RESOLUCIÓN DECANAL N° 429-2025-UNSCH-FCA-D

Ayacucho, 13 de noviembre de 2025

VISTO:

El Reglamento General de Grados Académicos y Títulos Profesionales aprobado por Resolución N° 3403-2024-UNSCH-CU, y la solicitud del bachiller Teófilo Palomino Fernández para la designación de asesor y jurado revisor de su trabajo de suficiencia profesional; y,

CONSIDERANDO:

Que, según los artículos 49° al 56° y el artículo 52° del Reglamento General de Grados y Títulos de la UNSCH, el bachiller debe cumplir los requisitos para la modalidad de suficiencia profesional, los cuales han sido cumplidos, correspondiendo al decano y al director de la escuela designar al asesor y al jurado revisor;

De conformidad con lo dispuesto en el Estatuto versión 2.0-2016, Artículo 289, numeral 10 de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga;

El Decano, en uso de las Facultades que le confiere la Ley;

RESUELVE:

Artículo 1°.- DESIGNAR al Ing. Orlando Fides Sulca Castilla como ASESOR del bachiller Teofilo Palomino Fernandez para la orientación y revisión de su trabajo de suficiencia profesional titulado "Análisis de metodología peruana de diseño de pavimento granular basado en deformaciones observadas en carreteras del distrito Uchuraccay, provincia de Huanta-Ayacucho".

Artículo 2°.- NOMBRAR como jurado revisor a los siguientes docentes:

- Mg. Alex Lazaro Tineo Bermúdez (Presidente)
- M.Sc. Federico Quicaño Suárez (Miembro)
- Ing. Vance Giorgio Fernández Huaman (Miembro)

Artículo 3°.- ENCARGAR a los miembros del jurado la responsabilidad de cumplir con la revisión y dictamen del trabajo de suficiencia profesional en el plazo máximo de 15 días hábiles desde la recepción del documento.

Artículo 4°.- COMUNICAR la presente resolución al interesado, así como al asesor y jurado designados, para los fines correspondientes.

REGÍSTRESE, COMUNÍQUESE Y ARCHÍVESE

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA
Facultad de Ciencias Agrarias
Felipe Escobar Ramírez
DECANO

Distribución:
Interesados
FER/emhp

SOLICITO:
DESIGNACIÓN DE ASESOR PARA REVISIÓN DE TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

SEÑOR DECANO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTOBAL DE HUAMANGA.

S.D.

PALOMINO FERNÁNDEZ Teófilo, identificado con D.N.I. N° 28223137, Bachiller en Ciencias Agrarias, graduado en esta Casa Superior de Estudios, ante usted con el debido respeto me presento y expongo:

Que, en mi propósito de obtener el título de Ingeniero Agrónomo por la modalidad de **Trabajo de Suficiencia Profesional**, acudo al Despacho de su digno cargo con la finalidad de solicitar la DESIGNACIÓN DE ASESOR para la revisión del trabajo que me digno presentar bajo el título de «Análisis de metodología peruana de diseño de pavimento granular basado en deformaciones observadas en carreteras del distrito Uchuraccay, provincia de Huanta - Ayacucho», que me permita continuar con los trámites para el logro de mi propósito.

POR TANTO:

Ruego a usted acceder mi petición por ser justa.

Ayacucho, 29 de octubre de 2025.

Teófilo Palomino Fernández

Adjunto:
- Solicitud para designación de asesor
- Recibo de pago por el derecho de revisión y aprobación del trabajo de suficiencia profesional
- Fotocopia legalizada del grado académico de bachiller
- Constancia de trabajo que acredite haber prestado servicios relacionados con la profesión
- Copia legible del DNI

Universidad Nacional de San Cristobal de Huamanga
RUC: 20143660754
Pq. Portal Independencia Nro. 57
U.V. Parque Sucre

TESORERÍA-CAJA

BOLETA VENTA ELECTRONICA
20 - 00006881

Cliente	PALOMINO FERNANDEZ TEOFILO
Doc. Ident.	28223137
Direc.	
Fecha Emis.	29/10/2025 Hora 10:52
Moneda	Soles

Cant.	Und	Precio	Total
Exposicion de informe de trabajo profesional			
1.00	UND	40	40.00

Sub.Total	40.00
TOTAL S/	40.00

Son: CUARENTA CON 00/100 SOLES

Medio de Pago: Efectivo

Usuario: CARLOS EDMER

REPUBLICA DEL PERU

Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga

A NOMBRE DE LA NACION

El Rector de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga

Por Cuanto:

El Consejo Universitario con fecha 17 de Setiembre de 1985 ha conferido el

Grado de Bachiller en Ciencias Agrícolas

a don Teófilo Palomino Fernández

aprobado por la Facultad de Ciencias Agrarias

con fecha 16 de Setiembre de 1985

Por tanto:

Se expide el presente Diploma para que se le reconozca como tal.

Dado y firmado en Ayacucho, Perú, a 20 de Setiembre de 1985

RECTOR

SECRETARIO GENERAL



INTERESADO

RESOLUCION RECTORAL Nº 849-85

REGISTRADO A ff. 26 ... DEL LIBRO I

COLEGIO DE NOTARIOS AYACUCHO

NOTARÍA GUDELIA MACHACA ABOGADA NOTARIA AYACUCHO

CERTIFICO: Que la presente copia fotostática es autentica de su original que consta de 01 Fjs, la misma que he tenido a la vista y legalizo.

Ayacucho, 28 OCT 2025

CERTIFICADO DE PRESTACIÓN DE SERVICIOS

El que suscribe, Gerente de Administración de T&P CENTAURO BUILDER E.I.R.L.

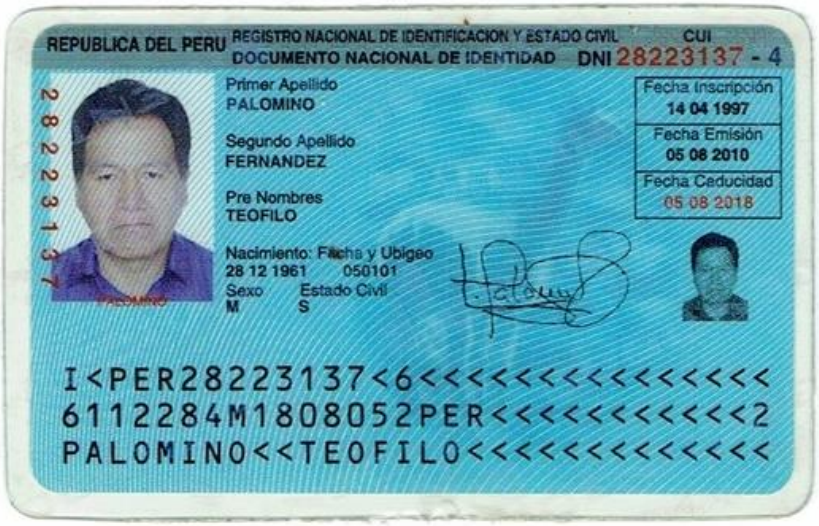
CERTIFICA

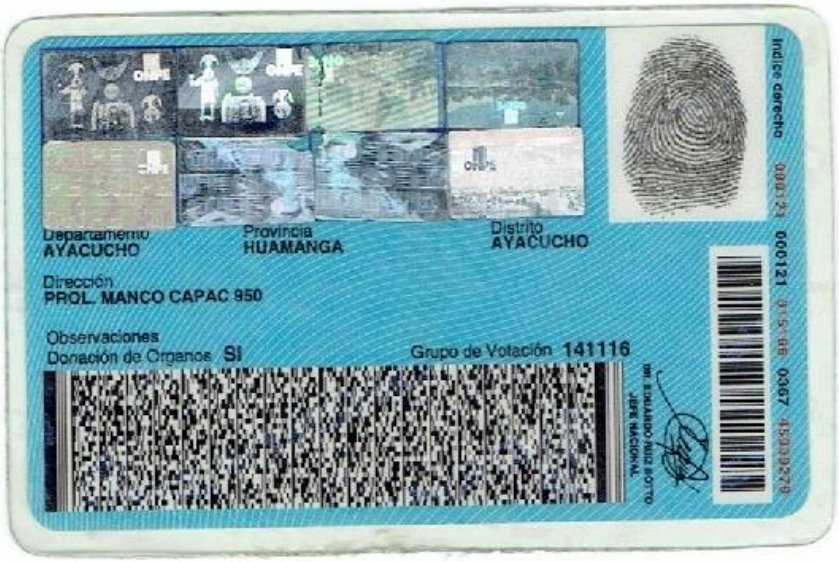
Que, el Sr. Teófilo Palomino Fernández, identificado con D.N.I. 28223137, viene brindando sus servicios en favor de T&P CENTAURO BUILDER E.I.R.L., en el cargo de Asistente de Consultoría de Obras de Desarrollo Rural, en el período del 10 de setiembre de 2008 hasta la actualidad.

Se expide el presente certificado a solicitud del interesado, para los fines que estime conveniente.

Ayacucho, 28 de octubre de 2025.

LIC. ADM. DIANA JEANETH PARIONA ROJAS
GERENTE DE ADMINISTRACIÓN


REPUBLICA DEL PERU
REGISTRO NACIONAL DE IDENTIFICACION Y ESTADO CIVIL
DOCUMENTO NACIONAL DE IDENTIDAD
CUI
DNI 28223137 - 4
28223137
Primer Apellido
PALOMINO
Segundo Apellido
FERNANDEZ
Pre Nombres
TEOFILO
Nacimiento: Fecha y Ubigeo
28 12 1961 050101
Sexo
M
Estado Civil
S
Fecha Inscripción
14 04 1997
Fecha Emisión
05 08 2010
Fecha Caducidad
05 08 2018
I<PER28223137<6<<<<<<<<<<<<<<<
6112284M1808052PER<<<<<<<<<<<2
PALOMINO<<TEOFILO<<<<<<<<<<<<<


Indice derecho
Departamento
AYACUCHO
Provincia
HUAMANGA
Distrito
AYACUCHO
Dirección
PROL. MANCO CAPAC 950
Observaciones
Donación de Organos SI
Grupo de Votación 141116
000121
0367

Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga

Facultad de Ciencias Agrarias

Escuela Profesional de Agronomía

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Análisis de metodología peruana de diseño de pavimento granular basado en deformaciones observadas en carreteras del distrito Uchuraccay, provincia de Huanta - Ayacucho

PRESENTADO POR:

Teófilo Palomino Fernández

Para optar el título profesional de:

Ingeniero Agrónomo

AYACUCHO – PERÚ

2025

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO I
INTRODUCCIÓN A LA INSTITUCIÓN PRIVADA
1.1 DATOS GENERALES DE LA EMPRESA 1
1.2 MISIÓN 1
1.3 VISIÓN 1
1.4 PRINCIPIOS 1
1.5 VALORES 1
1.6 ORGANIGRAMA INSTITUCIONAL 2
1.7 DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD DE LA EMPRESA VINCULADA A LA AGRONOMÍA 2
1.8 CONTEXTO ESPECÍFICO DE LA ACTIVIDAD, VINCULADA A LA AGRONOMÍA 4
1.9 CARGO O PUESTO DEL BACHILLER 4
2.1 ENTORNO DEL TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL 5
2.2 ANTECEDENTES DE LA SITUACIÓN QUE GENERA LA NECESIDAD DEL PROYECTO DE PRÁCTICA 5
2.3 MOTIVO PARA SELECCIONAR O IDENTIFICAR EL TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL 10
2.4 ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN 11
2.5 DIAGNÓSTICO DEL ÁREA FUNCIONAL 12
2.6 DATOS SOCIOECONÓMICOS 13
2.6.1 Aspectos demográficos 13
2.6.2 Aspectos económicos 13
2.7 IMPORTANCIA DEL ÁREA FUNCIONAL 13
2.8 OBSTÁCULOS DEL ENTORNO 14
3.1 OBJETIVOS 15
3.1.1 Objetivo general 15
3.1.2 Objetivos específicos 15
3.1.3 Indicadores del objetivo 15
3.2 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA 15
3.3 BENEFICIOS ESPERADOS 17
3.4 ALCANCES DEL TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL 17
3.5 FORMA DE MEDICIÓN DEL ALCANCE DEL TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL 18
3.6 PRESUPUESTO REQUERIDO Y PROCESO DE AUTORIZACIÓN 18

3.7 APORTE DE VALOR A LA ORGANIZACIÓN Y SU VINCULACIÓN A LA CARRERA PROFESIONAL 19
4.1 INTRODUCCIÓN 20
4.2 ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO 20
4.2.1 Fase de campo 20
4.2.2 Fase de gabinete 21
4.3 DESCRIPCIÓN DE LA RUTA EN ESTUDIO 21
4.4 ENFOQUE TEÓRICO 24
4.4.1 Propiedades físicas del agua que definen la relación suelo-agua 24
4.4.2 Mecanismos de acción en la matriz del suelo 27
4.4.3 Flujo de agua en el suelo – Ley de Darcy 28
4.4.4 Ley de Darcy-Buckingham 32
4.4.5 Histéresis en el contenido de agua en el suelo 34
4.4.6 Histéresis y entropía en el suelo 35
4.4.7 Anisotropía del afirmado y su relación con la deformación 37
4.5 GEOMETRÍA VERTICAL DEL PROYECTO VIAL Y SU RELACIÓN CON LAS DEFORMACIONES OBSERVADAS EN CAMPO 38
4.5.1 Introducción 38
4.5.2 Tipificación de pendiente vial por su desempeño hidráulico 38
4.5.3 Deformación en carreteras de pendiente hidráulicamente erosivo 39
4.5.4 Deformaciones en carreteras de pendiente hidráulicamente eficiente 40
4.5.5 Deformaciones en carreteras de pendiente hidráulicamente no-drenante 41
4.6 GEOMETRÍA HORIZONTAL DEL PROYECTO VIAL Y SU RELACIÓN CON LAS DEFORMACIONES OBSERVADAS EN CAMPO 42
4.6.1 Introducción 42
4.6.2 Mecanismo de deformación en curvas 42
4.6.3 Mecanismo diferencial del vehículo y su relación con el desgaste 44
4.7 IDENTIFICACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS MECANISMOS DE DEFORMACIÓN DE AFIRMADO OBSERVADOS EN CAMPO 45
4.7.1 Deformación por ahuellamiento vertical 45
4.7.2 Deformación por ahuellamiento reclinado 48
4.7.3 Deformación por formación de surcos 50
4.7.3.1 Análisis del origen de la escorrentía superficial sobre el afirmado 50
4.7.3.2 Mecanismo de formación de surcos 52
4.7.3.3 Tipos de surcos identificados en carreteras afirmadas 54
4.7.3.4 Geometría vertical y su relación con la formación de surcos 55
4.7.4 Deformación por formación de hoyos 55

4.7.5 Deformación por pérdida de firme en curvas de volteo 59
4.7.5.1 Introducción 59
4.7.5.2 Particularidades de las curvas de volteo 60
4.7.5.3 Mecanismos de abrasión por neumáticos en curvas de volteo 61
4.7.5.4 desgaste por frenado en curvas de volteo 63
4.8 ANÁLISIS DEL ORIGEN DE LOS MÉTODOS DE DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES ADOPTADOS POR LA NORMA PERUANA 64
4.8.1 Síntesis de la adopción del método NAASRA / AUSTROADS por la norma peruana 64
4.8.2 Breve referencia a la génesis del método NAASRA / AUSTROADS 65
4.8.3 Entorno físico-geográfico en que se edificó el método NAASRA / AUSTROADS. 66
4.8.4 Repercusiones de la supresión del recubrimiento bituminoso por la norma peruana 70
4.8.5 Breve referencia del origen del método AASHTO '93 73
4.8.5.1 Descripción del entorno donde se desarrolló el método 73
4.8.5.2 Fórmulas de diseño del método AASHTO '93 para pavimento flexible 74
4.8.5.3 Evolución del método AASHTO '93 75
4.8.5.4 Restricciones a la aplicabilidad del método en el país 76
4.8.6 Inaplicabilidad exterior del método Mecanístico-Empírico de AASHTO 78
4.9 RESUMEN DE LOS MECANISMOS DE DEFORMACIÓN Y APLICABILIDAD DEL MÉTODO 79
4.10 ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN A LA DEFORMACIÓN EN CARRETERAS DE PENDIENTE HIDRÁULICAMENTE NO-DRENANTE 83
4.11 ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN A LA DEFORMACIÓN EN CURVAS DE VOLTEO 83
5.1 RESULTADO GENERAL 86
5.2 CONCLUSIONES 86
5.3 IMPLICANCIAS DE LA APLICACIÓN DE LA NORMA PERUANA 87
5.4 RECOMENDACIONES RESPECTO A LA NORMATIVA 87
5.5 RECOMENDACIONES TÉCNICAS DE APLICACIÓN INMEDIATA 88
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA 89
ANEXOS 90

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Delimitación de secciones con fines de estudio 9

Tabla 2. Cuadro de distancias entre localidades y puntos notables de la vía 23
Tabla 3. Tipología de pendiente según desempeño hidráulico 39

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Organigrama de T&P Centauro Builder E.I.R.L. 2
Figura 2. Delimitación de las secciones I y II con fines de estudio..... 9
Figura 3. Puente de hidrógeno intermolecular del agua 24
Figura 4. Contenido de agua en el suelo 28
Figura 5. Histéresis en la curva de retención de agua 35
Figura 6. Bulbos de presión bajo acción de rodillo mecánico 38
Figura 7. Esquema de ahuellamiento vertical 45
Figura 8. Tramos de carretera de pendiente favorable al drenaje..... 48
Figura 9. Esquema de ahuellamiento reclinado en curva normal..... 49
Figura 10. Curva con ahuellamiento suavizado por recompactación en el tramo Uchuraccay - Cunya..... 50
Figura 11. Nacimiento del hoyo 57
Figura 12. Evolución del hoyo 57
Figura 13. Escenarios viales de Australia y Perú..... 69
Figura 14. Afirmado estabilizado con recubrimiento bituminoso 72
Figura 15. Baches en superficie de pendiente nula en el tramo Cunya - Huaychao 81
Figura 16. Ahuellamiento reclinado típico en curva 82
Figura 17. Típica deformación de la curva de volteo 82
Figura 18. Pavimento de concreto en curva de volteo 85

CAPÍTULO I
INTRODUCCIÓN DE LA INSTITUCIÓN PRIVADA

1.1 DATOS GENERALES DE LA EMPRESA

Razón Social : T&P CENTAURO BUILDER E.I.R.L.
RUC : 20494606519
Dirección : Av. Simón Bolívar Mz W Lote 11 – Urb. Los Licenciados – Ayacucho – Huamanga - Ayacucho
Correo electrónico : civilperu@gmail.com
N° de empleados : Variable, de 2 a 5

1.2 MISIÓN

Prestar servicios con los más altos estándares de calidad en el diseño, ejecución y gestión de proyectos, ofreciendo soluciones integrales e innovadoras, generando valor para los grupos de interés y sociedad en conjunto.

