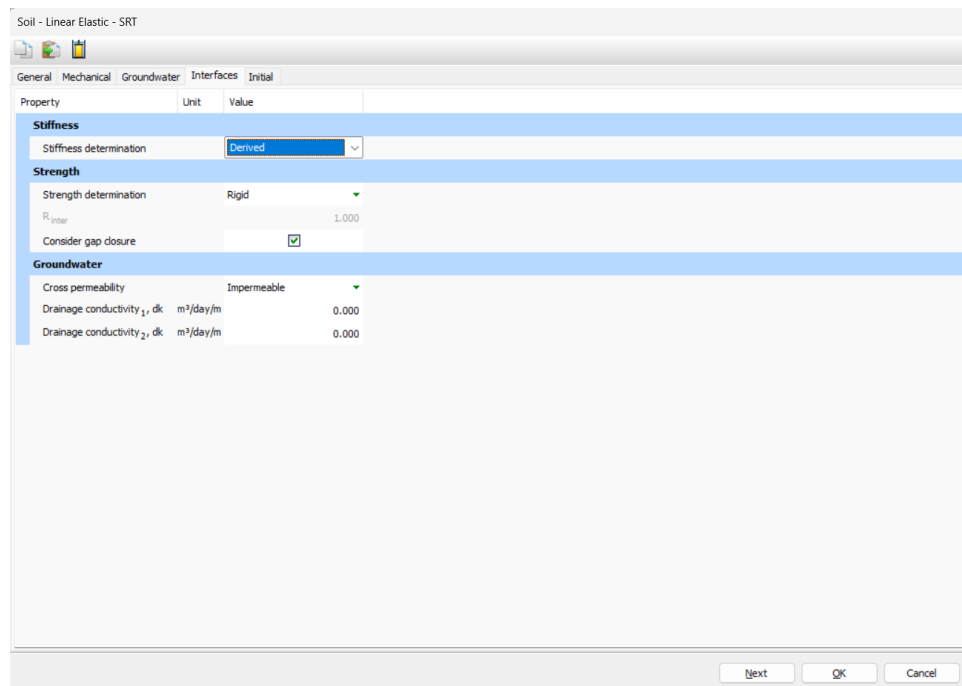
General Mechanical Groundwater Interfaces Initial

Property	Unit	Value
Stiffness		
E_{ref}	kN/m ²	10000E6
ν (ν_u)		0.3500
Alternatives		
G_{ref}	kN/m ²	37.04E3
E_{oed}	kN/m ²	160.5E3
Depth-dependency		
E'_{inc}	kN/m ² /m	0.000
z_{ref}	m	0.000
Wave velocities		
V_s	m/s	134.8
V_p	m/s	280.6
Excess pore pressure calcule		
Determination		v-undrained definition
ν_u definition method		Direct
$\nu_{u, equivalent}$ (ν_u)		0.4950
Skempton B		0.9699
$K_{v, ref/h}$	kN/m ²	3.580E6

Next OK Cancel

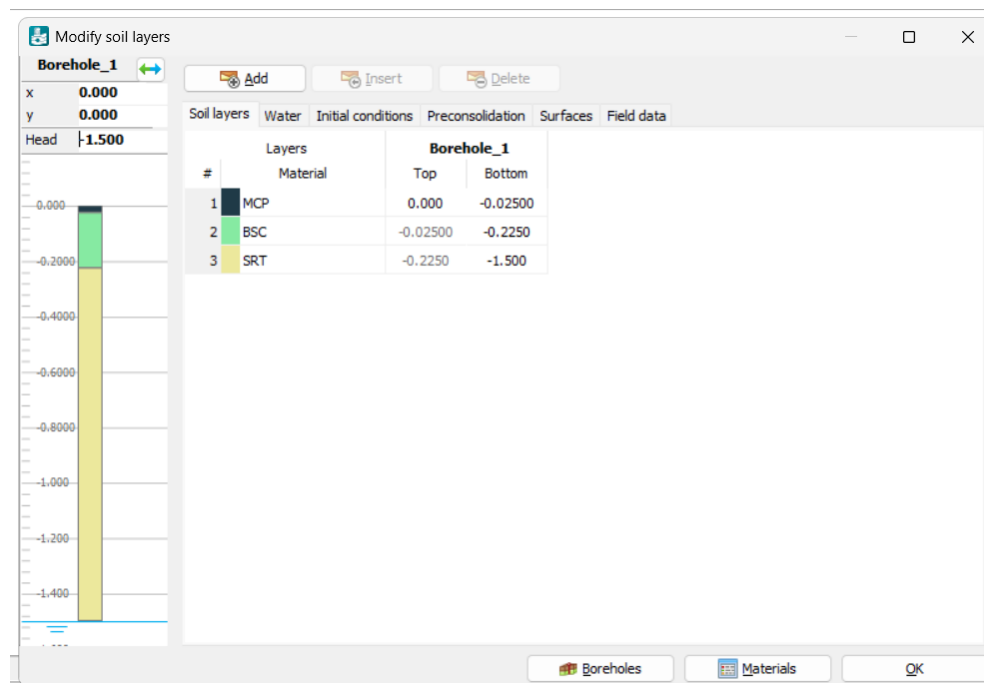
Fuente: Elaboración propia

Figura 36: Asignación de propiedades de interfaz a Subrasante (SRT)