1.3 VISIÓN

Constituirse en una empresa referente por su especialización en la formulación de estudios y ejecución de obras de desarrollo rural, desarrollando capacidades en el interior de los grupos organizados para una mejor gestión de proyectos.

1.4 PRINCIPIOS

- Excelencia en la calidad del servicio en favor de las personas y grupos de interés
- Promoción del desarrollo social y económico sostenibles, con enfoque en la preservación del medio ambiente
- Toma de decisiones con responsabilidad social, buscando el bien común y el trato igualitario
- Uso eficiente de tiempo y recursos en el cumplimiento de metas

1.5 VALORES

- Responsabilidad, honestidad, transparencia y vocación de servicio
- Tolerancia, equidad y trato inclusivo en todo ambiente de trabajo
- Compromiso con la excelencia, la precisión y entrega de resultados confiables
- Respeto a las formas de organización, tradiciones culturales, costumbres y conocimientos de los grupos de interés.

1.6 ORGANIGRAMA INSTITUCIONAL

El organigrama institucional es el siguiente:

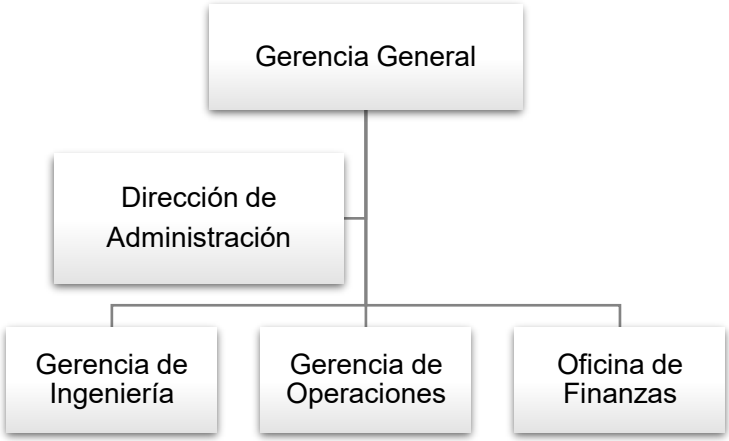


Figura 1. Organigrama de T&P Centauro Builder E.I.R.L.

1.7 DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD DE LA EMPRESA VINCULADA A LA AGRONOMÍA

En correspondencia con la naturaleza jurídica, la actividad empresarial de T&P Centauro Builder E.I.R.L. está orientada al rubro de consultoría y ejecución de obras en el eje de desarrollo rural para los sectores estatal y privado, comprendiendo la actividad de consultoría la formulación de estudios de preinversión y definitivos en sus diversas líneas de inversión que a continuación se enlistan.

Infraestructura de riego

Comprende la intervención en sus diversos componentes, entre ellos, obras de captación, obras de acueducción a base de canales revestidos y tuberías, sistemas de tuberías forzadas, estructuras de embalses, obras de almacenamiento de concreto y a base de geocompuestos, redes de distribución, sistemas de aplicación de riego tecnificado, etc.

Infraestructura pecuaria

La empresa ha desarrollado proyectos de alcance distrital orientados a la crianza de animales menores, centros de beneficio y comercialización cárnica, gestionados e implementados con éxito en los distritos de Vinchos, Socos y San Miguel, por Organismos No Gubernamentales con fuente de financiamiento de cooperación internacional.

Infraestructura de saneamiento

Abarca el diseño y construcción de redes de agua potable rural con sus componentes de captación, conducción, almacenamiento y distribución; sistemas de alcantarillado rural con sus componentes de redes colectores, emisores y plantas de tratamiento en sus diversas formas, entre ellos tanques sépticos con zanjas de infiltración, tanques sépticos con pozos de percolación, tanques sépticos con lagunas de oxidación, tanques imhoff con biofiltros, servicios higiénicos rurales convencionales, unidades básicas de saneamiento (UBS), etc.

Infraestructura educativa

Abarca la formulación de estudios de preinversión y definitivos, así como la construcción de infraestructura educativa rural, con financiamiento de gobiernos locales y gobierno central.

Infraestructura de servicios comunales

Comprende la formulación de estudios de preinversión y definitivos, así como la construcción de infraestructura de servicios comunales en sus diversas formas.

Caminos vecinales

Comprende la formulación de estudios de preinversión y definitivos, así como la ejecución de obras de infraestructura de caminos vecinales a nivel de trocha carrozable y carreteras afirmadas, con sus respectivas obras de arte menores y mayores, entre ellos pontones y puentes, muros de contención, obras de drenaje, etc.

Ordenamiento urbano

La empresa ha efectuado labores de formulación de planos de ordenamiento urbano de comunidades con viviendas dispersas, constituyéndolas en núcleos urbanos consolidados. Los núcleos urbanos de las comunidades de Luyanta y Acraybamba, del distrito de Socos, Unión Potrero de la comunidad de Chuschi, entre otros, son producto de la labor del aspirante.

Servicio de apoyo a la comunidad

Muchas de las labores desarrolladas por el aspirante fueron dadas a título gratuito, habida cuenta de que el campo de acción de la agronomía, a menudo encuentra asidero en poblaciones paupérrimas, y la firmeza del compromiso con el campo

llama a acudir cuando un servicio es solicitado, en regla con las instrucciones asimiladas en las aulas universitarias.

1.8 CONTEXTO ESPECÍFICO DE LA ACTIVIDAD, VINCULADA A LA AGRONOMÍA

Los caminos vecinales son vías de comunicación que conectan comunidades rurales entre sí, y éstas con las ciudades principales sede de capitales distritales, provinciales y departamentales. Como tales, no dejan de tener vínculo estrecho con la agronomía, ya que constituyen medios de acceso a los mercados de comercialización de productos agropecuarios, y a centros de expendio de insumos para la producción. En la cadena productiva, los caminos vecinales constituyen infraestructura elemental de apoyo a la producción agrícola y pecuaria; y adicionalmente constituyen medios de acceso del productor agropecuario a los servicios de salud, educación y demás servicios básicos.

El estado de conservación de esta infraestructura es un factor determinante en el costo de la producción agropecuaria. Una carretera en un estado terminal de servicialidad implica mayores costos de flete y pasajes, tanto para el traslado de productos al mercado como para el traslado de insumos agropecuarios a chacra, lo cual genera una secuela negativa de efectos, como los mayores costos de mantenimiento vehicular, mayor consumo de combustible, mayor tiempo de viaje, baja afluencia vehicular, etc.

No se debe perder de vista que la rentabilidad económica de la inversión pública en una infraestructura vial en nuestro ámbito, se analiza sobre la base del volumen de producción agrícola, pecuaria y derivados en su ámbito de influencia, y este nexo se mantendrá de manera inmutable a lo largo del tiempo.

Es así cómo recae sobre la ingeniería rural el interés por mantener los caminos vecinales en condiciones óptimas de servicialidad, buscando alternativas y tecnologías más eficientes en cuanto a desempeño y durabilidad.

1.9 CARGO O PUESTO DEL BACHILLER

Por ser titular de T&P Centauro Builder E.I.R.L., el Bachiller ostenta el cargo de Gerente General.

CAPÍTULO II
DATOS DEL ENTORNO DE LA ACTIVIDAD DEL ASPIRANTE

2.1 ENTORNO DEL TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

El trabajo de suficiencia profesional se desarrolló en las etapas de campo y gabinete, que tuvieron lugar del 28 de junio al 3 de mayo, y del 4 al 25 de mayo del 2025, respectivamente. Para trabajos de campo se conformó un equipo de seis trabajadores; tres profesionales de especialidad y tres asistentes, procedentes del área de estudio. La sede de operaciones se estableció durante los primeros cuatro días en el local del tambo de la comunidad de Cunya, para luego trasladarse a la localidad de Pampalca. En ambas localidades el equipo recibió apoyo de las autoridades comunales.

Los trabajos de campo se desarrollaron en un entorno libre de obstáculos. En general, tanto autoridades como la población de las comunidades por las que atraviesa la vía han prestado apoyo proporcionando toda información solicitada. Asimismo, se mantuvieron dispuestos a otorgar las autorizaciones para la explotación de canteras de afirmado y fuentes de agua, expresando así su interés por tener sus carreteras en buen estado de operatividad.

Los trabajos de gabinete se desarrollaron en la oficina del aspirante, con participación de tres profesionales de las especialidades de ingeniería civil (2), y de topografía (1); en tanto los estudios de Geología, Geotecnia y de Mecánica de Suelos fueron desarrollados por servicios de terceros.

2.2 ANTECEDENTES DE LA SITUACIÓN QUE GENERA LA NECESIDAD DEL PROYECTO DE PRÁCTICA

En fecha 21 de marzo de 2025, el Ing. Martín Arone Martínez suscribió un contrato con la Municipalidad Distrital de Uchuraccay, para la formulación del expediente técnico del proyecto «MANTENIMIENTO PERIODICO Y RUTINARIO DE LOS CAMINOS VECINALES: TRAMO I: AY-604 (Saccsahuillca) – Emp. AY-596 (Uchuraccay) – Emp. AY-596 (Cunya) – AY-603 (Huaychao); y TRAMO II: Emp. AY-596 (Cunya) – Emp. AY-591 (Carhuahurán) – Emp. AY-591 (Pampalca) - Emp. PE-28B (Ccano)».

Los trabajos discurrieron en los términos descritos en la Sección 2.1, orientados a la elaboración del expediente técnico materia del referido contrato, en el cual, el aspirante formó parte del equipo profesional, subcontratado por el consultor contratista, Ing. Martín Arone Martínez, cuya responsabilidad encargada fue la de recoger información relacionada a los formatos que abajo se enlistan, con excepción del Formato N° 5.0 – Drenaje y obras de arte.

Regularmente, la elaboración de un expediente técnico de mantenimiento periódico se desarrolla siguiendo pautas preestablecidas a través de directivas del Sector Transportes y Comunicaciones, las cuales regulan la elaboración de los estudios en todos sus componentes, debiendo el consultor cumplir con todas las pautas que las directivas imparten.

En este contexto se desarrollaron los trabajos de levantamiento de información en campo, concerniente al inventario vial, que comprende los siguientes formatos:

- Formato N° 1.0 – Datos generales
- Formato N° 2.0 - Topografía
- Formato N° 3.A - Daños en pavimentos
- Formato N° 3.B - Verificación de espesor de pavimento
- Formato N° 4.0 - Canteras, fuentes de agua y depósitos de material excedente
- Formato N° 5.0 - Drenaje y obras de arte
- Formato N° 6.0 - Plazoletas de cruce y señalización

En el proceso de levantamiento de información, para lo cual fue preciso recorrer toda la extensión de la vía en estudio, se detectó **patrones de deformación claramente diferenciados en el sentido longitudinal**, a lo largo de la superficie de la capa de afirmado, estrechamente relacionados con las geometrías horizontal y vertical longitudinales. Como en todo proceso de observación, esta identificación no fue un hecho súbito, por el contrario, tuvo una evolución gradual, de nulo en el primer día, intensificándose en los días subsiguientes hasta quedar claramente diferenciados en los últimos segmentos del trabajo.

Estos patrones identificados de deformación se resumen en las siguientes pautas:

(1) En tramos de carretera de pendiente elevada o hidráulicamente erosiva, predomina la destrucción de la capa de afirmado por formación de surcos

longitudinales profundos, que conducen a la servicialidad terminal de la vía, de manera prematura y acelerada, que puede reducirse a una estación pluviosa y en muchos casos a una tormenta de elevada intensidad.

(2) En tramos de carretera rectos, dotadas de pendiente hidráulicamente eficiente, predomina la formación de surcos longitudinales, cuya presencia no compromete la servicialidad de la vía. El ahuellamiento vertical no llega a desarrollarse plenamente; en consecuencia, tampoco afecta la transitabilidad.

(3) En tramos de carretera de baja pendiente o pendiente nula, el mecanismo de deformación dominante es por formación de hoyos, cuya densidad guarda proporción inversa con la pendiente; es decir, a pendiente nula existe una máxima densidad de oquedades, y conforme incrementa la pendiente esta densidad disminuye, hasta hacerse nula en carreteras de pendiente hidráulicamente eficiente.

(4) En curvas abiertas, la deformación, de existir ésta, se da por ahuellamiento reclinado, subsanable por actividades de mantenimiento rutinario, y salvo contadas excepciones puede dar lugar al decremento de la servicialidad de la vía.

(5) En curvas de volteo, la deformación se da por severa pérdida de capa, como consecuencia del efecto combinado de erosión hídrica y acción mecánica vehicular.

Es necesario aclarar que las patologías descritas corresponden a aquellas de naturaleza propia de la estructura del afirmado, desvinculadas de los efectos de aguas laterales o del propio subsuelo, que por deficiente drenaje irrumpen en la estructura del afirmado.

Identificados estos mecanismos de deformación, asaltan la imaginación la búsqueda de explicaciones, muchas de las cuales van encontrando respuesta en el propio entorno.

Lo que capturó la atención en seguida fue el material constituyente del firme, resaltando que un mismo tipo de material respondía de manera diferente en tramos rectos que en aquellos anfractuosos, y que un mismo tipo de material tenía comportamiento diferente en configuraciones diferentes de pendientes.

Estas observaciones exigían un análisis pormenorizado de las causas y el planteamiento de alternativas de solución, y el expediente técnico contratado no

tenía asidero para tales propósitos, lo cual condujo a la necesidad de desarrollar un estudio investigatorio, bajo un diseño propio de procedimientos y contenidos, que el aspirante debía conducir de manera independiente e individual.

Tomada esta determinación, el desarrollo del estudio siguió dos cauces:

- Por el compromiso contractual, se elaboró el expediente técnico conforme a los términos de referencia, sobre la base de la información levantada en campo, labor que se desarrolló de manera colegiada con los respectivos especialistas. El expediente técnico se desarrolló sobre dos tramos:

  Tramo I: Cumbre Saccsahuillca – Uchuraccay – Cunya – Huaychao – Puente Accahuaylla, y
  Tramo II: Cunya – Huaynacancha – Carhuahurán – Pampalca – Chuyas – Ccano.

- En atención específica a los patrones (1), (3) y (5) observados, se consideró pertinente desarrollar un estudio alternativo por cuenta propia, a título de Trabajo de Suficiencia Profesional, labor que demandaría un estudio a profundidad de estos mecanismos de deformación, considerando, en un enfoque holístico, todos los elementos concurrentes.

  Para este propósito se seleccionó parte del Tramo I y la totalidad del Tramo II que comprendió el expediente técnico, con la finalidad de constituir un solo tronco de vía, a diferencia del expediente técnico que configuraba dos ramas.

  Debido a un requerimiento añadido, la vía troncal seleccionada para el presente estudio también se fraccionó en dos tramos, los cuales se denotan por «secciones I y II» a fin de evitar confusión con la notación de «tramos» correspondientes al expediente técnico. La delimitación de estas secciones se presenta en la tabla y figura siguientes.

Tabla 1. Delimitación de secciones con fines de estudio

Descripción	Longitud (km)
Sección I: Cumbre Saccsahuillca – Uchuraccay – Cunya – Cumbre Pucaccasa	17.700
Sección II: Cumbre Pucaccasa - Huaynacancha – Carhuahurán – Pampalca – Chuyas – Ccano	36.816
Longitud total (km)	54.516

La siguiente figura muestra el recorrido del tramo donde se desarrolló el presente estudio.

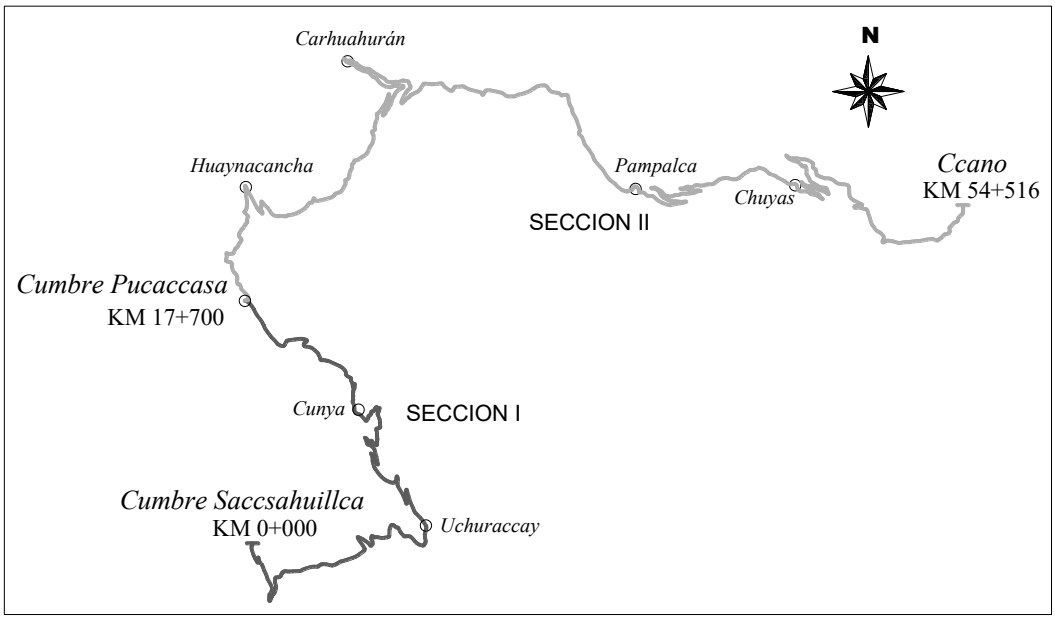


Figura 2. Delimitación de las secciones I y II con fines de estudio

Esta subdivisión obedece al régimen del tráfico vehicular, ya que la sección I, que abarca desde la Cumbre Saccsahuillca hasta la de Pucaccasa, es un tramo alterno que conecta directamente las comunidades del distrito de Uchuraccay con la capital provincial de Huanta por su lado Nor-Este, con un menor tráfico vehicular; en tanto, la sección II, que abarca de la Cumbre Pucaccasa hasta la localidad de Ccano, constituye parte de la vía de penetración de la capital provincial de Huanta al Valle de los Ríos Apurímac, Ene y Mantaro, por la ruta Huanta – Chaca – Purus por su lado Nor-Oeste, con punto de encuentro con la sección I en la Cumbre Pucaccasa. Por esta razón, la sección II soporta un mayor flujo vehicular. Resultado de ello se tiene dos cálculos de parámetros de tráfico vial (ver Anexo 1).

Es así como surge la necesidad del proyecto de práctica.

2.3 MOTIVO PARA SELECCIONAR O IDENTIFICAR EL TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Desde el período en que el aspirante comienza el ejercicio de la profesión, ha participado en la elaboración de numerosos estudios de construcción, rehabilitación, mejoramiento y mantenimiento de caminos vecinales, bajo estructuración de afirmado o pavimento granular. De manera similar tuvo participación en la ejecución física de obras de caminos vecinales.

Se entenderá que los estudios, independientemente sean éstos de preinversión o de inversión, el consultor los desarrolla sobre lineamientos técnicos específicos emanados del Sector Transportes y Comunicaciones. Lo propio sucede en la ejecución física, proceso en el que, para obtener resultados que superen el control de calidad de una obra basta que los ejecutores cumplan con toda especificación técnica consagrada en el expediente técnico.

No obstante, la vigilancia del desempeño, las tareas de preservación y mantenimiento y todo lo que depare el devenir de estas creaciones no son incumbencia de los actores que lo concibieron, no de quienes conocen escrupulosamente su anatomía y fisiología, porque no existe código alguno que los vincule a tales prestaciones. El proyectista considera cumplido su cometido en el momento en que su expediente ha ameritado la «no objeción»; en adelante, es ajeno a la suerte que acompañe al producto de su inventiva. En igual forma, el ejecutor de obra ve cumplida su misión en el momento en que se le firma el acta de conformidad de obra. En ninguno de estos casos, en la marcha del tiempo, los actores vuelven a andar el camino que rastrillaron, movidos por la inquietud de examinar la salud de su creación.

Un notable filósofo interpreta inadvertidamente el sentido de cada uno de los momentos que el proceso comporta, en la frase: «*Una cosa es el pensamiento, otra la acción, y otra la imagen de la acción*». Incidentalmente, este filósofo hace alusión al ciclo de una obra, denotando las variadas facciones que irradia cada etapa pese a tratarse de un mismo objeto, plasmado de un modo en la idea original, hasta la percepción final desde un entorno colectivo, donde los actores principales,

confundidos entre los espectadores, sólo se atienen a contemplar la imagen de su composición.

Así, la identificación de los patrones de deformación descritos en la Sección 2.2 no son resultado de observancia de códigos o cumplimiento de prescripciones de naturaleza alguna, mas son resultado de percepciones espontáneas que llaman a la abstracción en busca de respuestas.

En este proceso de observaciones de campo, rondó un atisbo de sospecha que las geometrías horizontal y vertical tendrían su rol en los patrones de deformación descritos, los cuales a su vez estarían ausentes como variables en los modelos de diseño de las estructuras de afirmado, argumento que despertó el interés para abordar el tema, de carácter investigatorio basado en observaciones de campo.

Es así cómo surge el motivo para seleccionar el presente trabajo de suficiencia profesional.

2.4 ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN

Desde los albores del presente siglo, el gobierno central y los gobiernos locales han desplegado un intenso plan de ampliación de la infraestructura vial en el territorio nacional, promoviendo el acceso a créditos bancarios, destinados entre otras cosas, a la adquisición de maquinaria pesada, gracias al cual, en la actualidad existe una extensa red de caminos vecinales, los cuales han dinamizado en gran medida la economía de los pueblos del interior del país, absorbiendo una fracción importante del parque automotor con los beneficios colaterales que ello comporta.

No obstante, este incremento de la infraestructura acarrea consigo la necesidad de asignar recursos para el mantenimiento vial, para lo cual la entidad sectorial a creado órganos dedicados a esta labor específica. A lo largo de los años, se ha observado una asignación insuficiente de recursos para labores de mantenimiento, por lo cual la gran mayoría de vías vecinales permanecen bajo un elevado grado de caída de servicialidad. Aun cuando las carreteras vecinales adscritas al Sistema Nacional de Carreteras (SINAC) son sometidas a labores de mantenimiento anual, estas labores son muy elementales, con un periodo de durabilidad muy breve.

Una red de caminos interconectando pueblos aislados entre sí, y éstos con las capitales distritales, provinciales y con las ciudades principales, reciben el epíteto

de «carretera buena» mientras conserva su servicialidad en un rango óptimo, lo cual implica una carretera libre de deformaciones en sus diversas formas, comúnmente conocidas como «baches». Aun cuando una mayor parte del tramo carretero presente buenas condiciones de practicabilidad, y una fracción presente deterioro, a juicio del usuario la carretera pasa del calificativo «buena» a «carretera mala». La percepción sensorial de todo individuo interpreta el deterioro de la vía como un rasgo pernicioso, generando un impacto negativo y estrés en su ánimo.

Merece aclarar que a lo largo del desarrollo del estudio se utilizará la expresión «método NAASRA / AUSTRODAS», en mención al Método de Diseño de National Association of Australian State Road Authorities, una mancomunidad de autoridades de transporte y tráfico vial de Australia y Nueva Zelanda, hoy AUSTROADS, que congrega una oncena de entidades; y, la expresión «Guía Austroads» para referirse al documento técnico «Pavement Design – A Guide to the Structural Design of Roads Pavements» del referido método de diseño. Asimismo, se utilizará la expresión «norma peruana» para referirse al documento técnico «Manual de Carreteras - Sección Suelos y Pavimentos – Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos», aprobado por Resolución Directoral N° 10-2014-MTC/14 del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC).

El presente trabajo tiene por objeto proporcionar pautas que sirvan de guía para introducir mejoras en el diseño de la capa de afirmado, orientadas a alargar el período de servicialidad de las carreteras, utilizando como documento base la Guía Austroads en su versión prístina, adoptado por la norma peruana, e introduciendo estructuras especiales en tramos de geometría singular, los cuales permitirán una distribución más igualitaria del deterioro, alargando el período de servicialidad de la ruta vial.

El presente estudio constituye un documento de análisis y discusión, y como tal, su posible implementación requiere la necesidad de introducir modificaciones y correctivos en la normativa sectorial, recayendo en sus órganos técnicos la misión de ampliar las investigaciones.

2.5 DIAGNÓSTICO DEL ÁREA FUNCIONAL

El área funcional en el cual el aspirante ha desarrollado su experiencia laboral es la Gerencia de Ingeniería. Habitualmente, el área funcional es unimembre, constituido

por un ingeniero Civil. No obstante, bajo condiciones eventuales de demanda laboral se implementa con especialistas, básicamente de topografía, arquitectura, agrología, geología y geotecnia, hidrología, estructuras, costos y presupuestos e impacto ambiental.

2.6 DATOS SOCIOECONÓMICOS

La Gerencia de Ingeniería se constituyó como un órgano unimembre, de manera que los datos socioeconómicos estarán referidos a un cuadro unipersonal que se describe en lo que sigue.

2.6.1 Aspectos demográficos

Edad	: 64 años
Sexo	: Masculino
Estado civil	: Soltero
Nivel de educación	: Superior
Carga familiar	: 1
Procedencia	: Distrito de Ayacucho, provincia de Huamanga, departamento de Ayacucho
Lugar de residencia	: Ciudad de Ayacucho

2.6.2 Aspectos económicos

Ingreso mensual promedio	: S/. 4 800.00
Antigüedad laboral	: 40 años
Ocupación	: Proyectista y gerente de empresa de consultoría
Tipo de vivienda	: Material noble

2.7 IMPORTANCIA DEL ÁREA FUNCIONAL

La Gerencia de Ingeniería es un área técnica encargada de conducir el desarrollo de estudios y ejecución de obras, velando por el cumplimiento de los estándares de calidad, en un marco de seguridad y eficiencia. Puntualmente, cumple las siguientes funciones:

- Control de calidad de los materiales y cumplimiento de las especificaciones técnicas en la ejecución de obras.
- Intercambio de ideas con grupos de interés para captar necesidades e iniciativas que conduzcan a la identificación de proyectos sostenibles.

- Identificación y mitigación de amenazas potenciales que pongan en riesgo la actividad empresarial.
- Planificación de procesos y mecanismos de intervención en la ejecución de estudios y obras.
- Capacitación permanente del personal técnico en el marco de la modernidad.

2.8 OBSTÁCULOS DEL ENTORNO

Los trabajos de gabinete se desarrollaron en un ambiente exento de obstáculos significativos.

CAPÍTULO III
JUSTIFICACIÓN Y PROPUESTA DE VALOR PARA LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

3.1 OBJETIVOS

3.1.1 Objetivo general

Establecer criterios para introducir mejoras en el diseño de pavimentos granulares, como elementos de base para mejorar la normativa peruana a fin de disponer de un instrumento de gestión vial más eficiente.

3.1.2 Objetivos específicos

a) Proporcionar pautas que conduzcan a la revisión de las metodologías adoptadas para el diseño de pavimentos granulares a fin de adecuarlas a los entornos físico-geográficos imperantes en el Perú.
b) Sentar nociones básicas que aporten valor para la estructuración de normas técnicas que fomenten la construcción de carreteras vecinales servicialmente más eficientes y duraderas.

3.1.3 Indicadores del objetivo

El indicador está constituido por el estudio elaborado bajo el título: «Análisis objetivo de la metodología de diseño de pavimento granular adoptada por la norma peruana, a partir de deformaciones observadas en la carretera Uchuraccay – Ccano, del distrito de Uchuraccay – Huanta – Ayacucho», que se presenta como sustento del trabajo de suficiencia profesional.

3.2 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

Si bien la norma peruana, en su Artículo 11.2 de la Sección Suelos y Pavimentos faculta el uso de «cualquier método de diseño que satisfaga los requerimientos del proyecto», es necesario considerar que toda metodología disponible y aplicable en nuestro entorno es exógena, en razón a la inexistencia de una metodología propia. En el dictado de este mismo artículo, la norma adopta la ecuación de la Guía Austroads, que permite el cálculo del espesor de afirmado, cuya expresión matemática se reproduce en la Sección 4.8.1.

El método NAASRA / AUSTROADS que la norma propone es de uso generalizado para el diseño de afirmado en nuestro ámbito, y en los proyectos suele

acompañarse eventualmente, de otros pocos métodos menos usuales, igualmente exógenos, sólo con fines de contrastación.

Dos puntos críticos redundan negativamente en la eficiencia de operación del método en nuestro ámbito:

A) La norma peruana adopta el método no en su forma nativa, sino bajo modificaciones cuyos efectos redundan en un desempeño pobre de la estructura del firme, lo cual se traduce en el deterioro longitudinalmente heterogéneo, con trechos en los que mientras unos conservan su complexión juvenil, otros se exhiben ya colmados de hoyos, con signos visibles de senectud prematura. Bajo estas condiciones, la pérdida de servicialidad de la vía, considerada en su conjunto, toma lugar a muy temprana edad.
B) El método que la norma peruana adopta tiene su origen en un entorno físico-geográfico (entendiéndose por tal, la geografía física) drásticamente diferente al del territorio nacional. Como resultado de ello, variables como las geometrías horizontal y vertical, incidentales en nuestro entorno, no han tomado parte en la edificación del método; en consecuencia, sus efectos no tienen presencia en el esculpido del modelo.

Como resultado del análisis que se aborda en el presente estudio, se plantea introducir correctivos a fin de conseguir resultados más eficientes, lo cual no necesariamente implica introducir modificaciones a la norma, pero sí la necesidad de establecer marcos directrices de observancia por parte de las unidades ejecutoras. Actualmente existen restricciones impuestas por líneas de corte, que constituyen un impedimento para la introducción de mejoras de manera directa, sin reformas en la normativa.

Es conocido el criterio de que, en nuestro entorno, el diseño de pavimentos a menudo va acompañado de una carga de incertidumbre, inherente a la metodología propia y a los factores que componen la ecuación. Ante este escenario, agregar más variables al sistema aparenta ser innecesario. No obstante, los resultados del estudio demuestran un juicio contrario a esta suposición, al menos cuando de geometrías horizontal y vertical se trata.

El hecho de que el territorio peruano cuente con una alta densidad de caminos vecinales en comparación a vías de otras categorías, sugiere que gran parte del

parque automotriz está constituido por vehículos livianos, los cuales, precisamente, no entran en el cómputo del ESAL. El modelo nos dice que, en pavimentos flexibles, al igual que en afirmados, son necesarias 1000 camionetas Pick Up para alcanzar un mismo nivel de desgaste que el ocasionado por 1 camión simple de dos ejes. No obstante, si prestamos atención a la geometría horizontal y apelamos a la observación, nos daremos cuenta de que, en curvas abiertas, las primeras ocasionan mayor deformación, en la forma de ahuellamiento reclinado, la cual está vinculada a la velocidad y fuerzas centrípetas que éstas desarrollan, a diferencia de un camión cargado que marcha a velocidad mínima sin generar esta fuerza y sin mayores efectos de fuerzas laterales (explicación más detallada se presenta en la Sección 4.6.2).

Y son aquello lo que tenemos en abundancia en la sierra del país, vehículos ligeros y caminos anfractuosos, cuyos efectos están ausentes en los modelos de diseño.

3.3 BENEFICIOS ESPERADOS

Los beneficios del presente Trabajo de Suficiencia Profesional para el campo de la agronomía son:

a) Conocimiento más agudo de los procedimientos de diseño de carreteras afirmadas, con mejor dominio en el tratamiento de variables, con resultados que devienen en una ingeniería de mejor calidad.
b) Toma de conciencia sobre la importancia de conocer a cabalidad las características físico-mecánicas de los materiales y de los procedimientos de construcción que toman parte en la construcción del afirmado.
c) Toma de decisiones informadas por parte de los órganos sectoriales y unidades ejecutoras, lo cual se traduce en una gestión vial más eficiente.

3.4 ALCANCES DEL TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Según antecedentes descrito en la Sección 2.2, el Trabajo de Suficiencia Profesional tiene su origen en el ámbito de la consultoría de obras. El presente estudio, estructurado sobre la base de observaciones efectuadas en campo, es de carácter explicativo, y es abordado bajo un enfoque holístico, teniendo por objetivo establecer criterios técnicos que coadyuven al perfeccionamiento de la normativa peruana en lo referente a diseño de pavimentos granulares.

La delimitación del Trabajo de Suficiencia Profesional se establece por las siguientes pautas:

1. El núcleo de atención son las carreteras de bajo volumen de tránsito, con estructura de pavimento granular (afirmado), con las siguientes advertencias:
   - Aun cuando la valuación de alguna variable como el ESAL recibe igual tratamiento que el pavimento asfáltico, su estancia queda definida en el tópico del pavimento granular.
   - Se incluye de manera resumida la expresión matemática del método AASHTO de diseño de pavimento asfáltico, por cuanto se utiliza en el cálculo del espesor del afirmado tratado con cal, y se utiliza también para describir comparativamente el entorno en que se forja este método de diseño.
   - Se incursiona colateralmente en el diseño de pavimento rígido, en razón a que la propuesta incluye la implementación de estas estructuras en curvas de volteo.
2. El Trabajo de Suficiencia Profesional se desarrolla en la región sierra, en un camino vecinal afirmado de 54.516 km de longitud, sobre una altitud que abarca desde los 2,443 hasta los 4,253 m.s.n.m. No obstante, con fines ilustrativos de orden general se toma prestadas imágenes de ámbito diferente.
3. El documento constituye un material de análisis y discusión, sujeto a réplica en áreas y condiciones distintas.
4. Si bien, a la luz de las conclusiones, sus argumentos vertebrales pueden resultar también válidos para los métodos de diseño de pavimentos asfálticos y rígidos adoptados por la norma peruana, el hecho constituye un llamado a ampliar los estudios sobre estas estructuras.

3.5 FORMA DE MEDICIÓN DEL ALCANCE DEL TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Tomando en consideración que el estudio es de carácter explicativo, la forma de medición del Trabajo de Suficiencia Profesional es la unidad del documento.