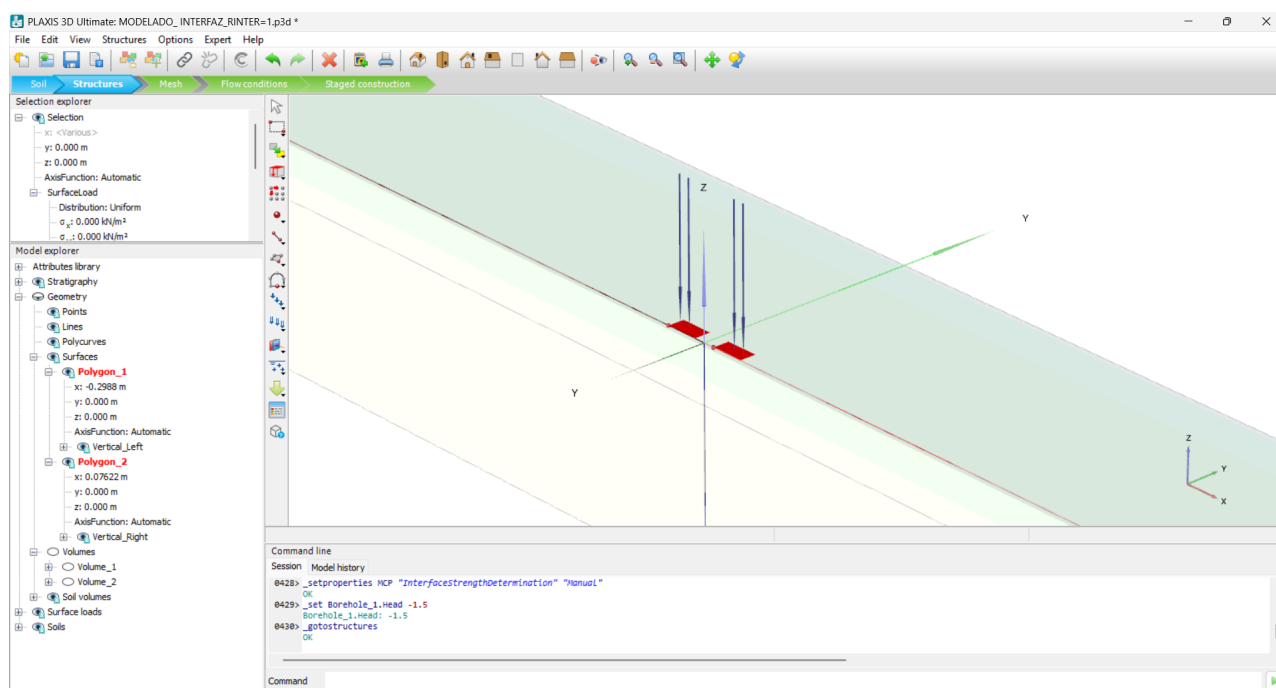
Fuente: Elaboración propia

Figura 37: Asignación de materiales a estratos



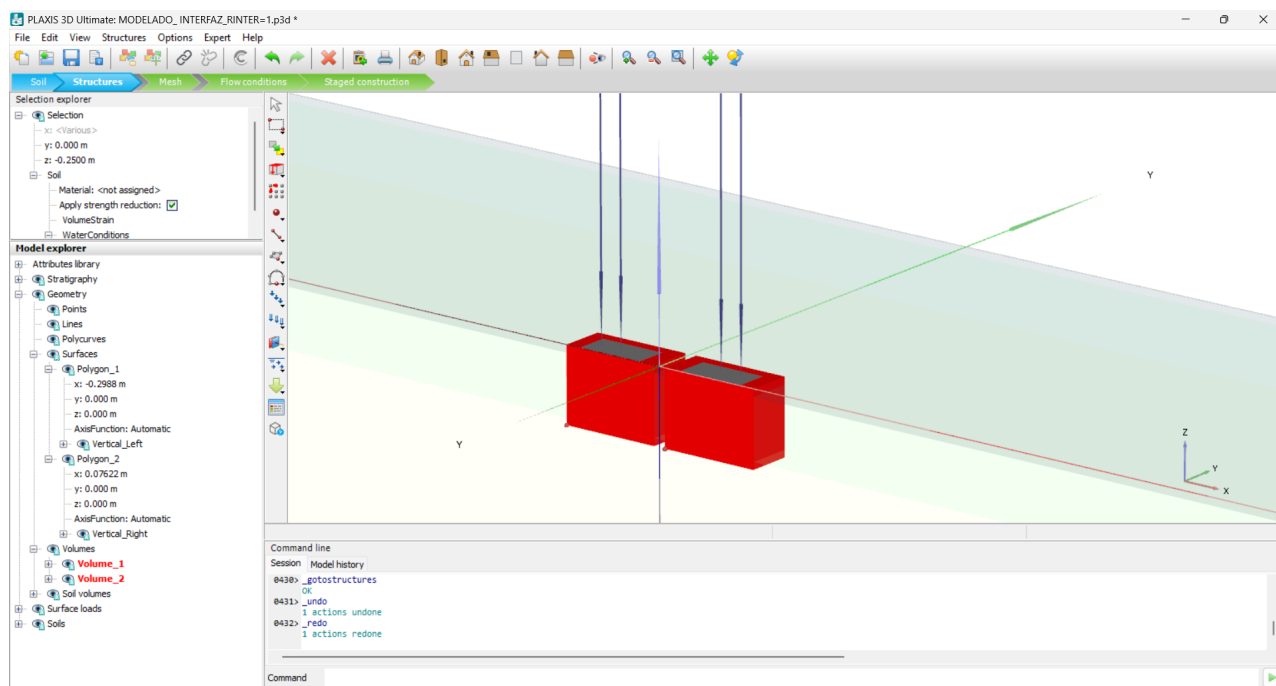
Fuente: Elaboración propia

Figura 38: Pestaña Structures- asignación de cargas en area de contacto



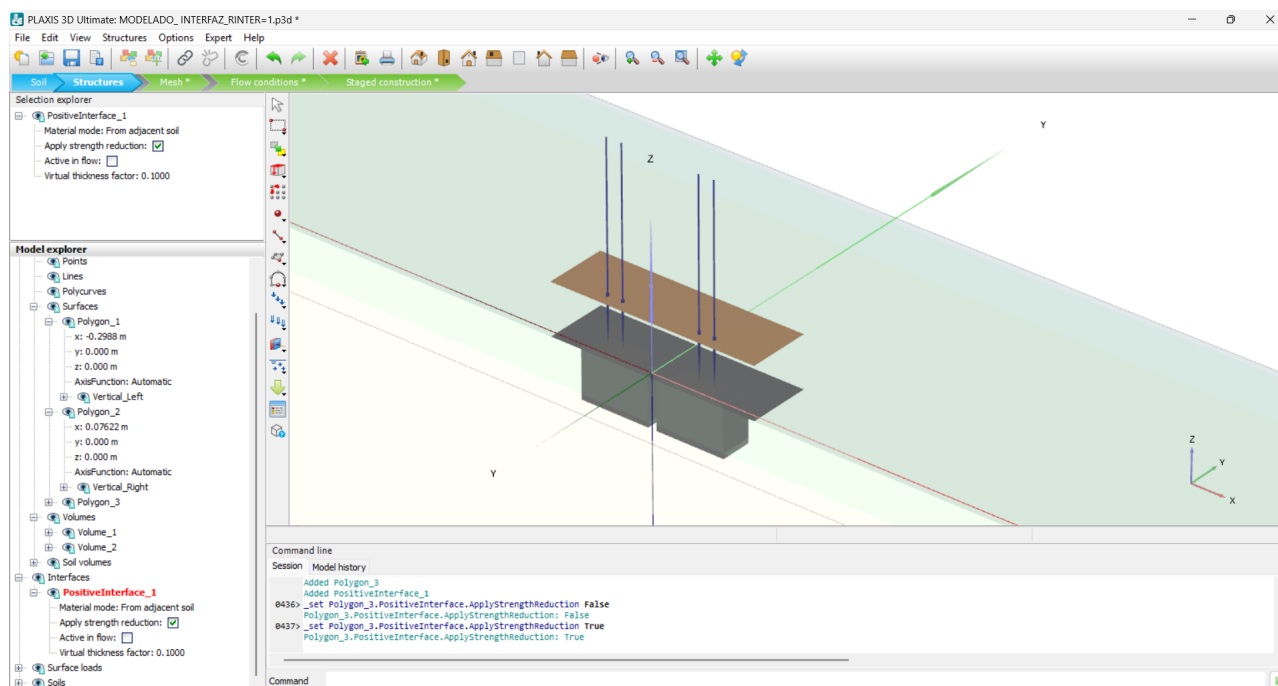
Fuente: Elaboración propia

Figura 39: Pestaña Structures- asignación de volumen para optimización de malla en el area de contacto