3.6 PRESUPUESTO REQUERIDO Y PROCESO DE AUTORIZACIÓN

El presupuesto requerido para desarrollar el Trabajo de Suficiencia Profesional fue de Diecinueve Mil Soles (S/. 19,000.00), monto necesario para cubrir los trabajos de campo y de gabinete. Del monto requerido, Cinco Mil Ochocientos Soles (S/. 5,800.00) fueron pagados en efectivo, por cuenta del aspirante, básicamente en

trabajos de campo; en tanto los restantes Trece Mil Doscientos Soles (S/. 13,200) corresponden a pagos valorizados a cuenta del aspirante, en forma de honorarios profesionales por prestación de trabajos de campo y de gabinete.

3.7 APORTE DE VALOR A LA ORGANIZACIÓN Y SU VINCULACIÓN A LA CARRERA PROFESIONAL

El Trabajo de Suficiencia Profesional desarrollado genera conocimiento que se traduce en una mejor capacidad técnica empresarial, colocándolo en un entorno más competitivo en los campos de la consultoría y de ejecución de obras. La Agronomía, como parte de la ingeniería rural, promueve el desarrollo social y productivo en el área rural, aborda el diseño de sistemas de producción, comercialización y transformación de productos, procesos en los que la infraestructura vial rural forma parte activa. Una carretera bien conservada supone menor tiempo de viaje, menor desgaste vehicular, menor consumo de combustible, y en consecuencia, menor costo de flete, menores costos de producción agropecuaria e incremento del volumen de producción, todo lo cual redunda en el bienestar social y desarrollo económico de la región. El Trabajo de Suficiencia Profesional busca afianzar el soporte de esta cadena productiva a través de mecanismos de articulación entre los órganos sectoriales y las unidades ejecutoras.

CAPÍTULO IV
DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES DE LA PROPUESTA PARA LA SOLUCION DEL PROBLEMA

4.1 INTRODUCCIÓN

Este capítulo está orientado a analizar la aplicabilidad del método de diseño NAASRA / AUSTROADS adoptado por la norma peruana, mediante:

1) la contrastación de la geografía física imperante en el país de origen y la del territorio peruano; y
2) la importancia que deparan las geometrías horizontal y vertical en el diseño de afirmado de las carreteras locales a efectos de uniformizar y optimizar la servicialidad, elementos que no toman parte en el método de diseño adoptado por la norma peruana.

El estudio se aborda sobre la base de observaciones efectuadas en el tramo señalado en la Tabla 1, sobre una longitud de 54.516 km.

4.2 ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO

Los trabajos se realizaron en dos fases:

- Fase de campo
- Fase de gabinete

4.2.1 Fase de campo

Esta fase comprendió la recopilación de información en campo con el propósito de documentar el grado de deterioro de la estructura del afirmado y el estado de conservación de las obras de arte y drenaje. Se ha efectuado el recorrido de la totalidad del tramo en estudio para recopilar la siguiente información:

- Medición del ancho de plataforma, a intervalos variables de 20 m a 60 m.
- Evaluación de la pérdida de afirmado, generalmente a intervalos de 200 metros, y en ocasiones de daño severo, a distancias menores.
- Evaluación cuantitativa de baches en la superficie de rodadura, que incluye el porcentaje de cobertura de hoyos, diámetro y profundidad de hoyos, profundidad de surcos, huellas, pedregosidad y otros rasgos de interés.
- Inventario de obras de arte y drenaje.
- Registro de canteras de material de afirmado
- Registro de fuentes de agua

- Emplazamiento de campamentos y patios de máquinas
- Emplazamiento de centros poblados

4.2.2 Fase de gabinete

Los trabajos de gabinete comprendieron:

- Recopilación de documentos administrativos
- Recopilación de normas legales
- Recopilación de normas técnicas
- Procesamiento de datos de campo
- Diseños y dibujo de planos
- Elaboración del documento

En el presente trabajo se hace énfasis a la recopilación y procesamiento de datos preferentemente de interés para el estudio; esto es, el deterioro de la estructura del afirmado.

4.3 DESCRIPCIÓN DE LA RUTA EN ESTUDIO

La vía en estudio tiene su punto de partida (km 0+000) en la cumbre Saccsahuillca, a una altitud de 4 253 m.s.n.m. Inicia su recorrido en dirección Sur, cubriendo una breve distancia de 1.63 km en esta dirección, con pendiente descendente hasta las proximidades de la laguna Ticcllaccocha. La pendiente media en este tramo es de -5%. La vía continúa su recorrido en dirección Este, interceptando la localidad de Uchuraccay en la progresiva 6+850, a una altitud de 4 057 m.s.n.m. en este último tramo, la vía desarrolla una pendiente baja en descenso, favorable para la formación de oquedades que cubren la superficie de rodadura, principal constituyente de baches en este tramo.

A partir de Uchuraccay, la vía continúa su recorrido en dirección Norte hacia la localidad de Cunya. No obstante, para llegar a esta localidad se hace necesario remontar la cumbre Totoraccasa, ubicada en el km 8+940, a 4 157 m.s.n.m. A partir de esta cumbre, la vía sigue una pendiente en descenso, siempre en dirección Norte, llegando a la localidad de Cunya, ubicada en el km 13+390, a 3 840 m.s.n.m.

A partir de Cunya continúa su recorrido en dirección Noroeste con pendiente ascendente hasta el abra Pucaccasa, divisoria de las cuencas Mantaro y Apurímac, ubicado a una altitud de 4120 m.s.n.m, cubriendo una longitud de 4.445 km. La

pendiente media de la vía en este tramo es de 6.2%. En el abra Pucaccasa, la vía hace su empalme a la Ruta AY-591, procedente de las localidades de San José de Secce, Chaca, Pallcca y Purus. Por su naturaleza de penetración longitudinal de la provincia de Huanta hacia el valle de los ríos Apurímac, Ene y Mantaro, la vía que sigue soporta visiblemente mayor carga vehicular, y por la misma razón, presenta un ancho mayor respecto a las vías concurrentes. A partir del abra Pucaccasa, la vía hace su recorrido bajo una pendiente de 6.0% en descenso hasta la localidad de Huaynacancha, cubriendo una longitud de 4.106 km, bajo un relieve montañoso de pendiente moderada.

A partir de Huaynacancha, la vía continúa su recorrido con rumbo Noreste al encuentro de la localidad de Carhuahurán, ubicada a 8.032 km de longitud, dominada por una pendiente descendente que promedia los 5.10%, acumulando desde la localidad de Cunya una longitud total de 16.136 km.

A partir de Carhuahurán, el recorrido de la vía toma un rumbo Este y Sur-Este con dirección a las localidades de Llaccllán y Pampalca, por un trazo que se subtiende por la falda alta de la quebrada Carhuahurán, paralelo a su cauce, por una topografía muy escarpada, considerada la más crítica en el tramo en estudio. Entre las localidades de Carhuahurán y Pampalca media una longitud de 8.973 km, abarcando hasta este punto una distancia acumulada de 25.109 km. Con evidencia indubitable, este tramo se caracteriza por presentar baja pendiente que va del 0% al 4%, excepto segmentos localizados dominados por acumulación de material de arrastre o derrumbe, donde la plataforma presenta un perfil senoidal con alternancia de pendientes fuertes. Resalta en este tramo la secuela de daños en la estructura del afirmado dominado por oquedades que hienden la plataforma, debido precisamente a un drenaje deficiente de las aguas pluviales.

La altitud media por la que discurre la vía entre Carhuahurán y Pampalca es de 3 480 m.s.n.m.

En el tramo que sigue a Pampalca, la traza de la vía se adentra en terreno de topografía agreste, desfavorable para la estabilidad no solo de la plataforma, sino también de los taludes superior e inferior. Con el fin de evitar terreno muy agreste, el diseñador vial procuró descender a las riberas del río Yerbabuenayocc (toponímicamente «Carhuahurán», aguas arriba), acudiendo al uso de desarrollos en franjas de terreno más favorables, en una primera instancia hasta la localidad de

Yanarumi. En seguida, tras un breve recorrido rectilíneo de 3.6 km en dirección a la localidad de Chuyas, encontramos otra secuencia de desarrollos en descenso en las faldas bajas de esta localidad. En el último tramo recto, la vía hace un recorrido paralelo al cauce del río Yerbabuenayocc hasta la localidad de Yahuayocc, donde se ubica el badén sobre el río del mismo nombre.

Tomando en cuenta que las localidades Pampalca y Yahuayocc se hallan a altitudes de 3 383 y 2 443 m.s.n.m., respectivamente, y que entre ellas media una longitud de 13.791 km, la pendiente media de descenso es de 6.8%.

El tramo que sigue se desarrolla siempre por la margen derecha del río Yerbabuenayocc, con pendiente en ascenso, sobre un terreno más estable y topográficamente más favorable, hasta tocar su punto final en la localidad de Ccano, a una altitud de 2 617 m.s.n.m., en el empalme PE-28 B, ruta principal de penetración hacia el valle de los ríos Apurímac, Ene y Mantaro

La longitud total del tramo en estudio es de 54.516 km. Las distancias parciales y acumuladas de puntos notables se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 2. Cuadro de distancias entre localidades y puntos notables de la vía

Tramo	Distancia	
	Parcial	Acumulada
Cumbre Saccsahuillca – Uchuraccay	6.850	6.850
Uchuraccay – Cunya	6.540	13.390
Cunya – Abra Pucaccasa	3.998	17.388
Abra Pucaccasa – Huaynacancha	4.106	21.494
Huaynacancha – Carhuahurán	8.032	29.526
Carhuahurán – Llaccllán	4.191	33.717
Llaccllán – Pampalca	4.782	38.499
Pampalca – Yanarumi	4.364	42.863
Yanarumi – Chuyas	2.523	45.386
Chuyas – Yahuayocc	6.842	52.228
Yahuayocc – Ccano	2.288	54.516

4.4 ENFOQUE TEÓRICO

4.4.1 Propiedades físicas del agua que definen la relación suelo-agua

El efecto combinado de las propiedades del agua, la cohesión, la adhesión, la tensión superficial y la capilaridad, crea fuerzas que mantienen unidas las partículas del suelo, lo que repercute en la estabilidad estructural del afirmado.

Cohesión

La propiedad de la cohesión tiene su origen en el comportamiento dipolar de las moléculas de agua, al poseer éstas carga parcial positiva (δ^+) por el lado de los dos átomos de hidrógeno y carga parcial negativa (δ^-) en el lado del átomo de oxígeno.

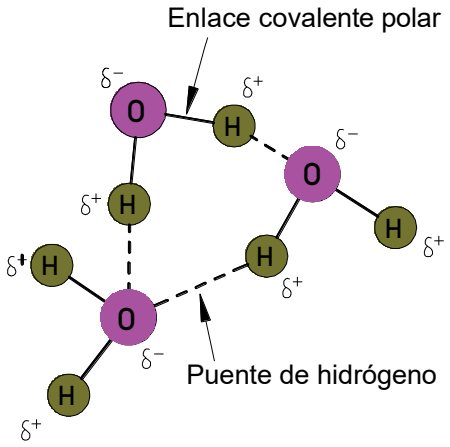


Figura 3. Puente de hidrógeno intermolecular del agua
(Fuente: Khan Academy)

Se enuncia como parcial porque no son cargas iónicas completas, +1 o -1, sino solo una fracción de la carga de un electrón. En la interacción, los electrones no se transfieren completamente, sólo se manifiestan en una nube de carga electrónica desigualmente distribuida. El átomo de oxígeno de una molécula de agua, caracterizado por su alta electronegatividad, atrae fuertemente al electrón del hidrógeno al que está unido covalentemente. Este mismo hidrógeno carente de un escudo de capas electrónicas internas como sí lo tienen los demás átomos, deja expuesta o «desnuda» la carga positiva de su único protón, siendo atraído simultáneamente hacia un segundo átomo de oxígeno de otra molécula de agua. Así, el hidrógeno se posiciona entre dos átomos de oxígeno, creando un enlace entre ellos, conocido como «puente de hidrógeno», responsable de mantener unidas las moléculas de agua entre sí. El enlace puente de hidrógeno no es de

naturaleza permanente, de hecho, sigue un ciclo que tiene una duración del orden de 10^{-12} s, tiempo que tarda el enlace en formarse, romperse y volver a formarse, en una secuencia indefinida de intermitencia.

Adhesión

La adhesión es una consecuencia de la interacción entre las moléculas de agua y las moléculas o iones presentes en la superficie de las partículas del suelo.

Las moléculas de agua, merced a su configuración polar como consecuencia de la distribución desigual de cargas eléctricas, no solo tienen capacidad para formar puentes de hidrógeno entre sí, sino también lo hacen con otro género de moléculas presentes en la superficie de las partículas del suelo. Los átomos de hidrógeno del agua forman puentes con átomos electronegativos de las partículas, y en el mismo sentido, el átomo de oxígeno forma puentes de hidrógeno con iones o con hidrógenos parcialmente positivos presentes en las partículas. Gracias a esta interacción débil, las moléculas de agua se adhieren fuertemente a superficies que también presentan polaridad o que presentan cargas iónicas, caso típico de los minerales del suelo como las arcillas que tienen cargas superficiales negativas, o los óxidos que pueden tener cargas variables.

Además de los puentes de hidrógeno, intervienen en la propiedad de adhesión otras fuerzas intermoleculares débiles como las fuerzas de Van der Waals, o interacciones ión-dipolo, propias de la naturaleza química de la superficie.

Aun cuando la cohesión y adhesión son propiedades distintas, están íntimamente relacionadas por su origen común -ambas propiedades son consecuencia directa de la polaridad de la molécula de agua, y tienen capacidad para formar enlaces puente de hidrógeno- y a menudo actúan en conjunto, como en el fenómeno de la capilaridad.

En una relación comparativa, la cohesión es la atracción agua-agua y la adhesión es la atracción agua-sustancia X. Ampliando el eslabón, de la cohesión se diría que es atracción agua-agua-agua, y de la adhesión, atracción sustancia X-agua-sustancia X.

Capilaridad

En los poros del suelo el agua sube por acción capilar, fenómeno gobernado por la tensión superficial y por el valor de la relación de adhesión entre el líquido y la partícula a la cohesión del líquido. El agua moja la superficie de un material porque la adhesión de las moléculas de agua a las paredes del material es más fuerte que la cohesión entre las moléculas de agua. Dicho de otro modo, un líquido que moja al sólido tiene mayor adhesión que cohesión. Así, las moléculas de agua en contacto con la pared del poro del suelo son atraídas en todas las direcciones, por adhesión. A medida que estas moléculas ascienden, jalan a las moléculas de agua debajo de ellas por cohesión, formando una columna continua de agua. Este proceso continúa hasta que el peso de la columna de agua equilibra las fuerzas de adhesión y cohesión.

Tensión superficial

A diferencia de lo que sucede en la superficie de una masa líquida, en el interior, cada molécula de agua está completamente rodeada por otras moléculas de agua. Debido a la cohesión que los puentes de hidrógeno proporcionan, una molécula en el interior del líquido es atraída en todas direcciones por sus vecinas. Estas fuerzas de atracción se cancelan mutuamente, resultando en una fuerza neta sobre la molécula que es esencialmente cero. Tanto la molécula como la masa líquida están en un estado de equilibrio de fuerzas eléctricas.

En la superficie del líquido, propiamente en la interfaz líquido-aire, las moléculas de agua no están completamente rodeadas por otras moléculas de agua. Si bien, por debajo y por los lados son atraídas por moléculas de agua vecinas debido a la cohesión, por encima de ellas solo hay moléculas de aire o vapor de agua, con las cuales las fuerzas de atracción son mucho más débiles o casi inexistentes en comparación con las atracciones fuertes entre las propias moléculas de agua, lo cual crea un desequilibrio de fuerzas, dando lugar a que las moléculas de la superficie experimentan una fuerza neta de atracción que las «jala» hacia la masa del líquido.

Debido a esta fuerza neta hacia el interior, el líquido tiende a minimizar su área superficial. Si imaginamos la superficie del agua como una membrana tensa que siempre intenta contraerse elásticamente hasta alcanzar su mínima superficie posible, esa tensión de contracción es lo que se conoce como tensión superficial, y es la responsable de la forma esférica que toma una gota de agua.

La tensión superficial, como propiedad interfacial de las superficies líquidas, es la responsable de la energía cohesiva de una interfaz, lo cual influye en las características físicas de los suelos.

Por acción de la tensión superficial aumenta la presión dentro de una gota de agua o dentro de un chorro líquido. En una gota esférica de radio r, la presión p necesaria para equilibrar la fuerza debida a la tensión superficial σ está dada por:

$$\boldsymbol{p = \frac{2\sigma}{r}} \qquad (1)$$

ecuación que revela que la presión es mayor cuanto menor es el radio de la gota.

La tensión superficial es causa de que el líquido se eleve dentro de un pequeño tubo vertical que se sumerja parcialmente en él. Para líquidos que no mojen al sólido, la tensión superficial tiende a hacer descender el menisco en el tubo.

4.4.2 Mecanismos de acción en la matriz del suelo

Adhesión a las partículas sólidas

Las partículas del suelo tienen superficies eléctricamente activas, cargadas negativamente en el caso de la arcilla por presencia de minerales portadores de estas cargas en su composición. Grupos funcionales como el hidroxilo (-OH) están presentes también en algunos minerales de la arcilla y en la materia orgánica. El agua, debido a su polaridad molecular es fuertemente atraída por estas superficies, y por el mecanismo de enlaces puente de hidrógeno forma una película adsorbida que puede variar en grosor desde unas pocas moléculas hasta varias capas, dependiendo de la humedad del suelo y de la naturaleza de la partícula.

Succión capilar

En la Fig. 4a se observa el espacio intersticial del suelo, donde el agua llena parcialmente los poros (p) formando meniscos cóncavos (m). La tensión superficial en estos meniscos crea una presión negativa o de succión en los poros, denominada fuerza capilar ψ_m, responsable de mantener unidas las partículas del suelo (s), retener el agua del suelo, y de que éste se mueva dentro del suelo venciendo la fuerza de la gravedad. Cuanto más diminutos sean los poros capilares, característica de suelos finos como arcillas y limos, y menor el contenido de humedad que hace que los meniscos sean más curvos, mayor será la fuerza de succión dando impulso al agua en su movimiento intersticial. En otro efecto, las

partículas del suelo fino estarán ligadas más firmemente entre sí y a partículas de mayor tamaño.