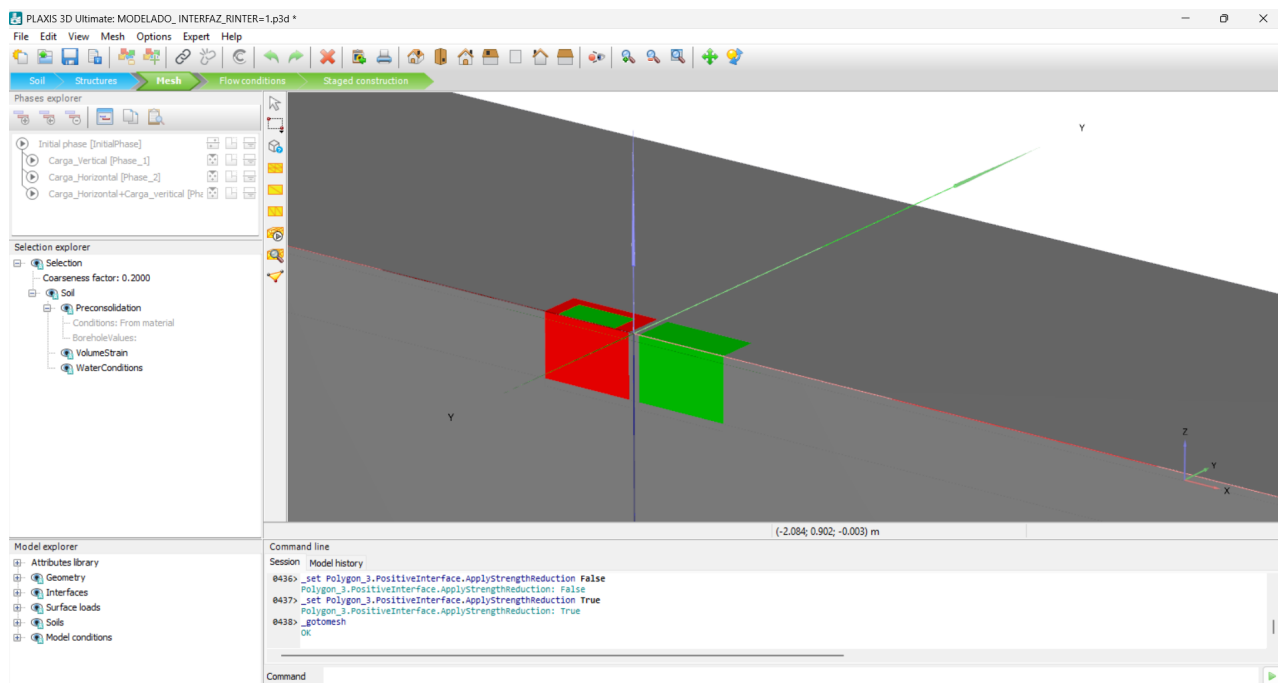
Fuente: Elaboración propia

Figura 40: Pestaña Structures- asignación area de interfaz de contacto



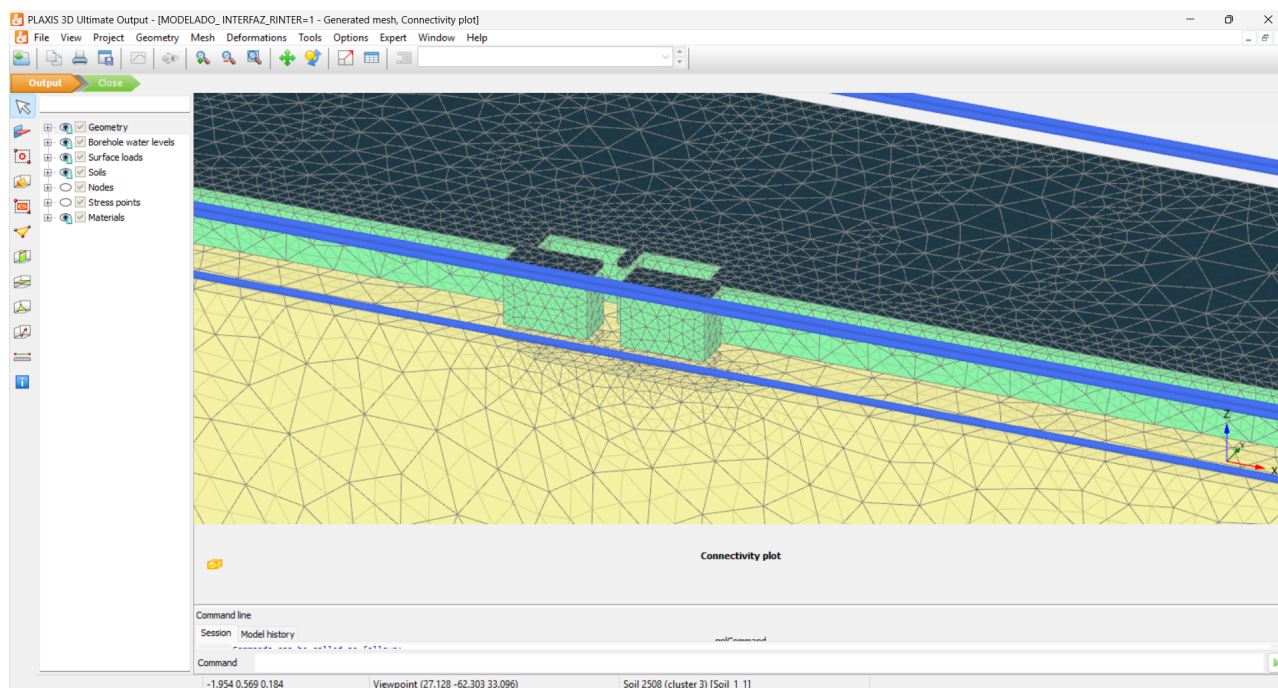
Fuente: Elaboración propia

Figura 41: Pestaña Mesh- Refinamiento de malla en área de contacto



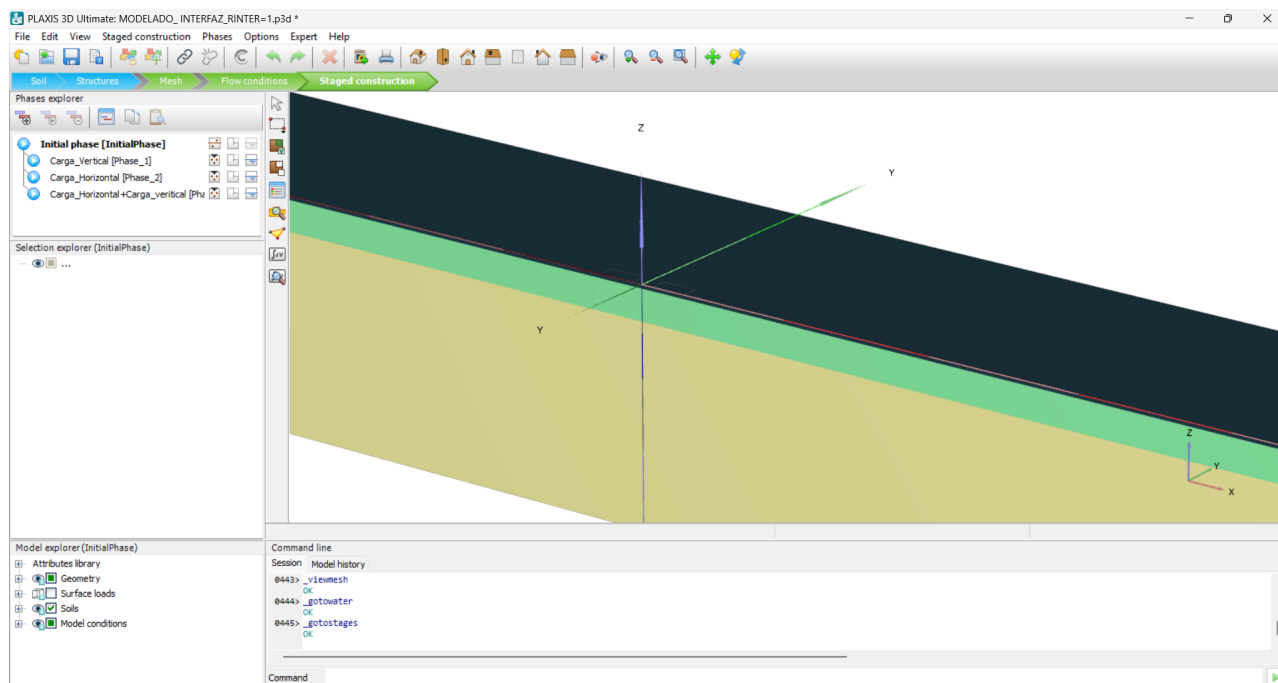
Fuente: Elaboración propia

Figura 42: Pestaña Mesh Output- Malla generada



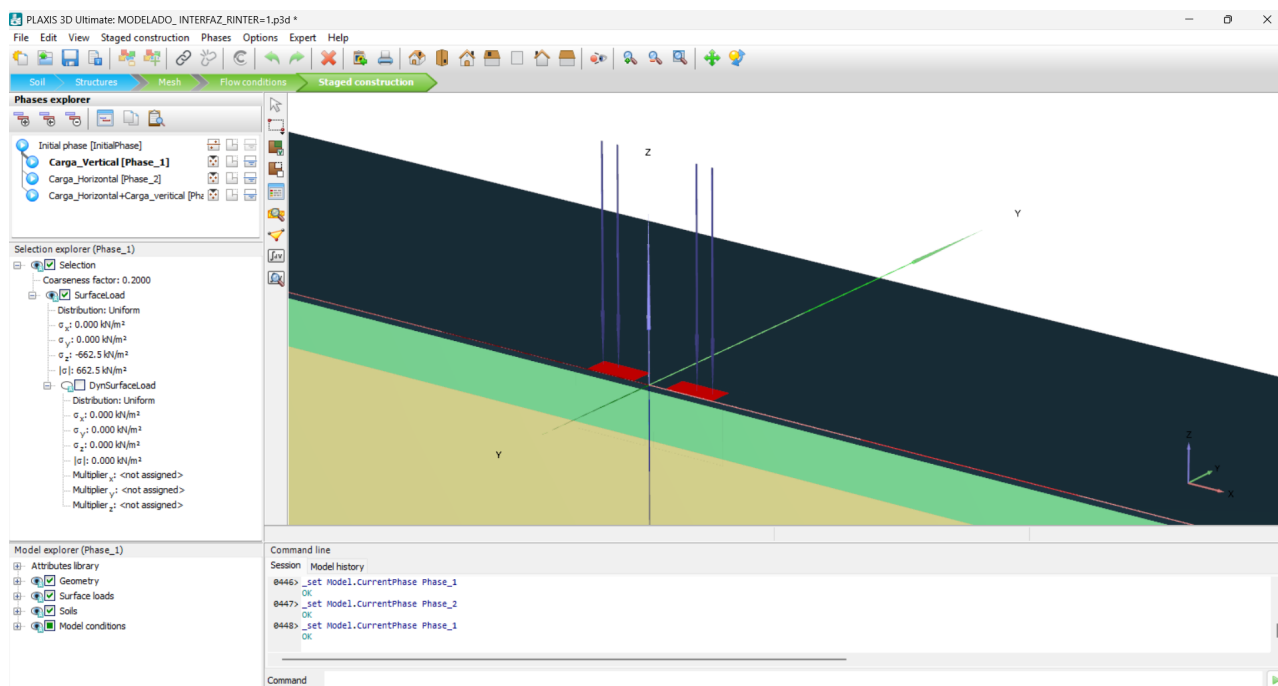
Fuente: Elaboración propia

Figura 43: Pestaña Staged Construction- Creacion de etapas constructivas del modelo