Efecto en caminos afirmados

En un afirmado, esta película de agua y las fuerzas capilares mantienen los finos ligados a los agregados más grandes proporcionando estabilidad a la masa. Cuando un afirmado se seca demasiado, los meniscos se rompen, la succión desaparece, y el material pierde su cohesión, volviéndose propenso al deterioro por el tráfico.

La acción cohesiva de la película de agua proporciona resistencia y estabilidad a los suelos no saturados. Por ello es posible construir un castillo de arena con arena húmeda, pero no con arena seca, donde no hay meniscos ni puentes líquidos; tampoco con arena saturada, donde los poros están llenos de agua y la succión es nula.

Este conjunto de fenómenos nos permite entender cómo las propiedades microscópicas del agua, como polaridad y puentes de hidrógeno, se manifiestan macroscópicamente proporcionando cualidades específicas al suelo.

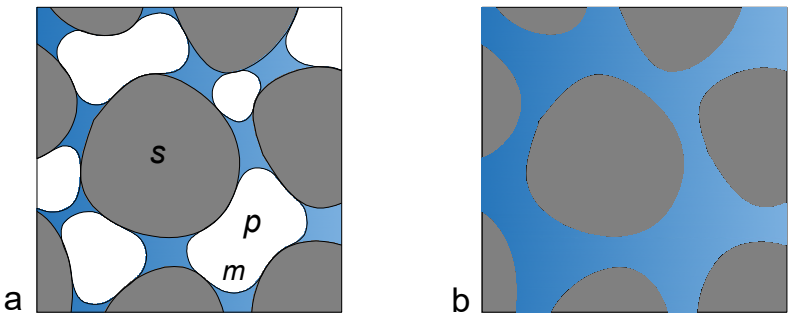


Figura 4. Contenido de agua en el suelo
a) Suelo no saturado
b) Suelo saturado

4.4.3 Flujo de agua en el suelo – Ley de Darcy

El flujo de agua en el suelo está gobernado por el contenido de agua presente en la matriz, según el cual puede presentarse en dos estados sensiblemente diferenciados: no saturado y saturado.

En el cuadro que sigue se describe las diferencias más saltantes entre uno y otro estado, lo que ayudará a discernir *prima facie* cuando se haga referencia a estos estados a lo largo del estudio.

Suelo no saturado:	**Suelo saturado:**
Ocurre sobre el nivel freático	Ocurre dentro de la capa freática
Los poros contienen agua y aire	Los poros están llenos de agua
Presentan tres fases: agua, aire y partículas	Presentan dos fases: agua y partículas
Contenido de humedad inferior a la porosidad	Contenido de humedad igual a la porosidad
Presión hidráulica menor que la atmosférica	Presión hidráulica mayor que la atmosférica
Carga hidráulica se mide con tensiómetro	Carga hidráulica se mide con piezómetro
Conductividad hidráulica variable	Conductividad hidráulica constante
Potencial de matriz negativo (succión)	Potencial de matriz nulo

El flujo de agua en un medio poroso es gobernado por la ley de Darcy, que se puede representar en términos de caudal por la siguiente expresión:

$$\boldsymbol{Q = -KiA} \qquad (2)$$

donde

$\boldsymbol{Q}$ es el caudal que fluye a través de una sección del suelo $\boldsymbol{A}$.

$\boldsymbol{K}$ es el coeficiente de permeabilidad

$\boldsymbol{i}$ es el gradiente hidráulico

El gradiente hidráulico $\boldsymbol{i}$ está dado por:

$$\boldsymbol{i = \frac{h_2 - h_1}{L} = \frac{\Delta h}{L}}$$

donde

$\Delta\boldsymbol{h}$ es la diferencia en la carga o nivel piezométrico entre dos puntos

$\boldsymbol{L}$ es la distancia horizontal o la longitud entre estos dos puntos.

En atención a la fórmula, el gradiente hidráulico $\boldsymbol{i}$ es la relación entre la diferencia de carga hidráulica $\Delta\boldsymbol{h}$ y la longitud $\boldsymbol{L}$, a lo largo de la cual discurre el agua a través de los poros del suelo. Representa la pérdida de carga por unidad de longitud, impulsando el movimiento desde una zona de mayor potencial (o energía, o carga, o presión) a una de menor potencial. El signo negativo en la ecuación de descarga

da cuenta del sentido del flujo, de mayor a menor potencial. Al ser $\boldsymbol{h_2}$ o la altura piezométrica final menor que $\boldsymbol{h_1}$, $\Delta \boldsymbol{h}$ resultará negativo, cancelándose con el negativo de la fórmula para dar valor positivo.

El coeficiente de permeabilidad del suelo $\boldsymbol{K}$, es una medida de la facilidad con que el agua puede fluir a través del suelo.

Obsérvese que al ser $\boldsymbol{i}$ adimensional, $\boldsymbol{K}$ toma unidades de velocidad.

Aunque está estrechamente relacionada con la porosidad del suelo, factores como la forma de los poros, las características físicas del suelo, la viscosidad del agua y la forma de interacción entre éstos influyen significativamente en la permeabilidad. En general, suelos con poros más grandes como las arenas, tienen un coeficiente de permeabilidad mayor y son más permeables, mientras que los suelos con partículas pequeñas y compactas como las arcillas, son menos permeables.

Por estar asociada a características intrínsecas del suelo y a las del fluido, la permeabilidad es una propiedad muy sensible. La presencia de grietas, discontinuidades y estratificación aumentan la complejidad para cuantificar de forma precisa el valor de $\boldsymbol{K}$, especialmente en suelos heterogéneos.

Existen diversos métodos para determinar la permeabilidad de un suelo, que se enlistan sólo con fines referenciales:

Métodos directos:

- Ensayo de laboratorio
- Permeámetro de carga constante
- Permeámetro de carga variable
- Ensayo de campo
- Ensayos de pozos
- Evaluación visual y ensayos sencillos

Métodos indirectos

- Cálculo a partir de la curva granulométrica
- Cálculo a partir de la curva de consolidación
- Prueba horizontal de capilaridad

Según ley de Darcy, la velocidad del flujo y la cantidad de descarga a través del medio poroso son directamente proporcionales al gradiente hidráulico; es decir, debe darse una relación lineal entre la velocidad del flujo y el gradiente hidráulico, linealidad que se mantendrá solo bajo un régimen de flujo laminar. La ley deja de ser válida cuando las velocidades del flujo son elevadas y el régimen se torna turbulento.

Limitaciones de la ley de Darcy

La ley de Darcy no es universal; de hecho, sólo es aplicable en un estrecho rango de situaciones específicas. Sus limitaciones se pueden resumir en los siguientes cuatro argumentos:

- Es válida para flujos de baja velocidad, en el rango del flujo laminar. En regímenes turbulentos, con mayor velocidad del flujo, se rompe la relación lineal entre velocidad y gradiente hidráulico, invalidando la ley.
- Es válida para medios homogéneos e isótropos, entendido estos como la distribución uniforme de partículas y preservación de sus propiedades mecánicas en todas las direcciones.
- La ley es aplicable en suelos saturados, con el fluido ocupando todo el espacio poroso; en suelos insaturados, la ley no tiene aplicabilidad.
- En suelos de grano muy fino como son los cohesivos de baja permeabilidad, existen fuerzas de interacción electroquímica que ofrecen resistencia al flujo en magnitudes mayores a la fuerza de impulsión de un gradiente Darciano. Las partículas de arcilla cargadas eléctricamente debido a iones adsorbidos en su superficie y a otras fuerzas débiles intermoleculares, se recubren, igualmente por adsorción, de una capa de agua tan extensa como el área superficial de los granos -recuérdese que los granos finos, ocupando un mismo volumen, rinden en conjunto mayor área superficial que los gruesos-, agua atrapada que no se mueve con la misma facilidad con que lo haría en un ambiente libre de estas fuerzas. Esta agua adsorbida reduce el área efectiva del conducto disponible para el flujo, y si a ello se suma la pérdida de carga por fricción, el flujo encuentra una resistencia que termina por inmovilizarlo; por ello, estos suelos requieren un gradiente extra, no Darciano, para alcanzar el umbral mínimo y activar el flujo.

Los suelos que forman parte de las capas de estructuras de pavimentos viales se presentan necesariamente en uno de sus dos estados. Las estructuras del afirmado

y las capas de base, subbase y subrasante en carreteras pavimentadas, tanto en el proceso constructivo como en la fase operativa, exigen suelos en su estado no saturado, develando aquí su importancia para garantizar la trabajabilidad, eficiencia y durabilidad de la obra. No obstante, igual importancia se adjudican los suelos en su estado de saturación, condición desfavorable que deviene en el deterioro acelerado de las estructuras y en el encarecimiento de costos del proyecto por la necesidad de implementar obras de drenaje para la evacuación de las aguas superabundantes.

Y según se desprende del análisis hasta aquí abordado, la ley de Darcy opera con efectividad en suelos saturados, en tanto, su aplicabilidad encuentra una valla en suelos no saturados.

4.4.4 Ley de Darcy-Buckingham

Fue el físico Buckingham, quien décadas después del periodo Darciano definió el flujo en suelo no saturado como una función de un gradiente de atracción y una constante de proporcionalidad, denominada «conductividad capilar», basado en dos supuestos principales.

i. La fuerza impulsora del flujo de agua en un suelo no saturado es el gradiente entre dos puntos, de la combinación de potenciales de matriz $\boldsymbol{\psi}$ y gravitacional $\boldsymbol{z}$; es decir, $\boldsymbol{h} = \boldsymbol{\psi} + \boldsymbol{z}$.
ii. La conductividad hidráulica de un suelo no saturado es una función del contenido de agua $\boldsymbol{\theta}$ o del potencial de matriz $\boldsymbol{\psi}$.

El enfoque de Buckingham considera que los procesos de infiltración vertical responden a una combinación de gravedad y capilaridad, y que la infiltración horizontal es impulsada exclusivamente por capilaridad. Estas ecuaciones, denominadas ecuaciones de Darcy-Buckingham son:

$\boldsymbol{q} = -\boldsymbol{K}(\boldsymbol{\psi})(\boldsymbol{\nabla\psi} + \mathbf{1}) = -\boldsymbol{K}(\boldsymbol{\theta})(\boldsymbol{\nabla\psi} + \mathbf{1})$ para flujo vertical
$\boldsymbol{q} = -\boldsymbol{K}(\boldsymbol{\psi})(\boldsymbol{\nabla\psi}) = -\boldsymbol{K}(\boldsymbol{\theta})(\boldsymbol{\nabla\psi})$ para flujo horizontal (3)

donde
$\boldsymbol{\nabla\psi}$ es el gradiente hidráulico de matriz
$\boldsymbol{K}(\boldsymbol{\psi})$ es la conductividad hidráulica, dependiente del potencial de matriz $\boldsymbol{\psi}$

$\boldsymbol{K}(\boldsymbol{\theta})$ es la conductividad hidráulica, dependiente del contenido volumétrico de agua presente en el suelo $\boldsymbol{\theta}$.

Las dimensiones de $\boldsymbol{\psi}$ y $\boldsymbol{\theta}$ son L y L^3L^{-3}, respectivamente; y de $\boldsymbol{\nabla\psi}$ y $\boldsymbol{K}(\boldsymbol{\psi})$ similar a $\boldsymbol{K}(\boldsymbol{\theta})$ son LL^{-1} y LT^{-1}, respectivamente.

A diferencia de la ecuación Darciana, estas ecuaciones son igualmente válidas para zonas no saturadas $(\boldsymbol{\psi} < \mathbf{0})$ y saturadas $(\boldsymbol{\psi} > \mathbf{0})$. La Ley de Darcy es de franca aplicación para determinar el flujo a través de un suelo saturado, porque su coeficiente de permeabilidad es definido. Sin embargo, la ley de Darcy-Buckingham no puede aplicarse de manera directa para determinar el flujo a través de un suelo no saturado, porque la conductividad hidráulica $\boldsymbol{K}$ varía con el contenido de agua y con el potencial de matriz.

Abordar un estudio a profundidad de esta ley escapa de los alcances del presente estudio; por otra parte, su omisión resultaría injusta tratándose de un principio elemental que explica un fenómeno tan importante de la física de suelos, vinculada esta vez, a la ingeniería de caminos. Se considera pertinente enunciar aspectos de mayor importancia que ayuden a interpretar cabalmente los fenómenos hidrodinámicos que tienen lugar en la matriz de las diversas capas de la estructura de pavimentos, que se entrega en los siguientes apartados.

(1) En suelo no saturado, la conductividad hidráulica $\boldsymbol{K}$ varía drásticamente con el contenido de agua. Por ejemplo, si la conductividad hidráulica de un determinado tipo de suelo es de 15 cm/h ante un contenido de agua de 0.30 cm3/cm3, esta conductividad cae a 1 cm/h cuando el contenido de agua disminuye a 0.20 cm3/cm3. La causa de esta sensibilidad al contenido de agua está relacionada con la capilaridad de los poros del suelo, la adhesión del agua a las partículas del suelo y la tensión superficial, cuya interacción queda explicada en los siguientes términos: (a) en razón a que los poros de menor diámetro, que por su capacidad de generar tensión superficial más alta atraen y retienen agua con mayor fuerza que los de diámetro mayor, el agua asciende con mayor facilidad a través de estos poros más pequeños, hasta que la fuerza de la tensión superficial se equilibra con el peso de la columna líquida; (b) simétricamente, cuando disminuye el contenido de agua del suelo, ésta drena primero por los poros más grandes, seguida progresivamente de los poros de diámetros menores, hasta que una fracción queda retenida en conductos

capilares más diminutos, en un estado en que, nuevamente, la tensión superficial se equilibra con el peso de la columna líquida.

(2) El potencial de matriz ψ_m representa la fuerza con que el agua se adhiere a las partículas del suelo en un suelo no saturado, cuya causa es la unión del agua a las partículas del suelo por adsorción y capilaridad, lo cual es más relevante cuando los poros contienen agua y aire. Este potencial, dada su naturaleza negativa o de succión, impide que el agua se mueva libremente en el suelo, y representa la energía que se necesitaría para extraerla. En suelos saturados, donde los poros están llenos de agua, el potencial de matriz se halla próximo a cero y no tiene la influencia dominante. Mientras en suelos no saturados el potencial de matriz atrapa el agua en el suelo, en suelos saturados, el movimiento del agua está gobernado por la gravedad y la presión hidrostática.

4.4.5 Histéresis en el contenido de agua en el suelo

El contenido de agua y el potencial de matriz no están relacionados de forma única, porque la cantidad de agua presente a una magnitud dada de potencial de matriz, depende de la distribución del tamaño de poros y de las propiedades de la interfaz aire-agua-sólido. Se puede obtener una relación de potencial de matriz contra contenido de agua del suelo por dos vías: (1) tomando una muestra inicialmente saturada y aplicando algún mecanismo de desaturación (desorción), o (2) humedeciendo gradualmente un suelo inicialmente seco (sorción). Estas dos vías dan lugar a curvas no idénticas. Para un potencial de matriz dado, el contenido de agua del suelo durante la desorción o pérdida de agua, es mayor que en la sorción o rehidratación (Fig. 5). este fenómeno se denomina histéresis, que describe un sistema en el que la reacción a los cambios depende de sus reacciones previas al cambio.

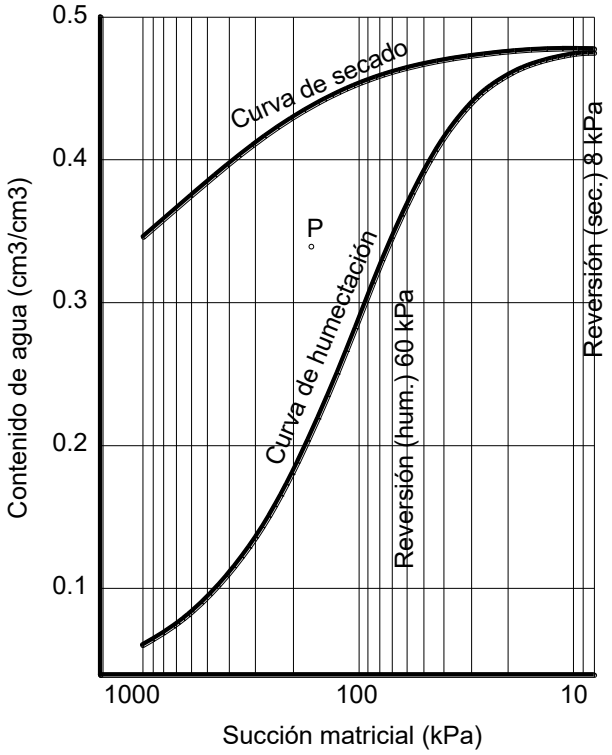


Figura 5. Histéresis en la curva de retención de agua

A menudo, la literatura científica proporciona una explicación al fenómeno centrando su atención en la microestructura del suelo, capturando todos los elementos que intervienen en el proceso, representados en modelos ilustrativos simplificados, si bien, necesarios para impartir entendimiento, distantes, no obstante, de representar en su dimensión aproximada los fenómenos físicos que tienen lugar en la matriz del suelo. El investigador encuentra una gran complejidad que parte de la distribución del tamaño de poros y de las partículas sólidas, configurando en conjunto una extraordinaria maraña de conductos capilares en constante cambio de tamaño y dirección, modelados por fuerzas de cohesión, adhesión, adsorción, tensión superficial, ascensión capilar, cambios de humedad, temperatura, etc., actuando todos ellos en conjunto, lo que hace difícil desentrañar los misterios que encierra esta parte de la física de suelos. En el presente estudio se vierte una noción germinal de la histéresis en términos de entropía, como un accesorio de ayuda a la interpretación de la complejidad descrita.

4.4.6 Histéresis y entropía en el suelo

La histéresis ocurre porque la energía requerida para retener el agua del suelo difiere entre los procesos de secado y rehidratación, implicando ello diferentes

estados energéticos y configuraciones del agua adsorbida en las partículas del suelo, lo cual está relacionado con cambios en la entropía.

La curva de retención de agua del suelo da cuenta de que, para un mismo nivel energético, el contenido de humedad del suelo es mayor durante el secado y menor en la rehidratación. También se puede relacionar a contramano: Bajo un mismo contenido de agua del suelo, éste se retiene con diferentes niveles energéticos durante el secado y la rehidratación. Así, la histéresis refleja cómo la energía de retención cambia con la dirección del proceso, de secado a rehidratación y viceversa.

En el plano de la histéresis, la entropía describe el grado de desorden o la cantidad de configuraciones moleculares dables para el agua.

Cuando el agua se retiene fuertemente en películas delgadas sobre las partículas del suelo por adsorción o por capilaridad, sus estados moleculares quedan más restringidos.

En la dirección de suelo húmedo al desecamiento, el agua es liberada de las superficies de las partículas, lo que se traduce en la liberación de sus moléculas, de las restricciones entrópicas, ganando libertad de movimiento. En la dirección de suelo seco a humectación, el agua es adsorbida nuevamente y su movilidad se restringe, lo que conduce a una menor entropía en comparación con su estado libre.

La diferencia en el mecanismo de retención que da lugar a la histéresis se debe a las diferencias en la entropía de los estados del agua en las distintas etapas del ciclo. El agua en su estado más libre o de mayor entropía será liberada o se adsorberá con una energía diferente que el agua en su estado más restringido o de menor entropía.

Así, el concepto de retención de agua del suelo queda definido por los niveles energéticos de la relación-suelo en sus estados estables y transicionales. En un ejemplo de este enfoque, para un punto intermedio P (Fig. 5) ubicado entre las dos curvas de retención de agua, las explicaciones que se vierten desde el punto de vista mecánico de la física de suelos son abstrusas hasta cierto punto; pero sí resultaría más inteligible una representación basada en niveles energéticos y

entrópicos, pues ese punto debe ser sede de alguna entidad energética asociada a la relación agua-suelo.

4.4.7 Anisotropía del afirmado y su relación con la deformación

La anisotropía del afirmado confiere a la matriz capacidades de absorción de agua disparejas, creando zonas blandas por humedecimiento, las que darán lugar a depresiones inicialmente imperceptibles con capacidad de atrapar agua, siendo un mecanismo principal de deformación por formación de hoyos en carreteras de baja pendiente.

Una matriz de afirmado no suele adquirir una composición isotrópica. Aun cuando en el proceso constructivo se busca integrar los componentes para lograr una distribución homogénea de partículas, la composición heterogénea y las propiedades mecánicas distintivas de cada fase le confieren anisotropía en las direcciones horizontal y vertical, en cuantías distintas una de la otra. La compactación por rodillo vibratorio, de uso generalizado en nuestro medio, no contribuye a la integración uniforme de partículas en la matriz. La vibración induce ondas de compresión y esfuerzos de corte en el suelo, lo que ayuda a reacomodar las partículas y a reducir los vacíos, aumentando la densidad. Sin embargo, estas ondas no se propagan de manera uniforme, lo que lleva a variaciones en la presión.

El rodillo vibratorio no ejerce una presión uniforme en la compactación. Toma un valor máximo en el punto de contacto con el suelo y decrece conforme aumenta la profundidad. Cuando el rodillo inicia la compactación de una capa, el área de contacto inicial es ancha y se forma un bulbo de presión de una cierta profundidad, y conforme va progresando la compactación, el área de contacto se reduce, con lo cual también se reduce la profundidad del bulbo de presión y aumentan los esfuerzos de compresión en la cercanía de la superficie (Fig. 6).

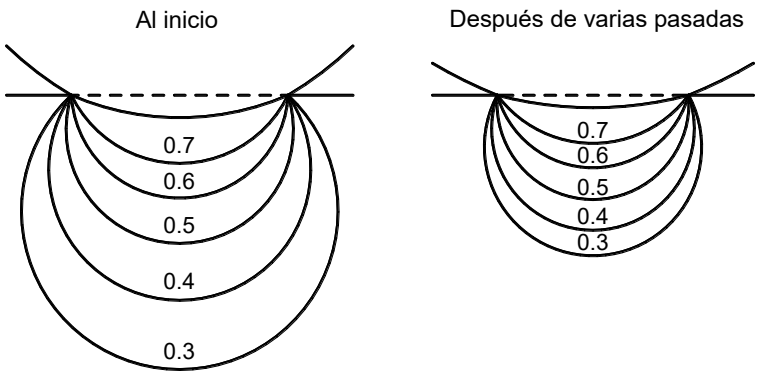


Figura 6. Bulbos de presión bajo acción de rodillo mecánico

Con una densidad incrementada en los estratos inferiores y variante en el sentido horizontal, la capa de afirmado adquiere diferentes propiedades mecánicas en estas direcciones.

En otro efecto, el rodillo no tiene capacidad de dejar un acabado superficial terso, ya que en cada pasada origina depresiones por acción de la presión dinámica, los cuales se constituirán en cuencos para atrapar agua. Asimismo, debido a que la rigidez de la rueda las puentea, el rodillo deja áreas de baja compactación, las cuales conducirán al humedecimiento disparejo de la matriz del firme.

4.5 GEOMETRÍA VERTICAL DEL PROYECTO VIAL Y SU RELACIÓN CON LAS DEFORMACIONES OBSERVADAS EN CAMPO

4.5.1 Introducción

El estudio está orientado a demostrar la influencia de la geometría vertical de una vía en el desgaste de la estructura del pavimento, sobre cuya base, en la Sección 4.7 se analizará los mecanismos de deformación, tomando la pendiente longitudinal como variable de interés.

Asimismo, esta sección constituye la base para la interpretación de las deformaciones observadas en campo, detalladas en los ítems (1), (3) y (5) de la Sección 2.2, en las que se centra el estudio.

4.5.2 Tipificación de pendiente vial por su desempeño hidráulico

La pendiente de la vía juega un papel preponderante en el deterioro del pavimento en todas sus formas, y con mayor intensidad en carreteras afirmadas, al carecer éstas de un manto impermeable que lo proteja.

No existe en el bagaje ingenieril una tipificación de la pendiente en función a su desempeño hidráulico, factor determinante en la respuesta a la deformación. Para fines del presente estudio se establece la siguiente clasificación.

Tabla 3. Tipología de pendiente según desempeño hidráulico

Tipo de pendiente según su desempeño hidráulico	Valor (%)	Cualificación
1. Hidráulicamente erosivo	8.1 a más	Pendiente elevada
2. Hidráulicamente eficiente	2.6 – 8.0	Pendiente óptima
3. Hidráulicamente no-drenante	0 - 2.5	Baja pendiente

4.5.3 Deformación en carreteras de pendiente hidráulicamente erosivo

En la región sierra es frecuente encontrar pendientes mayores de 8.1%, las cuales, aunque se consideran antirreglamentarias, tienen aceptación discreta, justificada en la evolución de la mecánica vehicular entre la década del 50 del pasado siglo al día de hoy, data que corresponde a la normativa de diseño geométrico de carreteras imperante hasta el día de hoy.

En las últimas décadas la evolución de la mecánica vehicular se ha centrado en tres cambios elementales: (a) los modernos sistemas de inyección electrónica de combustible y turbocompresores de que están dotados los motores diésel, optimizan la combustión, de manera diferente a los motores atmosféricos de tamaño similar, proporcionando mayor potencia y torque a bajas revoluciones, lo que les permite superar la resistencia de la gravedad en pendientes pronunciadas mientras mantienen la misma velocidad; (b) los camiones de carga modernos cuentan con 18 marchas o más, lo cual permite seleccionar la marcha más adecuada para mantener el motor en su rango de revoluciones operacional tanto en ascensos como en descensos, con un sistema de transmisiones automatizadas que utilizan sensores y computadoras para cambiar la marcha de manera más rápida y precisa; y (c) para el descenso, los camiones modernos utilizan sistemas de frenado auxiliar como los frenos de motor y los retardadores electromagnéticos o hidrodinámicos, liberando la carga sobre los frenos de servicio bajo un control más seguro del vehículo.

Estos avances han llevado a los diseñadores de carreteras a franquear las pendientes elevadas; como resultado, lo que antes era «excepcional» ahora se considera normal.

En superficies de rodadura muy inclinadas, el flujo de lámina de agua que se entabla en la superficie del firme, en muy corta distancia toma el régimen turbulento para concentrarse en arroyos cada vez más crecientes, adquiriendo mayor fuerza tractiva y capacidad arrastre que intensifica la formación de surcos longitudinales por erosión, destruyendo la estructura del afirmado.

Aunque estas pendientes generalmente se limitan a distancias relativamente cortas, un deterioro severo por erosión hídrica puede tener lugar en una estación pluviosa, incluso durante una única tormenta de elevada intensidad.

Una característica que resalta en estas carreteras es el ensanchamiento excesivo de las cunetas ocasionadas por erosión de sus taludes debido a la alta velocidad del flujo, que llegan a socavar los bordes de la superficie de rodadura recortando el ancho de plataforma.

4.5.4 Deformaciones en carreteras de pendiente hidráulicamente eficiente

Ante un evento de precipitación sobre una superficie dotada de pendientes longitudinal y transversal apropiadas, la mayor parte de la escorrentía es drenada superficialmente, minimizando el tiempo que tiene el agua para amerarse en la matriz del afirmado. Sólo una pequeña fracción logra infiltrarse formando un manto húmedo. Una vez dentro, asumiendo que el material del firme tiene una permeabilidad apropiada, la pendiente ayuda a entablar un gradiente hidráulico interno (véase Secciones 4.4.3 y 4.4.4), obligando al agua a moverse en la dirección del gradiente. De este modo, al disponer de poco tiempo de permanencia en la matriz del afirmado, su efecto degradante es atenuado.

Un valor medio de coeficiente de infiltración de 5.0 cm/h del afirmado, a la vez de favorecer el drenaje, limita la infiltración hacia capas más inferiores; de ahí que un material de afirmado no debe ser demasiado permeable ni demasiado impermeable.

Cuando las condiciones de drenaje son adecuadas, no tiene lugar el estancamiento de aguas nocibles y el material ligante conserva su humedad característica. En este

estado, los finos se constituyen en aglomerantes efectivos, proporcionando la cohesión necesaria para mantener unidas las partículas gruesas como arenas y gravas, todo lo cual deviene en el mejoramiento de la resistencia al corte. Una escasa humedad de la matriz del afirmado no da lugar a deformaciones plásticas localizadas, no hay ablandamiento, y la capacidad de soporte se mantiene incólume. Un afirmado relativamente seco conserva su capacidad portante y su rigidez. Por el contrario, ante un exceso de humedad los finos se ablandan perdiendo su capacidad ligante y dando pie a la desestabilización de la estructura del afirmado.

Ante una humedad equilibrada de la matriz del afirmado, el tráfico vehicular, en lugar de provocar daño, actúa como un agente de recompactación. Cada pasada de rueda ejerce una presión de impacto que obliga a las partículas a reacomodarse en posiciones más estables, reduciendo el contenido de vacíos. La acción combinada de la humedad apropiada y recompactación fortalece la cohesión interna del afirmado, con el consecuente efecto de evitar la disgregación y pérdida de finos en forma de polvo. El resultado es una consolidación y densificación progresivas del afirmado, con mayor capacidad portante a largo plazo, renovada resistencia a las deformaciones y menor permeabilidad, estableciéndose una suerte de mecanismo de autoconservación.

En conclusión, en tramos de pendiente hidráulicamente eficiente no se dan deformaciones que conduzcan a la pérdida de servicialidad severa ya sea por formación de surcos, por ahuellamiento vertical o por formación de hoyos.

4.5.5 Deformaciones en carreteras de pendiente hidráulicamente no-drenante

El surgimiento de baches en forma de hoyos en tramos carreteros de baja pendiente es un fenómeno complejo que combina la mecánica del suelo, la hidráulica subsuperficial y la interacción rueda-pavimento.

La escasa pendiente acompañada de irregularidades propias de la superficie del firme imparte resistencia al escurrimiento de las aguas pluviales, dando pie al estancamiento. Consecuentemente, el agua que permanece en contacto con la estructura del afirmado emprende la infiltración por gravedad. Un mayor tiempo de exposición y una mayor carga de agua superficial resultarán en un volumen mayor de agua infiltrada.

Una vez en la matriz del afirmado, la escasa pendiente longitudinal depara en el medio un gradiente hidráulico bajo, incluso nulo, lo cual supone incapacidad del agua infiltrada para moverse y escapar de la matriz del afirmado, saturando el material al quedar atrapada en ella.

Un medio saturado, da pie a una reducción drástica de la resistencia y del módulo de elasticidad del material granular, enervando la cohesión y fricción internas que mantienen consolidada la estructura del firme.

4.6 GEOMETRÍA HORIZONTAL DEL PROYECTO VIAL Y SU RELACIÓN CON LAS DEFORMACIONES OBSERVADAS EN CAMPO

4.6.1 Introducción

En el orden de la geometría horizontal, a lo largo del estudio se hace referencia a la tendencia del método de diseño, incluido el de AASHTO ´93, desarrollado sobre secciones de carreteras predominantemente rectilíneas; en consecuencia, el efecto de la linealidad de la carretera sobre las deformaciones está presente palmariamente en la genética del modelo.

Contrariamente, marra en el modelo la cuota de desgaste del afirmado por efecto de la curvatura, que si bien, en el país originario del método no tiene trascendencia debido a su relieve dominada por llanuras, sí cobra importancia en el entorno montañoso de la sierra peruana, donde la traza de los caminos vecinales sigue trayectorias acusadamente anfractuosas.

Este argumento es motivo para analizar la relación que guarda la curvatura de toda carretera con la deformación de la superficie de rodadura, con énfasis en el pavimento granular.

4.6.2 Mecanismo de deformación en curvas

Al enfrentar una curva un vehículo en marcha, necesita de una fuerza horizontal que lo obligue a dar el giro, tirando el vehículo hacia el interior de la curva. En pavimentos rígidos o flexibles, esa fuerza es proporcionada suficientemente por la fricción entre los neumáticos y la superficie sólida, cuya expresión matemática está dada por:

$$\boldsymbol{F_c = \mu N = \frac{mv^2}{R}} \qquad (4)$$

donde

$\boldsymbol{F_c}$ es la fuerza centrípeta

$\boldsymbol{\mu}$ es el coeficiente de fricción de la superficie de rodamiento

$\boldsymbol{N}$ es la fuerza normal

$\boldsymbol{m}$ es la masa del vehículo

$\boldsymbol{v}$ es la velocidad

$\boldsymbol{R}$ es el radio de curva

En pavimentos granulares no ligados, la fricción de por sí es insuficiente para absorber la fuerza centrípeta $\boldsymbol{F_c}$, razón por la que el neumático derrapa lateralmente una cierta distancia, hasta equilibrar el valor de $\boldsymbol{F_c}$. En este caso, la ecuación anterior toma la siguiente forma:

$$\boldsymbol{F_c = (\mu + k_l)N = \frac{mv^2}{R}} \quad (5)$$

donde $\boldsymbol{k_l}$ es un coeficiente que cuantifica la resistencia lateral neumático-afirmado.

En una interpretación física, la parte de F_c lo soporta la fricción adherente neumático-superficie $\boldsymbol{\mu N}$, y la otra parte, $\boldsymbol{k_l N}$, se «gasta» en excavar, cortar y desplazar el lecho granular, acción que lo hace derrapando lateralmente.

En atención a la ecuación dada, se puede advertir que cuanto mayor sea la velocidad del móvil y cuanto menor el radio de curva, mayor será la fuerza de arrastre $\boldsymbol{k_l N}$. Y los móviles que desarrollan mayor velocidad aun en curvas de radio pequeño son los vehículos livianos, que no tienen cuota de participación en el cálculo del ESAL (véase Sección 4.8.1).

El derrape lateral no se produce con la misma intensidad entre uno y otro eje, ni entre neumáticos de un mismo eje. En vehículos de tracción trasera o en situaciones donde la distribución de peso, la velocidad y el ángulo de giro no son los ideales, el eje posterior del vehículo derrapa barriendo una franja mayor.

Aunque en las Secciones 4.8.3 y 4.8.5 se hace un análisis más exhaustivo, conviene señalar que el desgaste en curvas queda fuera de los modelos de diseño de AASHTO y de AUSTROADS, donde los estados de fatiga y fractura fueron evaluados únicamente en la dirección de la carga vertical repetida. La deformación por migración lateral de material en curvas, más que al diseño estructural, ha

quedado relegado a la gestión de mantenimiento. Bajo este criterio, el ahuellamiento reclinado (véase Sección 4.7.2) es aceptado como «desgaste operativo» y no como «falla estructural». No obstante, dada la geografía montañosa que domina la sierra peruana, este vacío metodológico se hace muy notorio, lo cual sugiere introducir ajustes en el diseño dirigidos a controlar el arrastre mediante tratamientos superficiales ligados.

4.6.3 Mecanismo diferencial del vehículo y su relación con el desgaste

La acción del mecanismo diferencial de los vehículos es más perceptible en las curvas de volteo, y como tal, el análisis que acá se aborda sirve de base para comprender el efecto abrasivo de las ruedas que se aborda en la Sección 4.7.5.