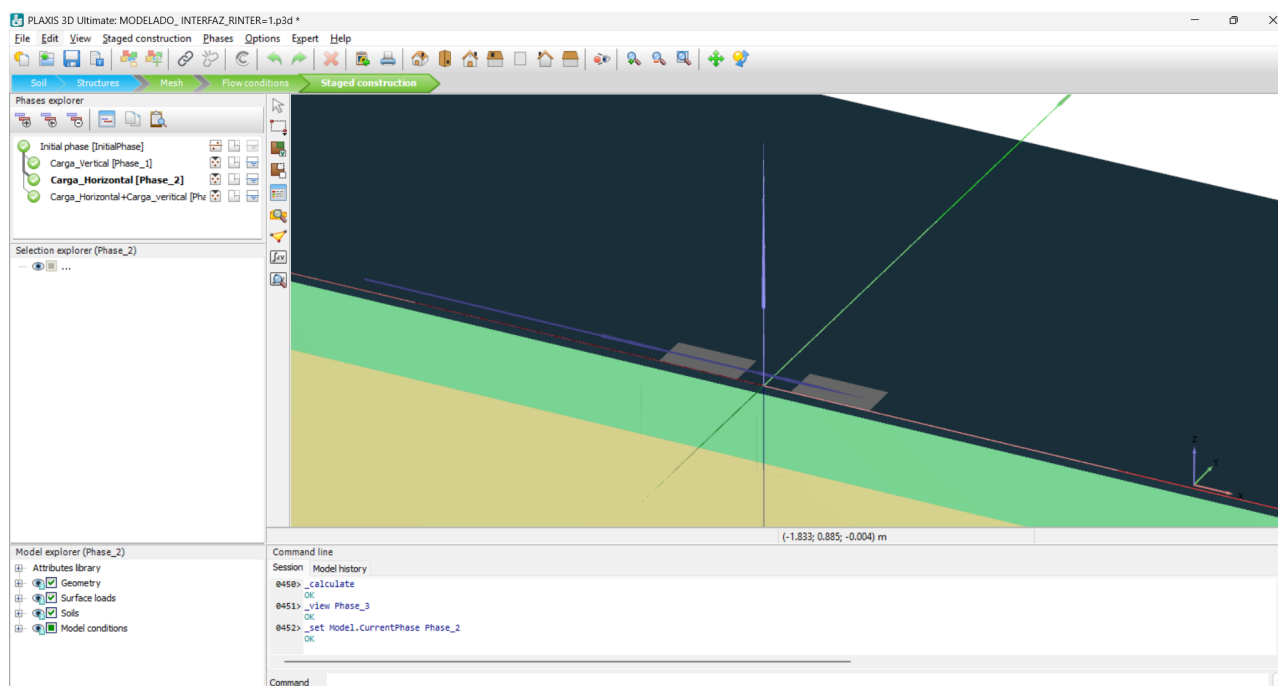
Fuente: Elaboración propia

Figura 44: Pestaña Staged Construction- Etapa Solo Carga vertical



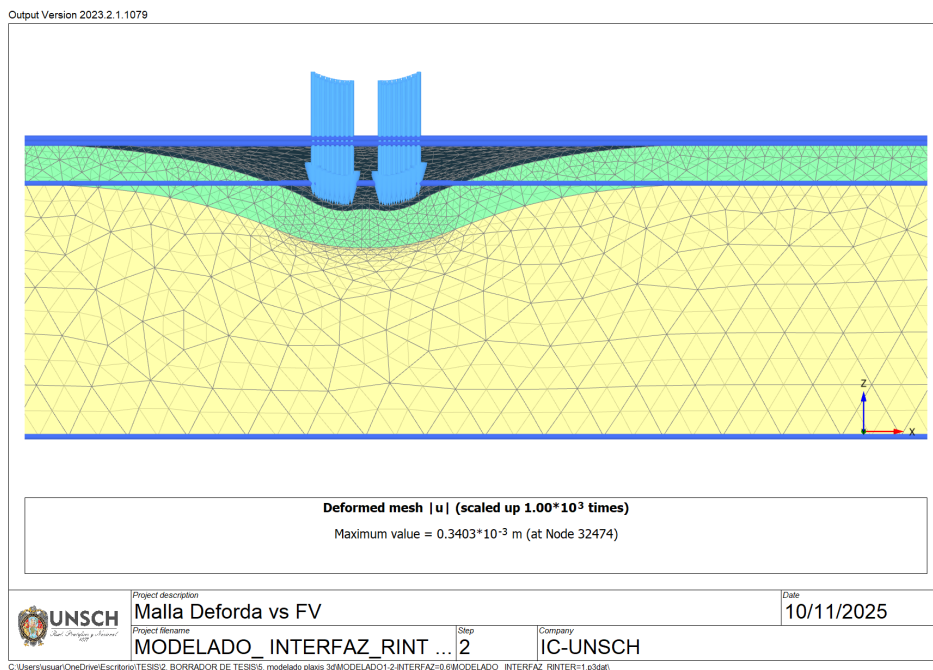
Fuente: Elaboración propia

Figura 45: Pestaña Staged Construction- Etapa Solo Carga Horizontal



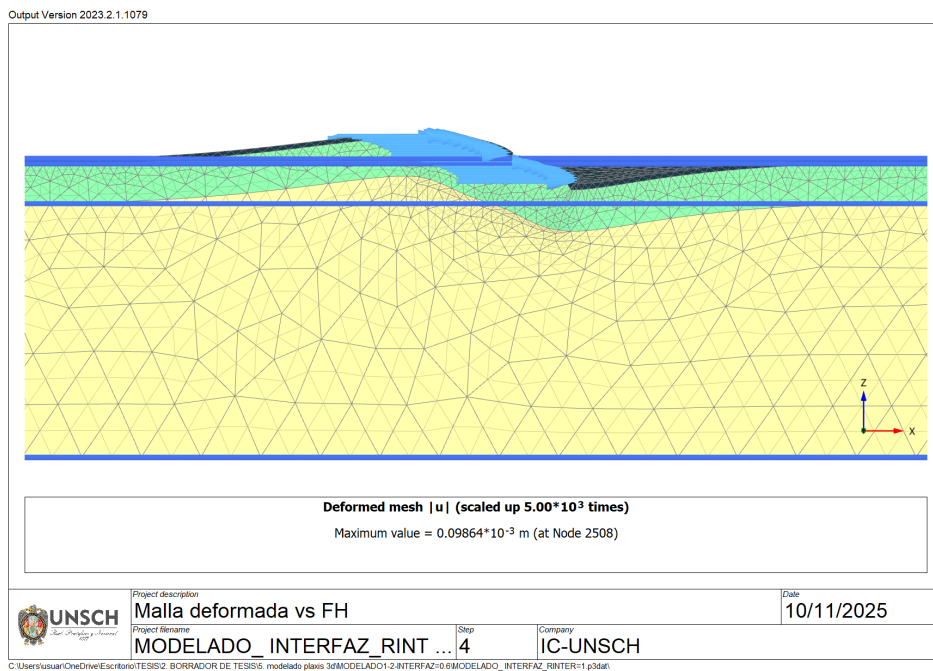
Fuente: Elaboración propia

Figura 46: Plaxis Output- Malla deformada Vs Carga Vertical



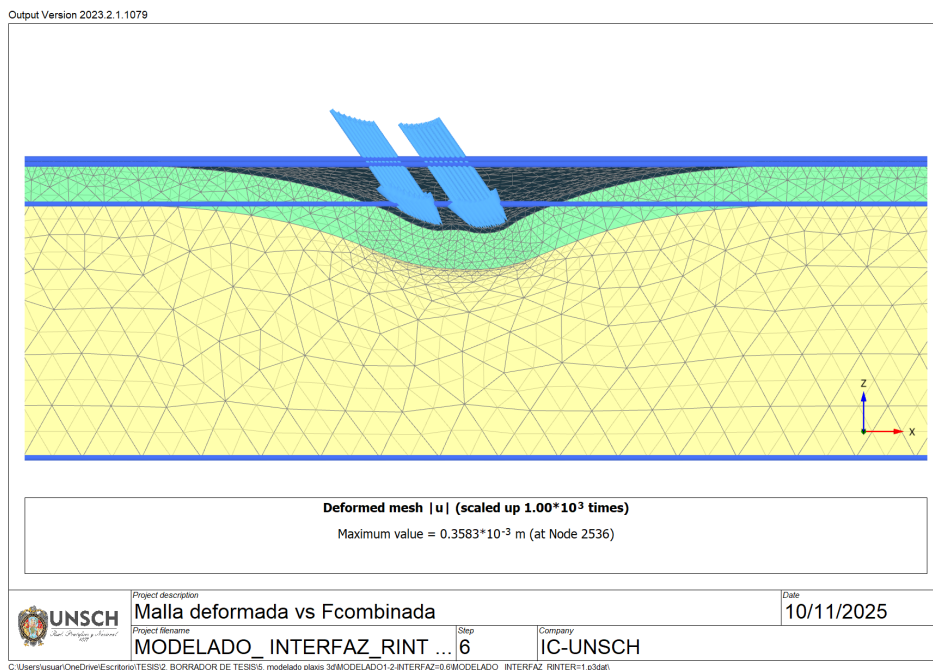
Fuente: Elaboración propia

Figura 47: Plaxis Output- Malla deformada Vs Carga Horizontal



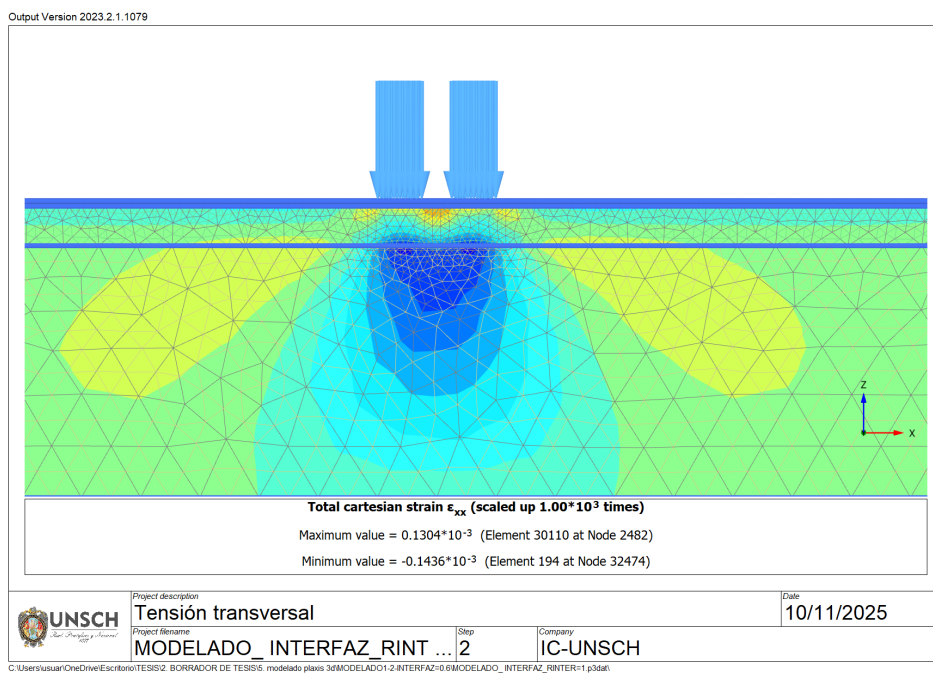
Fuente: Elaboración propia

Figura 48: Plaxis Output- Malla deformada Vs Carga combinada



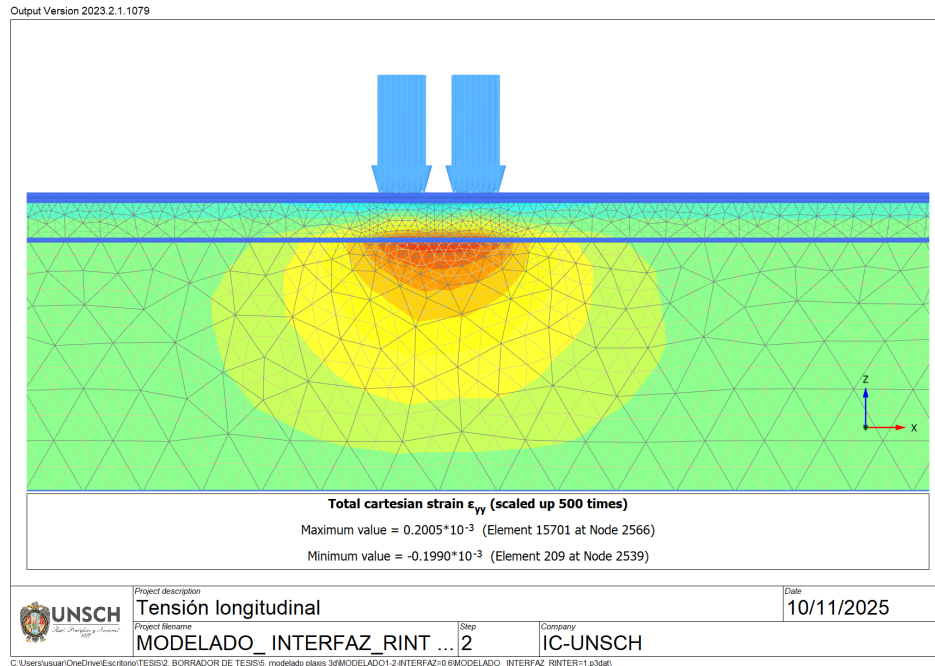
Fuente: Elaboración propia

Figura 49: Deformación unitaria cartesiana transversal ϵ_{xx}



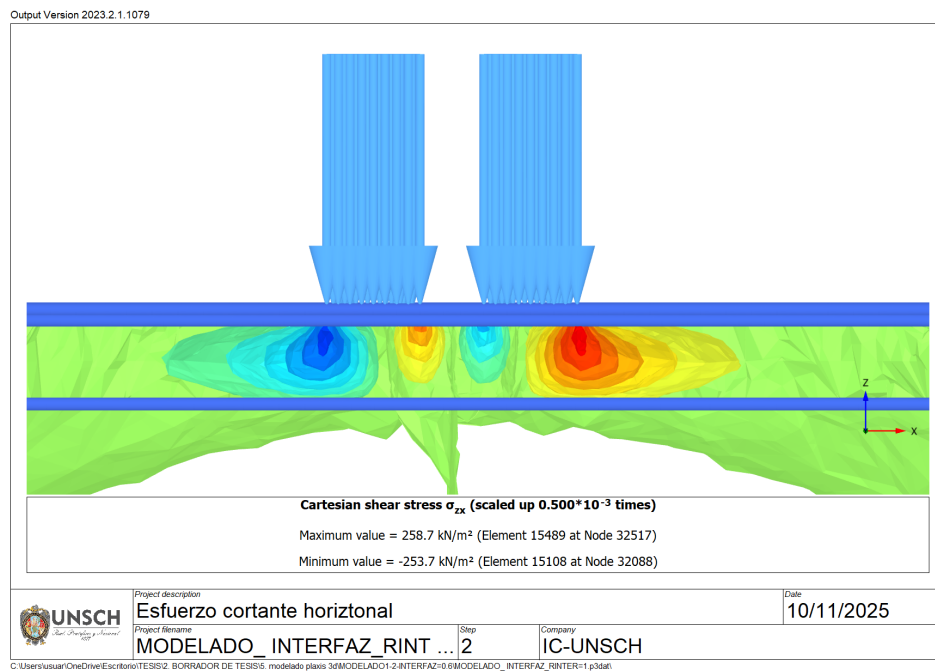
Fuente: Elaboración propia

Figura 50: Deformación unitaria cartesiana longitudinal ϵ_{yy} vs FV



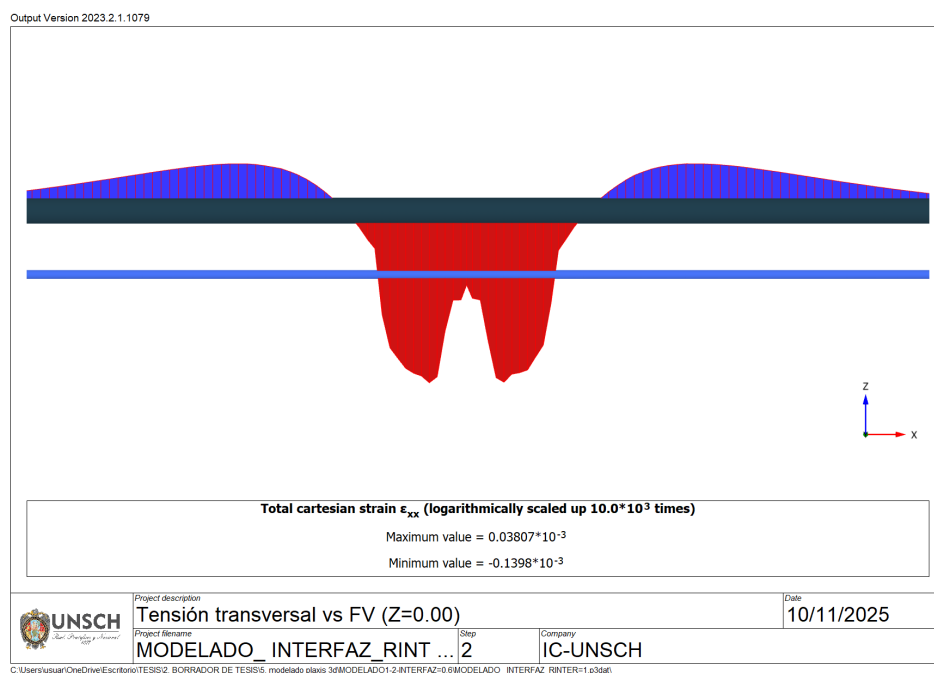
Fuente: Elaboración propia

Figura 51: Distribución de esfuerzo cortante horizontal σ_{zx} - Contornos de shadings



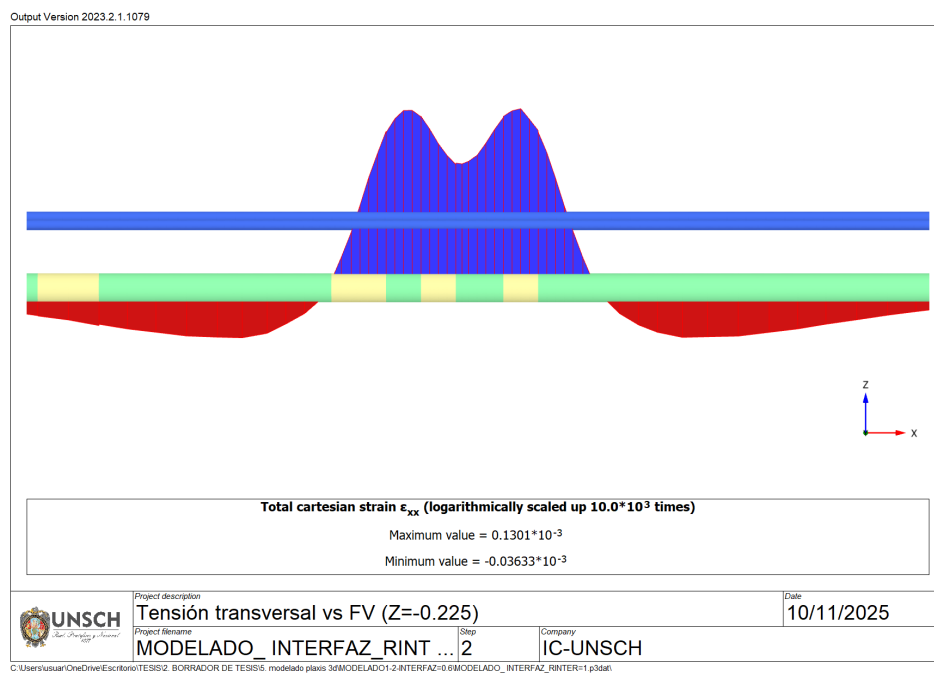
Fuente: Elaboración propia

Figura 52: Distribución de deformación unitaria longitudinal ε_{xx} - Sección Z = 0.00



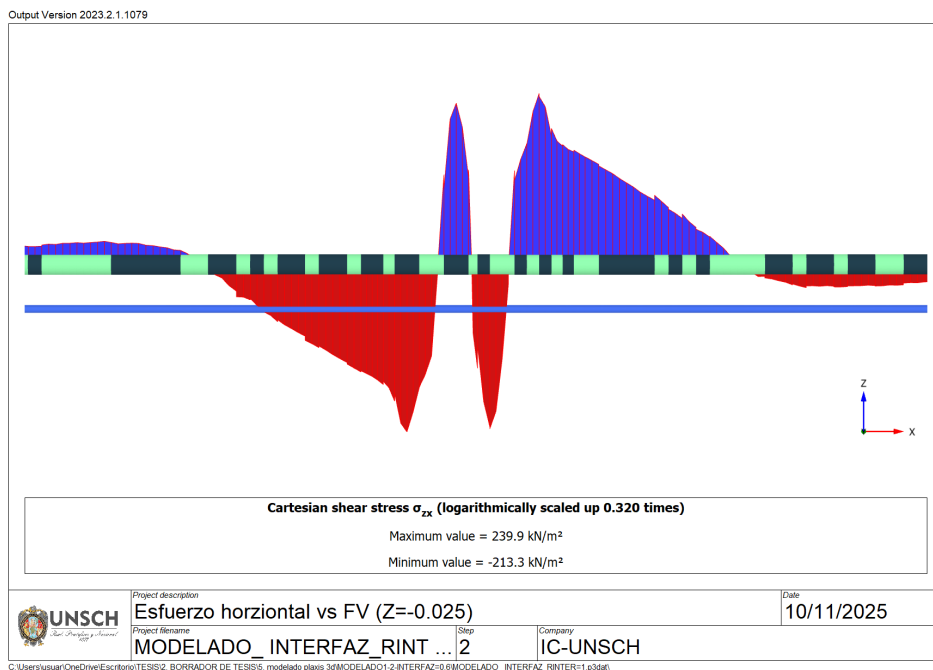
Fuente: Elaboración propia

Figura 53: Distribución de deformación unitaria transversal ε_{yy} - Sección Z = -0.225



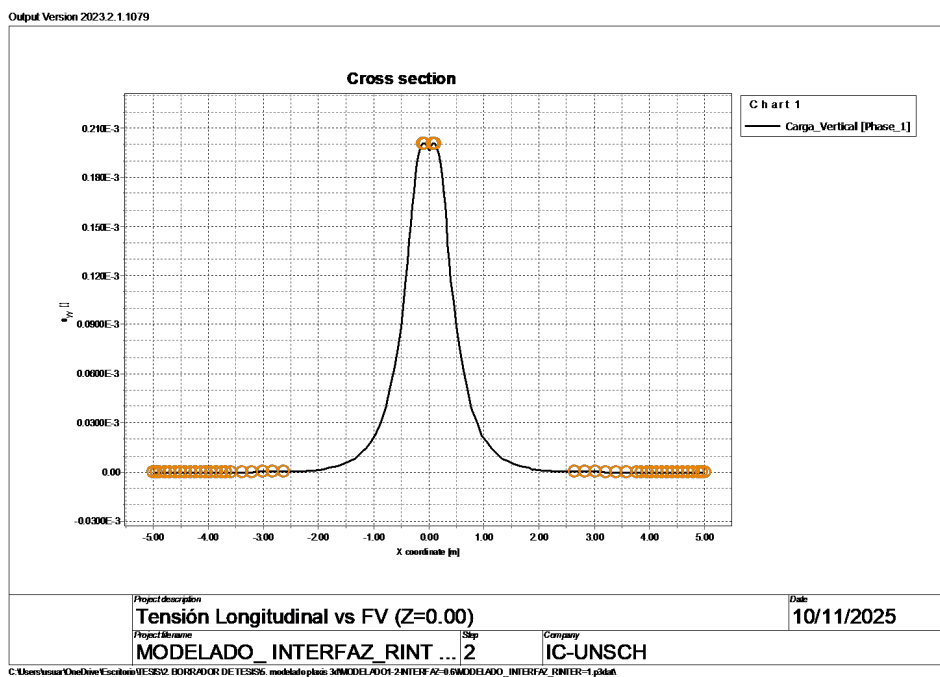
Fuente: Elaboración propia

Figura 54: Distribución de esfuerzo horizontal τ_{xz} - - Sección Z = -0.025



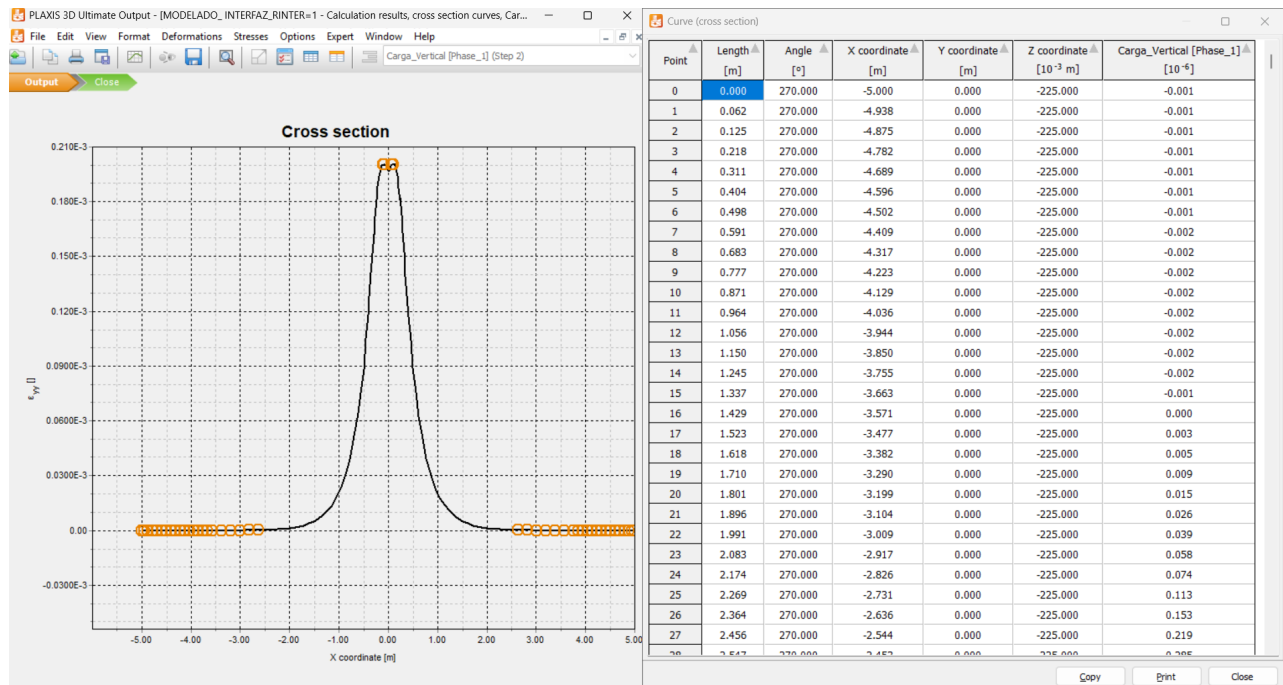
Fuente: Elaboración propia

Figura 55: Grafico de distribución de deformación unitaria longitudinal ϵ_{xx} - Sección Z = 0.00