Al tomar una curva un vehículo en marcha, para hacer posible el giro es necesario que las ruedas del lado interior de la curva desarrollen un número de revoluciones menor que las ruedas exteriores. Con las ruedas unidas por un eje rígido, esta operación no sería posible, pues las ruedas exteriores estarían forzadas a reptar para recorrer distancia más larga con el mismo número de revoluciones de las ruedas interiores.

El mecanismo que hace posible el giro proporcionado de las ruedas en curvas es el engranaje diferencial, artilugio que hace posible que la rueda interior desarrolle un menor número de revoluciones, al tiempo que las ruedas exteriores desarrollen un número mayor.

Con frecuencia, el diferencial está montado en el eje delantero o trasero del vehículo, con excepción de los de tracción a cuatro ruedas o 4X4, los cuales llevan tres diferenciales: dos en los ejes delantero y trasero, y un diferencial central para transmisión de potencia a los dos diferenciales antedichos.

Los componentes del diferencial y el mecanismo de funcionamiento escapan del propósito del estudio, bastando con lo citado en los párrafos precedentes, que explican la compensación de las revoluciones de las ruedas delantera y trasera para dar el giro sin reptar o arrastrar contra el firme, en su marcha al dar las curvas.

No obstante, esta solución de la mecánica vehicular no asegura su desempeño ideal en curvas. La rueda trasera no es epígono a la delantera, por el contrario, da lugar a un desfase entre las huellas delanteras y traseras que dejan una impronta

en «cuarto de luna» entre el principio de curva y el siguiente principio de tangente, barriendo un ancho más amplio. Esto se explica porque, mientras el conductor, que siempre está posicionado sobre la rueda delantera dirige el par al extremo de su carril, las ruedas traseras recorren «cortando» el camino marcado por las ruedas delanteras, configurando un atajo. En el diseño vial, los sobreanchos en las curvas están ideados para compensar este desfase de las huellas.

4.7 IDENTIFICACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS MECANISMOS DE DEFORMACIÓN DE AFIRMADO OBSERVADOS EN CAMPO

4.7.1 Deformación por ahuellamiento vertical

El ahuellamiento vertical en carreteras afirmadas es un tipo de deformación permanente, que consiste en el hundimiento de la superficie a lo largo de la trayectoria de las ruedas, generando depresiones longitudinales conocidos como roderas. Esta deformación se produce como consecuencia de la presión de carga cíclica vehicular sobre la capa de afirmado con exceso de humedad, o bajo las mismas condiciones del suelo de subrasante.

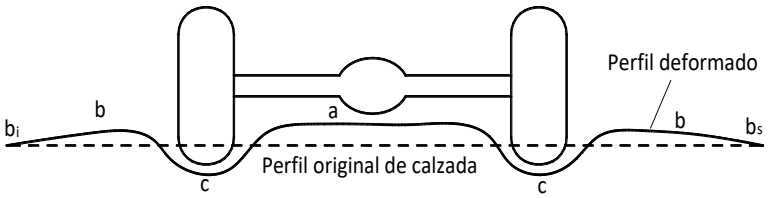


Figura 7. Esquema de ahuellamiento vertical

La Fig. 7 representa el ahuellamiento por hundimiento de la capa de afirmado, cuyo causal puede estar en la misma matriz del afirmado o en la capa de subrasante. El material de la huella o rodera c es desplazado lateralmente hacia a y b, formando gibas en estos puntos.

La cualidad de la subrasante, la composición y calidad del material de afirmado y el procedimiento de compactación constituyen factores primordiales para el control de estas deformaciones. El material que no tiene suficiente cohesión y resistencia o posee una gradación inadecuada, en interacción con la variación de humedad y temperatura se hace más propenso a deformarse restando estabilidad al afirmado. Los surcos formados por ahuellamiento se convierten en colectores de aguas nocibles, formando charcos o corrientes a la deriva si no existen canales de

evacuación. El fondo de la rodera experimenta pérdida de adherencia entre los neumáticos y la superficie de contacto provocando derrapamiento y patinaje, acelerando el proceso de deformación.

Un ahuellamiento vertical severo que llega a comprometer la servicialidad de la vía es consecuencia de un procedimiento constructivo defectuoso, a decir del propio pavimento granular, o de las obras de drenaje; por ello, esta deformación es de carácter controlable. Carreteras afirmadas dotadas de pendiente longitudinal y transversal apropiados, construidas con material de calidad certificada y adecuada compactación, provistos de eficientes sistemas de drenaje, no son proclives a perder su servicialidad a causa del ahuellamiento vertical.

La masa térrea del afirmado no guarda homogeneidad en la distribución de partículas granulares y finas. Hay presencia de tormos de arcilla caóticamente distribuidos en la matriz a la espera de cambios en la humedad para iniciar su deformación. Así, la aparición de concavidades en la superficie de un afirmado durante una tormenta es inevitable, aún sin presencia de carga.

No obstante, bajo condiciones óptimas de diseño y construcción, éstas tienden a autocorregirse, ya que flujos de láminas de agua transportan material de los niveles altos a los más bajos, distribuyéndolas en la superficie con cierta uniformidad, en un fenómeno comparable en pequeña escala, a como sucede con el material erosionado en las cumbres de las montañas que es transportando para formar bancos amplios en los valles. Las leyes naturales imperan por igual a cualquier escala.

Otro factor que hace posible la autocorrección es el factor humano. Ante la presencia de una depresión canalizada por rodera, el conductor no sigue la huella de la rodera, por el contrario, trata de remontar los bordes, lomos y franjas de carretera más practicables. Sea la voluntad o la intuición que lo muevan a tal práctica, al remontar los lomos, la presión del neumático que se concentra en ellos «iguala» la superficie desplazando material plástico a los hoyos. Aun cuando no lo logre en la magnitud que le infiere su intuición, sino en una magnitud mucho menor, la suma de estas magnitudes ante múltiples pasos vehiculares genera un efecto magnificado.

Un niño que juega a hacer carretera procura allanar los desniveles aplicando presión sobre las ruedas y repitiendo esta operación una y otra vez. Al parecer, ese hilo de juicio lúdico infantil de acto reflejo no se pierde con la madurez.

De este modo, cuando el contenido de humedad y la composición del material del afirmado son los apropiados, en el firme se lleva a cabo un proceso de recompactación con cada pasada vehicular, consolidando en gran medida la matriz e incrementando resistencia de la estructura.

En atención a la geometría horizontal, estas deformaciones son propias de tramos rectos, en tanto, en tramos curvos se hallan en combinación con los desplazamientos laterales ocasionadas por fuerzas centrípetas vehiculares.

Estas deformaciones no debieran llevar al colapso con pérdida de servicialidad a una carretera si:

- En el diseño vial se ha ofrecido una geometría vertical favorable al drenaje,
- El CBR de la subrasante cumple con los valores preestablecidos en el diseño,
- En el proceso constructivo se ha observado las pautas de diseño estructural, especificaciones técnicas de los materiales y procedimientos de compactación, y
- La vía cuenta con un sistema de drenaje eficiente

Para estos factores condicionantes está dado precisamente el método de diseño de la NAASRA / AUSTROADS cuyo uso ha sido recomendada por la norma peruana para el diseño de carreteras afirmadas en el país.



Figura 8. Tramos de carretera de pendiente favorable al drenaje

En la Fig. 8 se muestra dos tramos de carretera sin deformaciones significativas tras 8 años de intervención: a) tramo Uchuraccay – Cunya, y b) tramo Huaynacancha – Carhuahurán.

4.7.2 Deformación por ahuellamiento reclinado

El fundamento de este tipo de deformación ha sido analizado con amplitud en la Sección 4.6.2.

En curvas normales, los neumáticos arrastran y proyectan cada cual, material superficial hacia el exterior de la huella curvada. La migración continua del material hacia el exterior da lugar a la formación de gibas de paredes reclinadas y asimétricas, configurando un ahuellamiento oblicuo, distinto al típico ahuellamiento de paredes verticales que se da por hundimiento del pavimento granular o de la subrasante.

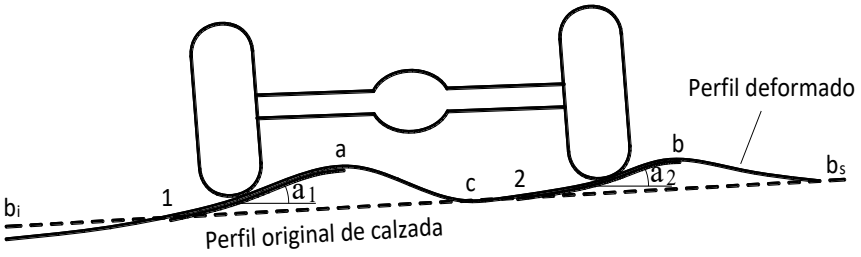


Figura 9. Esquema de ahuellamiento reclinado en curva normal

En la Fig. 9 los puntos a y b son las gibas interior y exterior, respectivamente, y el punto c es la depresión. Cada pasada de ruedas, debido a la baja resistencia a la fricción centrípeta que obliga al neumático a derrapar lateralmente, «barre» hacia el exterior de la curva partículas desprendidas del afirmado, que gracias a su naturaleza cohesiva y humedad favorable se va acumulando en las regiones a y b, estableciendo cierta rigidez. Las franjas $1-a$ y $2-b$ constituyen las roderas; es decir, la franja que preferentemente siguen los neumáticos, caracterizada por fajas de tono claro en la superficie. En condiciones de deformación muy avanzada, el punto c no recibe ruedas de tráfico, debido a que el conductor tiende a evitar que la corona del eje vehicular haga contacto con la giba a. En la práctica, existe la tendencia, por parte del conductor, de remontar las gibas a y b, con lo cual, el ciclo de translocación del firme se perenniza, acumulándose progresivamente en la berma exterior ($b-b_s$).

En un segundo efecto, las ruedas traseras que en su afán de «cortar» la curva derrapan lateralmente y a la vez patinan sobre la superficie inclinada, proyectan detrás las partículas superficiales, en la dirección del eje longitudinal de la rueda, contribuyendo a acrecentar la altura de las gibas o llegando a depositarse en las vertientes $a-c$ y $b-b_s$. Es improbable que estas partículas lleguen a parar en el punto 1 o regiones inferiores a él; por el contrario, el material es arrancado de las proximidades de la cuneta para ser lanzados hacia áreas intermedias de la curva.

Por ello, es frecuente que la berma adyacente a la cuneta interior experimente mayor intensidad de desgaste laminar.

Este mecanismo de desgaste se halla más acentuado en curvas donde la circulación en ambos sentidos se da a través de una misma rodera. Un ligero desfase entre roderas formados en recorridos distintos en uno y otro sentido, tiende a truncar la formación de gibas, compensando los volúmenes de gibas con los de las depresiones.

En el ahuellamiento reclinado, cuando las condiciones de humedad, cargas de tráfico y el peralte convergen favorablemente, el material migrante del firme vuelve a consolidarse en su nueva posición, formando gibas suavizadas de matriz rígida (Fig. 10).



Figura 10. Curva con ahuellamiento suavizado por recompactación
tramo Uchuraccay - Cunya

4.7.3 Deformación por formación de surcos

4.7.3.1 Análisis del origen de la escorrentía superficial sobre el afirmado

Ante un evento de tormenta que se precipita sobre la superficie del afirmado, el fenómeno que domina es el surgimiento de flujo en lámina delgada, no permanente y no uniforme, en razón a que existe aporte de agua de la propia lluvia y a la vez infiltración, ocurriendo simultáneamente.

Las ecuaciones de Saint Venant constituyen una herramienta matemática útil para comprender y modelar el flujo de agua en sistemas a superficie libre, y se adaptan mejor a flujos en láminas delgadas. Consistente en un sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales estructurados sobre la base de los principios de conservación de masa y cantidad de movimiento, permiten modelar las inundaciones que tienen lugar sobre la superficie del afirmado como consecuencia de la precipitación. Sin embargo, dada la complejidad que envuelve su resolución al igual que las demás ecuaciones de su serie, sólo es posible obtener soluciones aproximadas por procedimientos numéricos.

Una forma generalizada de la ecuación de resistencia para flujos de lámina delgada, despreciando variaciones por aporte pluvial y por pérdida por infiltración, está dada por:

$$\boldsymbol{q = \alpha h^m} \tag{6}$$

donde

$\boldsymbol{q}$ es la descarga unitaria sobre la superficie, o lo que es lo mismo, caudal por unidad de ancho,

$\boldsymbol{h}$ es la profundidad de lámina de agua,

$\boldsymbol{\alpha}$ es el coeficiente de resistencia al flujo, que es función de la viscosidad, rugosidad y pendiente, y

$\boldsymbol{m}$ es una constante cuyo valor depende del régimen de flujo y de la ecuación de resistencia utilizada.

Para una lámina cuya profundidad es muy pequeña, la velocidad es baja, en consecuencia, también será bajo el número de Reynolds $\boldsymbol{R_e}$. En este caso, la resistencia es dominada por la viscosidad, y el flujo es estrictamente laminar ($\boldsymbol{R_e < 500}$). Bajo estas condiciones, la ecuación de flujo laminar en lámina delgada se puede expresar como:

$$\boldsymbol{q = \frac{\gamma S_0 h^3}{3\mu}} \tag{7}$$

donde

$\boldsymbol{\gamma}$ es el peso específico del agua

$\boldsymbol{S_0}$ es la pendiente longitudinal de la superficie

$\boldsymbol{\mu}$ es la viscosidad dinámica del agua

En este caso, $\boldsymbol{\alpha = \frac{\gamma S_0}{3\mu}}$, y $\boldsymbol{m = 3}$

Ante una lámina de mayor profundidad, o que discurre sobre una pendiente más pronunciada, la rugosidad del lecho se torna dominante, resultando un $\boldsymbol{R_e}$ alto, dando lugar a un *flujo turbulento* ($\boldsymbol{R_e > 2100}$). En este caso, para la modelación se puede emplear la ecuación de Manning modificada para lámina delgada, donde el radio hidráulico se sustituye por la profundidad, en razón a que, en láminas delgadas, estos valores son aproximadamente iguales.

$$\boldsymbol{q = \frac{1}{n} h^{5/3} S_0^{1/2}} \qquad (8)$$

Aquí, $\boldsymbol{\alpha = \frac{S_0^{1/2}}{n}}$, y $\boldsymbol{m = 5/3}$

Cuando el valor de $\boldsymbol{R_e}$ está en el rango de 500 a 2100, se dice que el flujo está en régimen transicional, de laminar a turbulento.

Para el cálculo de $\boldsymbol{R_e}$ para flujos de lámina delgada, se suele usar la fórmula $\boldsymbol{R_e = q/\nu}$, donde $\boldsymbol{\nu}$ es la viscosidad cinemática del agua.

4.7.3.2 Mecanismo de formación de surcos

Las primeras gotas que se precipitan durante una tormenta, luego de calar y saturar la capa superficial dan lugar a un flujo de escasa profundidad que se mueve en dirección de la pendiente bajo un régimen de flujo laminar, abstracción hecha por cuanto la velocidad es reducida, lo que sugiere un número de Reynolds menor de 500. Bajo este régimen el flujo carece de fuerza tractiva para arrancar y arrastrar material del afirmado. No obstante, el tiempo y la longitud en que subsiste este flujo suelen ser muy cortos, dado que el caudal se incrementa gradualmente por aporte lateral de la propia agua meteórica, constituyéndose en adelante en un flujo de tipo no permanente y no uniforme, con lo cual el equilibrio que sustenta el flujo laminar se rompe para dar lugar al flujo transicional y en seguida al turbulento.

En una superficie idealmente lisa y uniforme, con una pendiente constante y un suministro de agua uniforme, un flujo de lámina delgada puede mantenerse en régimen laminar por una distancia considerable, especialmente si la profundidad de la lámina es muy pequeña y la velocidad es baja.

No obstante, aun cuando el incremento de caudal por aporte lateral meteórico comporta consigo un incremento de la altura de carga, y como resultado, el incremento de velocidad, la ruptura del flujo laminar y del flujo en lámina no está asociada íntegramente a perturbaciones de origen hídrico, sino que son consecuencias inherentes a las irregularidades propias de la superficie receptora, resultante de los procedimientos constructivos y de la naturaleza del suelo. Los procedimientos constructivos usuales no permiten lograr una superficie completamente llana, y menos para el agua. Al término de la operación de compactación, lo que se obtiene es un relieve irregular cargado de concavidades, asperezas, pendientes inconstantes, canales, surcos, etc., incidental o deliberadamente admitidos, actuando todos ellos como catalizadores de la perturbación del flujo. En otro punto de análisis, la matriz del afirmado no es completamente homogénea, pues siempre habrá segregación de partículas, concentrándose en diferentes fases partículas gruesas y finas, o tormos de material fino consolidados que se ablandarán con la humedad, constituyéndose en membranas de material plástico propensos a deformarse ante variaciones de humedad, aún sin presencia de carga vehicular. Ante estas perturbaciones o accidentes del relieve e irregularidades en la composición del suelo, el flujo tiende a concentrarse en corrientes incipientes, con energía incrementada y animada de fuerza tractiva, acentuando el crecimiento del canal en formación. Se entabla entonces, un ciclo de retroalimentación, en el que un arroyo en formación gana energía para erosionar más, dando lugar a un cauce más amplio que concentrará más flujo, y así sucesivamente. Este evento da lugar a dos acontecimientos: 1) conversión del flujo laminar a transicional o turbulento, y 2) ruptura del flujo en lámina para disgregarse en ristra de flujos concentrados.

Por lo tanto, el flujo de lámina delgada tenderá a romperse y disgregarse en pequeños arroyos concentrados en algún punto de su recorrido, especialmente a medida que aumenta la longitud del flujo y, por ende, la oportunidad de encontrar o provocar irregularidades. Esto explica el comportamiento naturalmente inestable de los flujos de lámina delgada en su curso sobre superficies irregulares.