Fuente: Elaboración propia

Figura 56: Grafico y componentes numericos de distribución de deformación unitaria longitudinal ε_{xx} - Sección Z = 0.00



Fuente: Elaboración propia

Anexo 04 -Regresión múltiple

Caso	V (km/h)	R (m)	Rinter	DATOS					
				NEi	NEtc	NEbc	ln(NEi)	ln(NEtc)	ln(NEbc)
A1	30	30	1	309328	599727	34002	12.642157	13.304230	10.434175
A1	30	30	0.6	1443113	309386	28656	14.182313	12.642345	10.263118
A2	40	50	1	289749	520042	33805	12.576770	13.161665	10.428364
A2	40	50	0.6	1332258	263174	28496	14.102386	12.480571	10.257519
A3	50	85	1	314201	620444	34100	12.657788	13.338191	10.437053
A3	50	85	0.6	1468060	321330	28736	14.199452	12.680224	10.265906
A4	60	125	1	320844	652133	34100	12.678710	13.388004	10.437053
A4	60	125	0.6	1508337	339368	28817	14.226518	12.734840	10.268721
B1	20	15	1	343044	759559	34299	12.745614	13.540493	10.442871
B1	20	15	0.6	1641670	403544	28979	14.311225	12.908041	10.274327
B2	20	25	1	496434	1367647	35520	13.115206	14.128602	10.477851
B2	20	25	0.6	2594506	894878	29891	14.768907	13.704443	10.305313
B3	20	40	1	621789	1917083	36150	13.340356	14.466315	10.495432
B3	20	40	0.6	3458898	1343103	30403	15.056461	14.110493	10.322297
B4	25	15	1	214521	229028	32843	12.276163	12.341600	10.399494
B4	25	15	0.6	923632	117322	27711	13.736069	11.672678	10.229585
B5	25	25	1	364519	868508	34499	12.806334	13.674532	10.448686
B5	25	25	0.6	1766940	471627	29142	14.384760	13.063944	10.279936
B6	25	40	1	504157	1397815	35520	13.130643	14.150421	10.477851
B6	25	40	0.6	2653114	922215	29891	14.791245	13.734534	10.305313
B7	30	20	1	195110	177939	32560	12.181319	12.089196	10.390840
B7	30	20	0.6	824458	88989	27481	13.622481	11.396268	10.221250
B8	30	30	1	309328	599727	34002	12.642157	13.304230	10.434175
B8	30	30	0.6	1443113	309386	28656	14.182313	12.642345	10.263118
B9	30	45	1	433054	1116762	35107	12.978618	13.925944	10.466156
B9	30	45	0.6	2184243	703391	29556	14.596780	13.463668	10.294042
B10	35	25	1	173511	130963	32004	12.063996	11.782670	10.373616
B10	35	25	0.6	716645	63647	27177	13.482336	11.061107	10.210126
B11	40	30	1	153621	96446	31370	11.942244	11.476739	10.353607
B11	40	30	0.6	620532	45727	26730	13.338332	10.730444	10.193542
B12	40	50	1	289749	520042	33805	12.576770	13.161665	10.428364
B12	40	50	0.6	1332258	263174	28496	14.102386	12.480571	10.257519

Resumen

REGRESIÓN MÚLTIPLE: $\ln(NE_i) = \beta_0 + \beta_1V + \beta_2R + \beta_3Rinter$

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.987052667
Coefficiente de determinación R^2	0.974272968
R^2 ajustado	0.9715165
Error típico	0.151037359
Observaciones	32

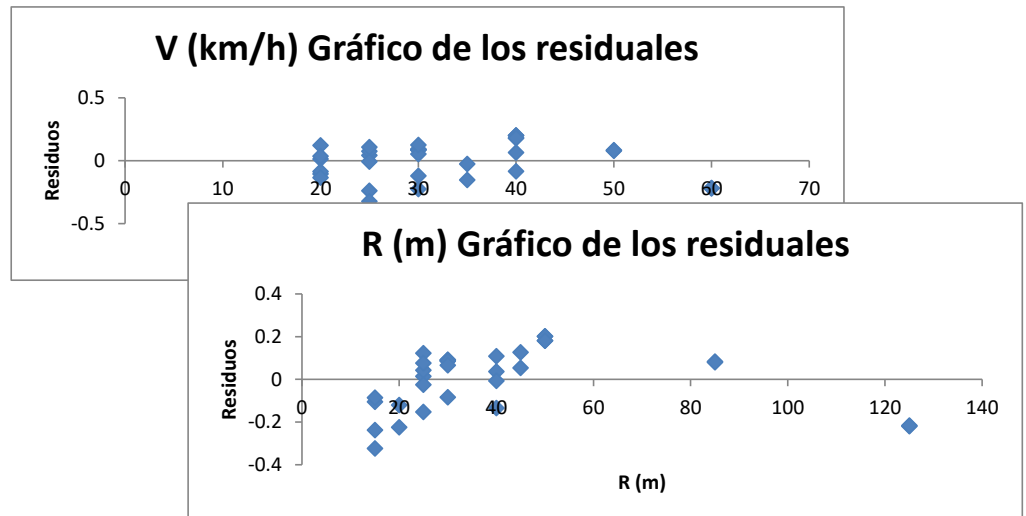
ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	3	24.18899143	8.062997145	353.4498003	2.38265E-22
Residuos	28	0.638743946	0.022812284		
Total	31	24.82773538			

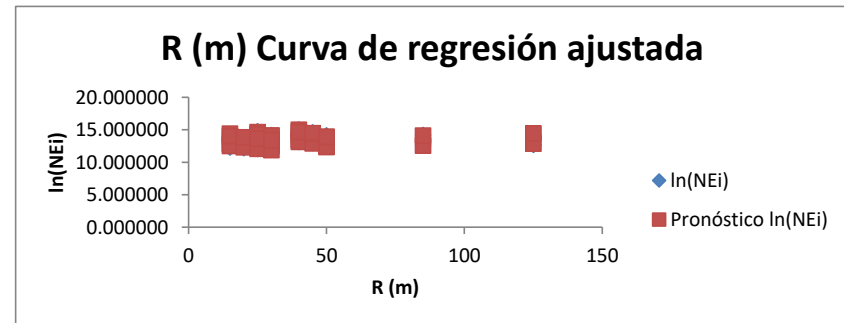
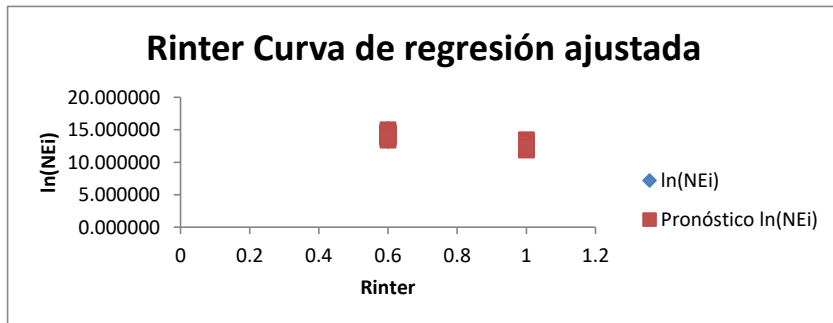
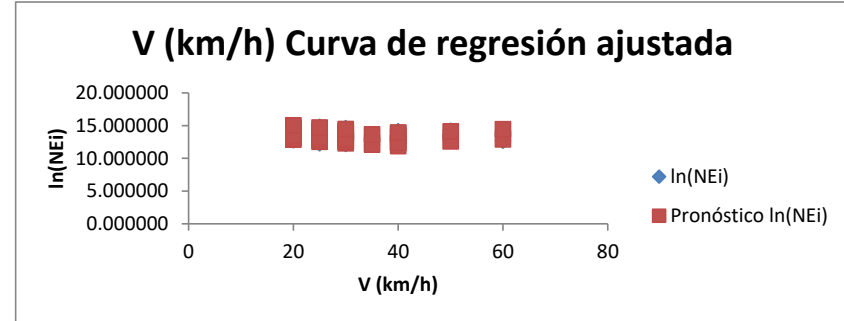
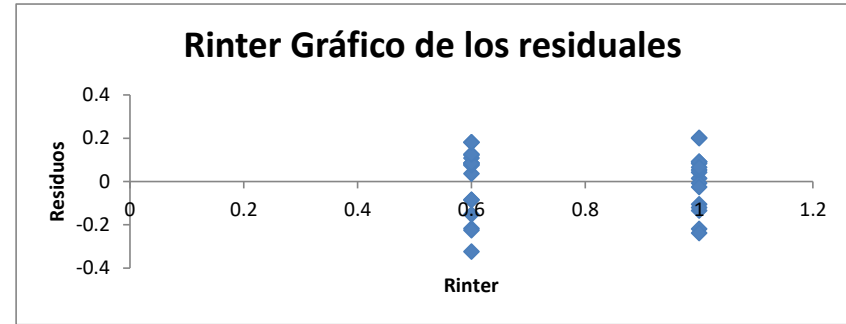
	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	17.68911203	0.145483405	121.5885211	1.11323E-39	17.39110279	17.98712128	17.39110279	17.98712128
V (km/h)	-0.067424789	0.004580167	-14.72103136	1.04265E-14	-0.076806837	-0.058042741	-0.076806837	-0.058042741
R (m)	0.024942672	0.001815422	13.73932228	5.7365E-14	0.021223948	0.028661396	0.021223948	0.028661396
Rinter	-3.863924539	0.133499426	-28.94337945	2.08005E-22	-4.137385716	-3.590463362	-4.137385716	-3.590463362

Análisis de los residuales

<i>Observación</i>	<i>Pronóstico $\ln(NE_i)$</i>	<i>Residuos</i>
1	12.55072398	0.091433498
2	14.0962938	0.086019344
3	12.37532953	0.201440776
4	13.92089935	0.181486455
5	12.57407517	0.083713022
6	14.11964498	0.079807378
7	12.89753416	-0.218823855
8	14.44310397	-0.216585696
9	12.85083179	-0.105217796
10	14.39640161	-0.085177035
11	13.10025852	0.014947308
12	14.64582833	0.12307836



13	13.4743986	-0.134042511
14	15.01996841	0.036492187
15	12.51370785	-0.237544934
16	14.05927766	-0.323208661
17	12.76313457	0.043199386
18	14.30870438	0.07605541
19	13.13727465	-0.006631644
20	14.68284447	0.108400136
21	12.30129726	-0.119978482
22	13.84686708	-0.224385599
23	12.55072398	0.091433498
24	14.0962938	0.086019344
25	12.92486407	0.053753645
26	14.47043388	0.126345992
27	12.08888668	-0.024890401
28	13.63445649	-0.152120615
29	11.87647609	0.065767717
30	13.42204591	-0.083713455
31	12.37532953	0.201440776
32	13.92089935	0.181486455



Resumen

REGRESIÓN MÚLTIPLE: $\ln(NEtc) = \beta_0 + \beta_1V + \beta_2R + \beta_3Rinter$

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0.934674383
Coefficiente de determinación R ²	0.873616203
R ² ajustado	0.860075082
Error típico	0.357378577
Observaciones	32

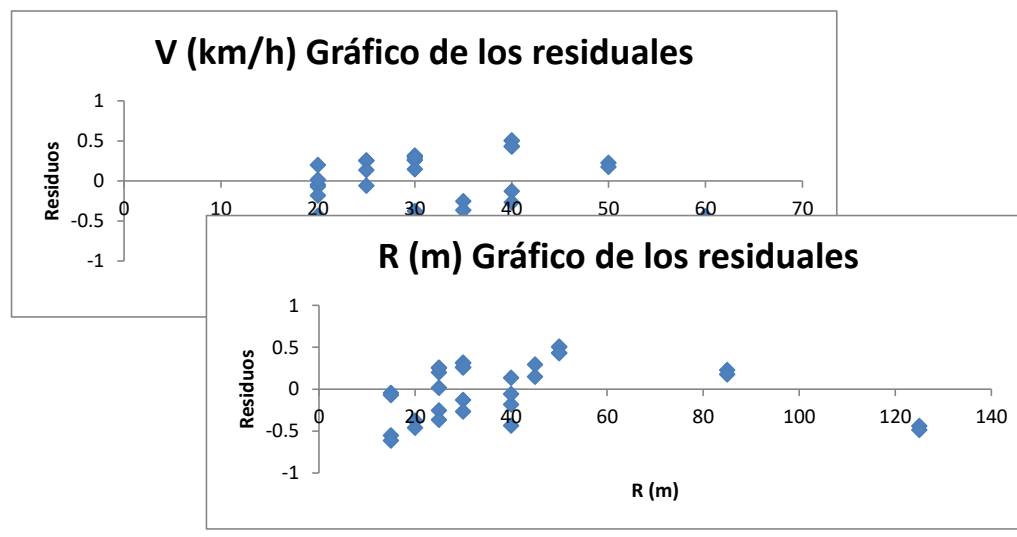
ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	3	24.71976531	8.239921768	64.51579571	1.0797E-12
Residuos	28	3.576144524	0.127719447		
Total	31	28.29590983			

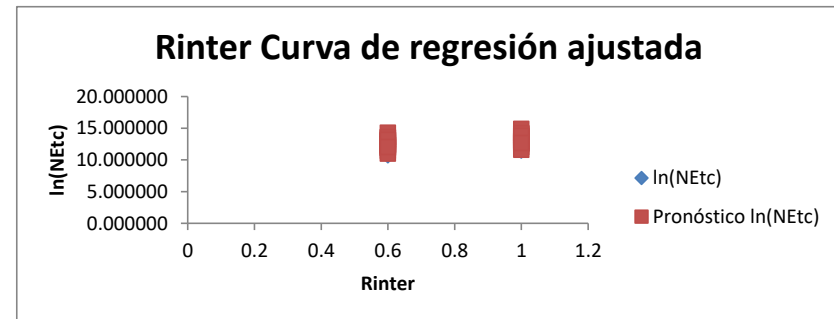
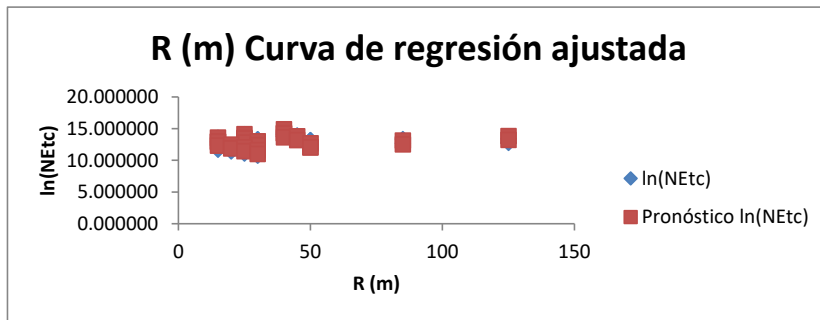
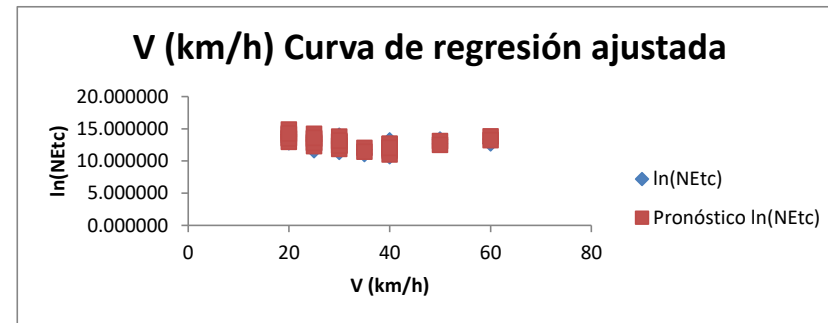
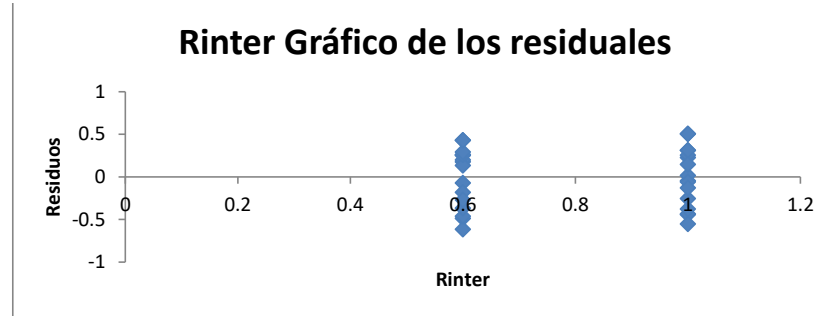
	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	14.04652372	0.344237032	40.80480136	1.7249E-26	13.34138613	14.75166132	13.34138613	14.75166132
V (km/h)	-0.13842614	0.01083741	-12.77299132	3.36837E-13	-0.160625567	-0.116226713	-0.160625567	-0.116226713
R (m)	0.052541165	0.00429558	12.23144865	9.47965E-13	0.043742068	0.061340261	0.043742068	0.061340261
Rinter	1.519997006	0.315881019	4.811928906	4.63792E-05	0.872944071	2.167049941	0.872944071	2.167049941

Análisis de los residuales

Observación	Pronóstico $\ln(NEtc)$	Residuos
1	12.98997147	0.31425836
2	12.38197267	0.260372299
3	12.65653336	0.505131493
4	12.04853456	0.432036128
5	13.11121273	0.226977903
6	12.50321392	0.177009987
7	13.82859791	-0.440594105
8	13.22059911	-0.485758767
9	13.5861154	-0.04562212
10	12.9781166	-0.070075792
11	14.11152705	0.017075256
12	13.50352824	0.200914431



13	14.89964452	-0.433329199
14	14.29164571	-0.181152548
15	12.8939847	-0.552385155
16	12.2859859	-0.613308328
17	13.41939635	0.255135729
18	12.81139754	0.252546153
19	14.20751382	-0.057092956
20	13.59951501	0.13501865
21	12.46455982	-0.37536375
22	11.85656102	-0.460292976
23	12.98997147	0.31425836
24	12.38197267	0.260372299
25	13.77808894	0.147855044
26	13.17009014	0.293578066
27	12.03513495	-0.252464828
28	11.42713615	-0.366028675
29	11.60571007	-0.128971526
30	10.99771127	-0.267267056
31	12.65653336	0.505131493
32	12.04853456	0.432036128



Resumen

REGRESIÓN MÚLTIPLE: $\ln(NEbc) = \beta_0 + \beta_1V + \beta_2R + \beta_3Rinter$

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0.991537578
Coefficiente de determinación R^2	0.983146768
R^2 ajustado	0.981341065
Error típico	0.01278111
Observaciones	32

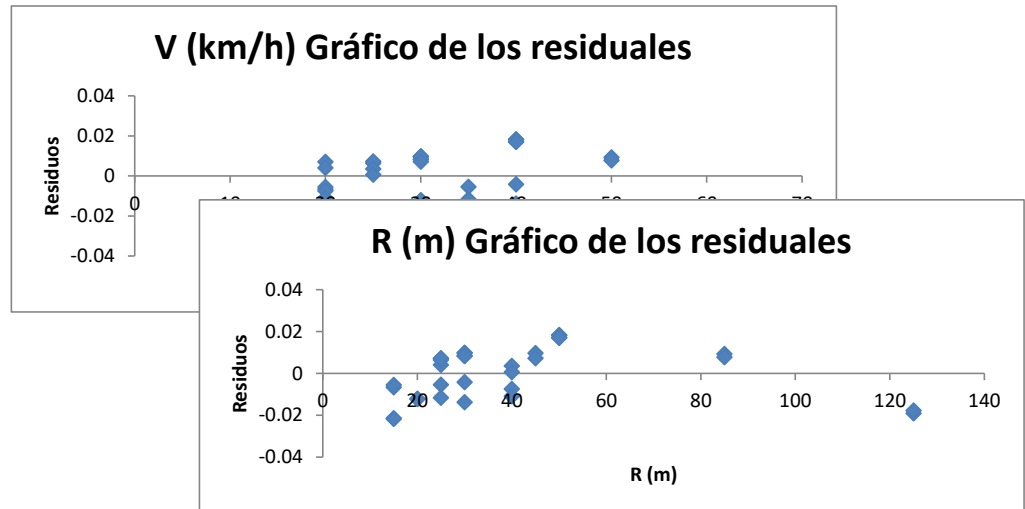
ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	3	0.266827358	0.088942453	544.4674664	6.41216E-25
Residuos	28	0.00457399	0.000163357		
Total	31	0.271401348			

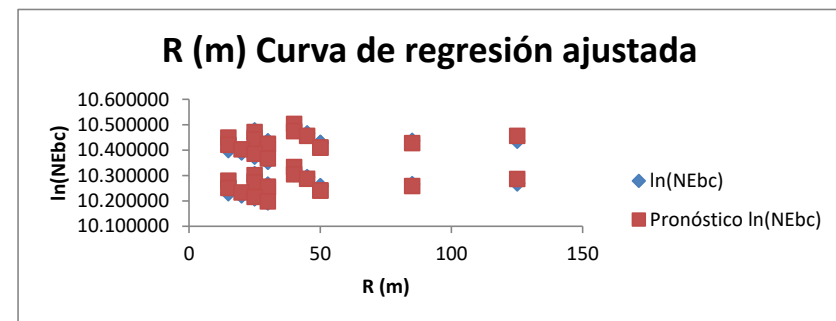
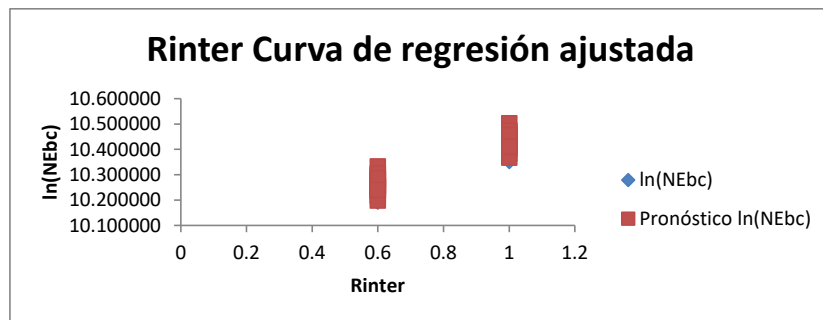
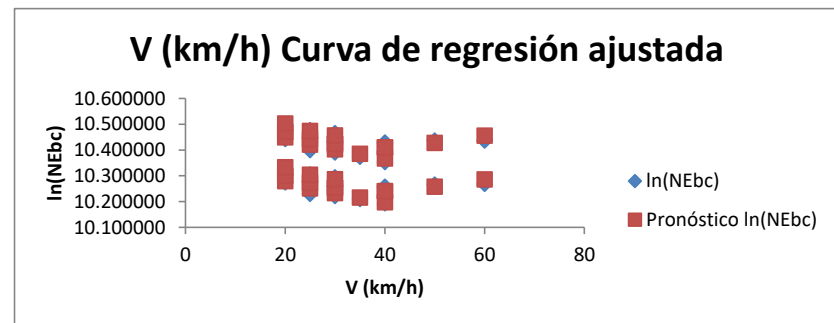
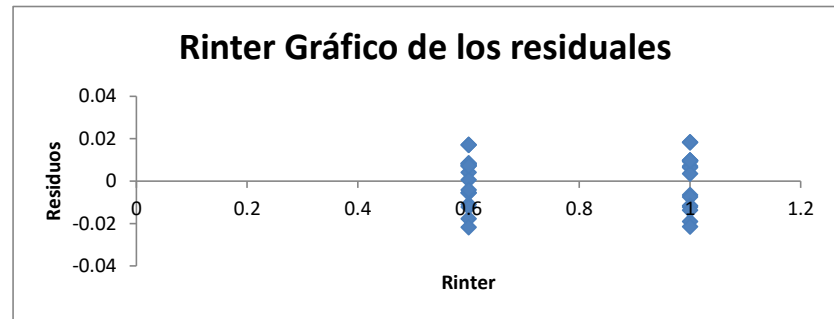
	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	10.1075279	0.012311123	821.0078155	6.80344E-63	10.08230971	10.13274609	10.08230971	10.13274609
V (km/h)	-0.005708246	0.000387584	-14.72777356	1.03083E-14	-0.006502175	-0.004914316	-0.006502175	-0.004914316
R (m)	0.00213621	0.000153625	13.90535432	4.27201E-14	0.001821523	0.002450896	0.001821523	0.002450896
Rinter	0.424055764	0.011297012	37.53698367	1.71467E-25	0.400914883	0.447196644	0.400914883	0.447196644

Análisis de los residuales

Observación	Pronóstico $\ln(NEbc)$	Residuos
1	10.42442259	0.009752034
2	10.25480029	0.008317838
3	10.41006433	0.018299667
4	10.24044203	0.017076978
5	10.42774922	0.009303441
6	10.25812692	0.007779054
7	10.45611516	-0.019062499
8	10.28649286	-0.017772087
9	10.4494619	-0.006590421
10	10.27983959	-0.005512886
11	10.470824	0.007027198
12	10.30120169	0.004111017



13	10.50286715	-0.00743492
14	10.33324484	-0.010948275
15	10.42092067	-0.02142676
16	10.25129837	-0.021713641
17	10.44228277	0.006402847
18	10.27266046	0.007275247
19	10.47432592	0.003525278
20	10.30470361	0.000609097
21	10.40306049	-0.012220672
22	10.23343819	-0.012188051
23	10.42442259	0.009752034
24	10.25480029	0.008317838
25	10.45646574	0.00969008
26	10.28684343	0.007198613
27	10.38520031	-0.011584139
28	10.21557801	-0.005451702
29	10.36734013	-0.013732833
30	10.19771783	-0.00417602
31	10.41006433	0.018299667
32	10.24044203	0.017076978





ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N° 071-2025-FIMGC

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

En la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga de la ciudad de Ayacucho, en cumplimiento a la **RESOLUCIÓN DECANAL N° 504-2025-FIMGC-D**, a los **veintiséis días del mes de diciembre de 2025**, siendo las **10:00 a.m.**, reunidos en el **Auditorio de la escuela Profesional de Ingeniería Civil**, bajo la presidencia del **MSc. Ing. José Ernesto ESTRADA CÁRDENAS**, y los miembros: **Ing. Moisés Nico BARBARÁN ORIUNDO**; **Ing. Hemerson LIZARBE ALARCON** y **Ing. Alex Sander IRCAÑAUPA HUAMANI**, actuando como secretario docente el **Ing. Saúl Walter RETAMOZO FERNÁNDEZ**, para proceder a la sustentación de tesis para optar el **Título Profesional de Ingeniero Civil**, del bachiller:

BRYAN TARIK URBINA GOMEZ

Quien presentó la tesis denominada:

Análisis del efecto de la sobrecarga de fricción lateral en el deterioro de curvas para la carretera con pavimento económico EMP. PE-26 B, Ayacucho, 2024

Los señores miembros del jurado luego de expuesta la tesis y absueltas las preguntas, deliberaron y declararon:

Aprobado con Dieciséis (16)

Siendo las **12:00 p.m.** del día **26 de diciembre de 2025**, culmina el acto de sustentación de tesis, y en conformidad con lo actuado, los miembros del jurado firman al pie del presente.

MSc. Ing. José Ernesto ESTRADA CÁRDENAS
Presidente

Ing. Moisés Nico BARBARÁN ORIUNDO
Miembro
Ing. Hemerson LIZARBE ALARCON
Miembro
Ing. Alex Sander IRCAÑAUPA HUAMANI
Miembro Asesor
MSc. Ing. Saúl Walter RETAMOZO FERNÁNDEZ
Secretario docente de la FIMGC



CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

CONSTANCIA N° 05-2026-FIMGC/ASIH

El que suscribe; responsable verificador de originalidad de trabajos de tesis de pregrado con el software Turnitin, de la Escuelas Profesional de **Ingeniería Civil** de la **Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil**; en cumplimiento a la **Resolución de Consejo Universitario N° 039-2021-UNSCH-CU**, Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación de la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga y **Resolución Decanal N° 697-2024-FIMGC-UNSCH-D**, dejo constancia de originalidad de trabajo de investigación, que el/la Sr./Srta.

Apellidos y Nombres : Bryan Tarik URBINA GOMEZ
Escuela Profesional : INGENIERÍA CIVIL
Título de la Tesis : Análisis del efecto de la sobrecarga de fricción lateral en el deterioro de curvas para la carretera con pavimento económico EMP. PE-26 B, Ayacucho, 2024
Evaluación de la Originalidad : 10 % Índice de Similitud
Identificador de la entrega : 2924598932

Por tanto, según los Artículos 12, 13 y 17 del Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación, es **PROCEDENTE** otorgar la **Constancia de Originalidad** para los fines que crea conveniente.

En señal de conformidad y verificación se firma la presente constancia

Ayacucho, 06 de abril del 2026



UNIVERSIDAD NACIONAL DE
SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA
Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil

Mg. Ing. Alex Sander IRCANAUPA HUAMANT
Verificador de Originalidad de Trabajos de Tesis de Pregrado
Escuela de Formación Profesional de Ingeniería Civil

Análisis del efecto de la sobrecarga de fricción lateral en el deterioro de curvas para la carretera con pavimento económico EMP. PE-26 B, Ayacucho, 2024

por Bryan Tarik URBINA GOMEZ

Fecha de entrega: 06-abr-2026 11:38p. m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2924598932

Nombre del archivo: Tesis_Bryan_Tarik_Urbina_G_mez.pdf (50.8M)

Total de palabras: 31316

Total de caracteres: 163111

Análisis del efecto de la sobrecarga de fricción lateral en el deterioro de curvas para la carretera con pavimento económico EMP. PE-26 B, Ayacucho, 2024

INFORME DE ORIGINALIDAD

10%

INDICE DE SIMILITUD

9%

FUENTES DE INTERNET

3%

PUBLICACIONES

5%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	revistas.unbosque.edu.co Fuente de Internet	2%
2	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga Trabajo del estudiante	1%
3	repositorio.uap.edu.pe Fuente de Internet	1%
4	qdoc.tips Fuente de Internet	1%
5	pdffox.com Fuente de Internet	1%
6	www.coursehero.com Fuente de Internet	<1%
7	repositorio.uprit.edu.pe Fuente de Internet	<1%
8	hdl.handle.net Fuente de Internet	<1%
9	vbook.pub Fuente de Internet	<1%
10	tesis.usat.edu.pe Fuente de Internet	<1%
11	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	<1%
12	masd.unbosque.edu.co Fuente de Internet	<1%
13	docplayer.es Fuente de Internet	<1%
14	es.slideshare.net Fuente de Internet	<1%

15	www.scribd.com Fuente de Internet	<1 %
16	tel.archives-ouvertes.fr Fuente de Internet	<1 %
17	e-spacio.uned.es Fuente de Internet	<1 %
18	trid.trb.org Fuente de Internet	<1 %
19	es.scribd.com Fuente de Internet	<1 %
20	oa.upm.es Fuente de Internet	<1 %
21	Submitted to Universidad Cesar Vallejo Trabajo del estudiante	<1 %
22	downloads.hindawi.com Fuente de Internet	<1 %
23	repositorio.unan.edu.ni Fuente de Internet	<1 %
24	"Enfoque de optimización para la transición desde jornadas parciales a jornadas completas en un sistema escolar", Pontificia Universidad Católica de Chile, 2018 Publicación	<1 %
25	repositorio.uss.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
26	catalogo.extension.cchc.cl Fuente de Internet	<1 %
27	Submitted to University of Petroleum and Energy Studies Trabajo del estudiante	<1 %
28	documentop.com Fuente de Internet	<1 %
29	kobra.uni-kassel.de Fuente de Internet	<1 %

Excluir citas Activo
Excluir bibliografía Activo

Excluir coincidencias < 30 words