Recuérdese que en condiciones de sierra y en referencia a caminos vecinales, en los que la traza se adecúa a la orografía accidentada, los tramos rectos, en general, hacen un recorrido corto, predominando una geometría horizontal sinuosa, con elevada densidad de curvas, las cuales, al estar dotadas de peralte cortan a cada

paso la continuidad de una pendiente dominante para dirigirlo hacia un lado de la vía.

Esto ralentiza en gran medida la acción erosiva del flujo que acaba de mutarse de laminar a transicional y a turbulento, y de flujo en lámina a flujo concentrado, habida cuenta de que la longitud de recorrido es con frecuencia relativamente corta. Una superficie inclinada en una dirección dará lugar a la formación de un mayor número de surcos pequeños, en tanto una superficie de múltiples aguas o de inclinación irregular dará origen a menos surcos de mayor dimensión y con mayor caudal concentrado. En el primer caso, acontece el transporte de material de una zona a otra de la propia plataforma, en una suerte de relleno compensado. En el segundo caso, al ser mayor la fuerza tractiva del flujo, el material es arrancado del lecho del firme y transportado fuera de la plataforma.

4.7.3.3 Tipos de surcos identificados en carreteras afirmadas

Se identifica tres tipos de surcos en las superficies de rodadura afirmadas, compatibles con los análisis abordados y observaciones efectuadas en campo:

- Surcos longitudinales
- Surcos transversales
- Surcos diagonales

Surcos longitudinales

Los surcos longitudinales tienen lugar en tramos rectos de carretera, y se presentan en número de uno o dos surcos, haciendo un recorrido paralelo al eje de calzada en dirección de la pendiente principal. Interrumpen su recorrido al afrontar una pendiente transversal, generalmente el que corresponde al peralte en curvas.

Surcos transversales

Estos surcos hacen su aparición en curvas abiertas, producto de la disgregación del flujo en lámina que se forma en la berma superior, tomando cursos en racimo en dirección a la cuneta interior de la curva, siguiendo el plano inclinado proporcionado por el peralte. No suelen tomar dimensiones ofensivas al tráfico, y a menudo resultan en superficies consolidadas por recompactación inducido por el tráfico.

Surcos diagonales

Los surcos diagonales se fraguan en curvas cerradas y en las de volteo, al disgregarse un flujo en lámina en flujo concentrado, en un tramo recto concurrente

a la curva. En ocasiones, un surco longitudinal se proyecta hacia la curva modelando un surco diagonal, configuración que toma gracias a la pendiente longitudinal y transversal de que están dotadas estas curvas.

Bajo condiciones de diseño y construcción apropiadas, los surcos en la superficie de rodadura no adquieren connotaciones nocivas al tráfico, ya que, al igual que lo que sucede con el ahuellamiento vertical, estos surcos tienden a rellenarse por el propio transporte de material y por flujo plástico inducido por carga del neumático, seguido de una recompactación cuando las propiedades físicas del firme son las apropiadas. No debe confundirse con surcos mayores ocasionados por aguas externas que ingresan a la plataforma como consecuencia de sistemas ineficientes de drenaje lateral.

4.7.3.4 Geometría vertical y su relación con la formación de surcos

Se entenderá que la formación de surcos tiene lugar en carreteras dotadas de pendiente longitudinal y transversal apropiados. En carreteras de pendiente hidráulicamente no-drenante no habrá formación de arroyos, predominando en ellos el estancamiento y la infiltración.

Un entendimiento de la hidráulica superficial sobre la capa de afirmado, llevará al diseñador a tomar criterios más adecuados para un diseño más duradero del firme.

4.7.4 Deformación por formación de hoyos

La formación de hoyos en carreteras de baja pendiente sigue procedimientos más intrincados que la de los surcos longitudinales. Mientras los surcos se explican principalmente por la escorrentía superficial concentrada y el arrastre de partículas, los hoyos diseminados en tramos de baja pendiente tienen un origen y una evolución más ligados a la saturación localizada de la propia capa de afirmado y de la subrasante, o de ambos, y en la acción de bombeo del tráfico.

Este proceso sigue las siguientes fases:

<u>Acumulación de agua, infiltración y ablandamiento de la matriz del afirmado</u>
En intervalos carreteros de pendiente hidráulicamente no-drenante, el agua de escorrentía pluvial no tiene velocidad suficiente para drenar eficazmente, por ende, tiende a acumularse en depresiones leves preexistentes en la superficie, o en

zonas de deficiente compactación del material de afirmado, o donde hubo segregación de partículas.

El bombeo o caídas transversales que se proporciona a la sección de la calzada no cumple una función eficaz como elemento de drenaje, ya que las pasadas de ruedas vehiculares provocan depresiones o ahuellamientos, y por más leves que éstos sean, se constituyen en trampas que capturan y confinan las aguas de escorrentía, sin capacidad de movimiento en la dirección longitudinal a falta de pendiente, ni en el sentido lateral, por el cierre que le impone la pared de la rodera.

El agua atrapada amera en la capa de afirmado ablandándola y haciéndola más plástica. El suelo saturado de este modo toma una consistencia esponjosa, pierde drásticamente sus propiedades cohesivas y resistencia, pierde capacidad para distribuir eficazmente las cargas del tráfico a las capas subyacentes y queda a merced de fuerzas externas para ser desalojado de su nicho.

Nacimiento y evolución del hoyo

En la matriz saturada de la capa de afirmado se producen las primeras deformaciones debido a la desintegración por pérdida de cohesividad y a la segregación vertical de finos, formándose en su lugar microdepresiones de suelo blando que atrapan más agua.

Bajo la acción cíclica de carga vehicular, en las capas internas del firme se inicia un proceso gradualmente destructivo. La carga del neumático genera en el agua intersticial del medio saturado una presión de poros, que actúa como pistón de inyección que compele al agua y partículas a trepidar en su posición, disgregando la estructura del firme. A medida que la rueda avanza crea una presión negativa o de succión tras de sí, dando origen a la expansión de las capas subyacentes, lo que origina arrastre de agua y partículas finas hacia la superficie. A su paso, la carga del neumático genera una depresión incipiente a lo largo de la longitud de contacto L con el suelo.

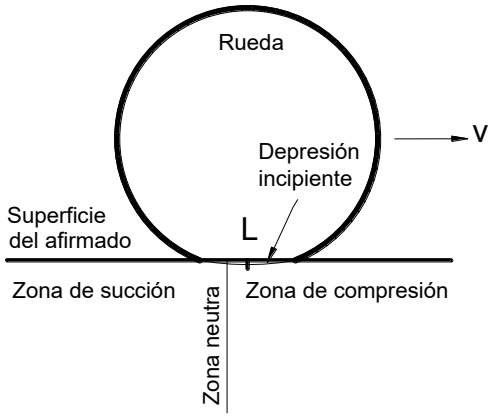


Figura 11. Nacimiento del hoyo

Cuando la rueda del vehículo alcanza el hoyo incipiente, el impacto sobre la cavidad desaloja agua y partículas dispersándolas de su posición. Cuando la rueda traspone el hoyo, crea una presión negativa o de succión tras de sí, levantando a su paso más agua y partículas. El agua que, ligada a la superficie trasera del neumático es arrastrada a cierta distancia y altura, es una manifestación de estas fuerzas de succión. Este material expulsado tanto por impacto como por succión de los neumáticos, es un signo claro de que un hoyo está en plena evolución.

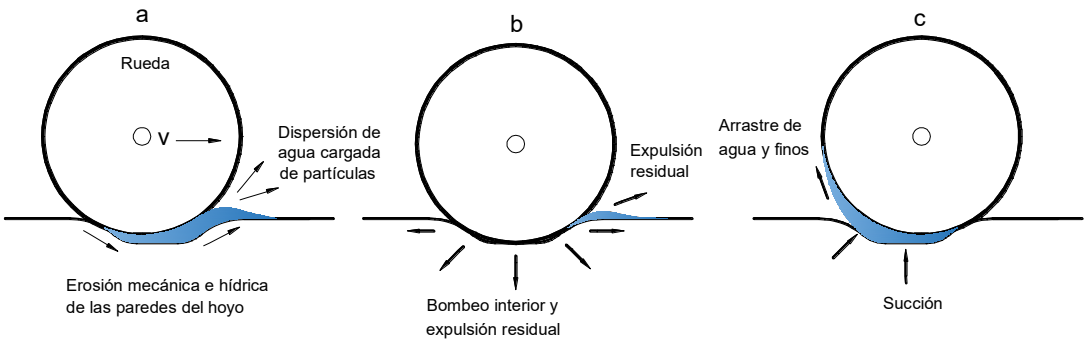


Figura 12. Evolución del hoyo

De este modo, se repite el ciclo de compresión-succión que los neumáticos ocasionan sobre el suelo, con una intensidad que va incrementando con cada pasada, expulsando cada vez más agua y materiales, provocando deformaciones permanentes en la estructura del afirmado.

Sobre hoyos en desarrollo, al reducirse el área de contacto entre el neumático y la superficie del firme, la presión de contacto se concentra en los bordes del hoyo, incrementando su magnitud. Este incremento provoca, por el descrito efecto pistón,

desplazamiento de agua y material en todas direcciones, pero en mayor magnitud hacia las paredes del hoyo al no encontrar resistencia alguna en esta dirección, dejando expuesto este material a ser evacuado por succión.

Resulta fácil imaginar que las paredes laterales del hoyo se convierten en «estribos» del «puente de rueda», y como tal están sometidos a esfuerzos de compresión más altos y a esfuerzos cortantes en el borde superior, que en acción conjunta ocasionan desprendimiento de masas de tierra, en un mecanismo de falla acelerada. Y es de observar que la presión en el centro del hoyo será nula, teniendo lugar más bien su máxima en el mismo pie del «estribo». Esto provoca la extrusión de material hacia la zona de menos presión que está en el vacío del hoyo. El centro del hoyo, experimentará, por el contrario, una presión de empuje ascensional con levantamiento y degradación del material subyacente. El efecto «puente de rueda» explica por qué los hoyos se desarrollan aceleradamente, incluso tan pronto como se termina una intervención.

Ante la presencia de un hoyo, el bulbo de presiones graficado en la Fig. 6 pierde su naturaleza ideal, debido a la interrupción de la superficie de contacto. Al concentrarse mayor carga del neumático en los bordes del hoyo, en un anillo más delgado, genera bulbos secundarios de naturaleza compleja en todo el rededor, más estrechos y profundos. En seguida, la carga del neumático provoca asentamiento elástico del suelo alrededor del hoyo y consecuentemente reduce su volumen. A ello se debe sumar la curvatura del neumático y el «chupón» que gema por la diferencia de presión, reduciendo aún más el volumen del hoyo. Ambos mecanismos de reducción de volumen inducen una presión positiva en el interior del hoyo. Tanto esta presión positiva, como las presiones de succión generadas al trasponer el hoyo, se transmiten independientemente con la misma intensidad en todas las direcciones, en un proceso explicado por el Principio de Pascal. Es la razón por la que los hoyos adoptan formas circulares en sus principios.

En un hoyo más desarrollado se genera un impacto dinámico adicional al impactar la rueda en el fondo del hoyo. Al dejar de existir el «puente de rueda» tanto el borde de descenso como el de ascenso sufre el impacto directo del neumático, lo cual acelera aún más el desprendimiento de material de los bordes, que luego serán proyectados a distancias más alejadas por el siguiente impacto de rueda.

Desde el momento en que el neumático hace contacto con el fondo del hoyo, no se generará ya presiones positivas y negativas en el interior, instaurándose por el contrario, un nuevo ciclo de impacto y succión superficial en el fondo, acrecentando el tamaño del hoyo.

Un aspecto relevante a tener en cuenta es la rapidez con que lleva cabo el proceso de deformación. Una vez iniciado el proceso, el desarrollo toma un tiempo bastante corto a diferencia de otras formas de deformación, al punto que una sola estación pluviosa puede suscitar la caída de servicialidad del afirmado. En la misma medida, la enmendadura de hoyos que se practica en actividades de mantenimiento rutinario tiene corta duración, por no decir más que un paliativo momentáneo, teniendo en cuenta que en un procedimiento manual de relleno se carece de potencia suficiente para alcanzar la rigidez de la estructura prístina. Se entenderá por qué este modo de intervención peca de ineficiente.

4.7.5 Deformación por pérdida de firme en curvas de volteo

4.7.5.1 Introducción

El Artículo 302.07 Curvas de vuelta, del Manual de Carreteras - Diseño Geométrico DG-2018, define estas curvas como aquellas que se proyectan en laderas y terrenos escarpados con el propósito de superar fuertes desniveles con restricción a las pendientes reglamentarias.

La citada norma prohíbe el uso de estas curvas en autopistas, supeditando su uso, solo en casos excepcionales, a carreteras de primera clase previa justificación técnica y económica. Establece el radio mínimo interior en 20 m, aunque más adelante precisa longitudes de 8.0 m como radio mínimo normal y de 6.0 m como radio mínimo absoluto a ser usado excepcionalmente.

Para caminos vecinales no existe una norma técnica que regule el dimensionamiento geométrico de estas curvas. Los radios más cortos de las curvas de volteo en el camino objeto de estudio son de 5.0 m interior y 10.0 m exterior, lo cual no está muy alejado del radio mínimo excepcional establecido para carreteras de primera clase.

Para entender el proceso de desgaste del afirmado en las curvas de volteo, es necesario recordar el mecanismo automotriz analizado en la Sección 4.6.3, que interviene en el giro vehicular.

4.7.5.2 Particularidades de las curvas de volteo

Aunque no sea regla general, las curvas de volteo en caminos vecinales no se hallan terminadas en su construcción en conformidad con la traza del proyecto, excepción hecha a aquellas que fueron objeto de intervención en un proceso de rehabilitación en regla. Cantidades importantes de caminos vecinales fueron construidos por intervención directa de gobiernos locales bajo la modalidad de «apoyo comunal», muchos de ellos sin expedientes técnicos formalmente elaborados, y a menudo por borneo del terreno por el operador de la maquinaria. Frecuentemente, la atención de demandas sin contar con financiamiento formal los obliga a perfilar las curvas de volteo a nivel de transitabilidad, en razón a que éstas requieren cuantiosas horas máquina y combustible por el elevado volumen de tierra a remover, con la posibilidad eventual de tropezar con material rocoso. Estas evidencias son perceptibles por cuanto: a) las curvas exhiben radios mínimos o por debajo de los mínimos; y b) en razón a la existencia de un saldo pendiente de ampliación, presentan longitud de curva reducida, lo que da lugar a pendiente elevada en el curso de la curva.

Por consiguiente, con excepción de las curvas terminadas que comportan un rango normal de radios y pendientes, el régimen de marcha vehicular en las curvas de volteo es distinta a las curvas normales, y en ese mismo orden, la deformación de la superficie de rodadura toma morfología y evolución también distintas.

Debido a la estrecha abertura y elevada pendiente que normalmente coexisten en estas curvas, los vehículos reducen la velocidad hasta la mínima marcha, razón por la que las fuerzas centrípetas, muy activas en las curvas normales, en éstas se manifiestan sutilmente o incluso dejan de existir. En consecuencia, en estas curvas no existe el ahuellamiento reclinado típico en las curvas normales.

En la práctica constructiva, aunque las curvas de volteo se dejan inacabadas en cuanto a amplitud de radio, se les suele dotar, no obstante, del peralte que dispone el proyecto, generalmente el máximo por contener radios mínimos. Esta práctica es innecesaria por el momento, por cuanto, como se dijo en el párrafo que antecede,

los vehículos reducen su marcha al mínimo, carentes, por tanto, de inercia que contrarrestar. De este modo, estas curvas suelen presentar doble pendiente sobredimensionada, la longitudinal y la transversal, lo que obliga a los vehículos a remontar la curva con doble inclinación, lo cual deviene en una distribución desequilibrada de carga sobre los neumáticos.

4.7.5.3 Mecanismos de abrasión por neumáticos en curvas de volteo

Movimiento circular y naturaleza del contacto neumático-pavimento

Cuando un vehículo gira, las ruedas delanteras se orientan con un cierto ángulo de dirección, conocida como ángulo de Ackerman. En teoría, todas las ruedas deberían deslizar sobre círculos concéntricos alrededor de un mismo centro instantáneo de rotación. Sin embargo, en la práctica es no ocurre exactamente, por las siguientes dos razones: a) los neumáticos no son rígidos, por el contrario, son cuerpos elásticos deformables; y b) el mecanismo de dirección y suspensión impide que las cuatro ruedas mantengan exactamente la geometría Ackerman perfecta, especialmente las traseras, que no giran. Como resultado, cada rueda sufre un pequeño deslizamiento lateral o ángulo de deriva respecto a la dirección teórica de rodadura pura.

Cada rueda imprime una huella de contacto que típicamente elíptica, en la que actúan tres tipos de esfuerzos:

a) Esfuerzo tangencial longitudinal, que actúa en el sentido del avance, dando lugar al deslizamiento por tracción,
b) Esfuerzo tangencial lateral, que actúa en dirección perpendicular al avance, debido al giro, cuyo efecto es la deriva lateral; y
c) Esfuerzo normal debido al peso del vehículo, cuya dirección es vertical.

Desgaste del firme debido a la geometría vertical en la curva de volteo

Al remontar la curva de volteo, la sobreelevación del peralte hace que el vehículo decline hacia el interior de la curva desplazando su centro de gravedad en esa dirección, dando lugar a que la presión que las ruedas interior y exterior traseras ejercen sobre el suelo se desequilibre, trasladándose mayor carga a la rueda interior que está en un nivel más bajo. Esta rueda interior portante de carga incremental, animada de un momento lateral debido al desplazamiento del centro de gravedad del vehículo, remonta la plataforma de doble inclinación siguiendo un atajo más corto, acompañado de derrapamiento lateral, desgarrando el material

superficial del firme que luego será arrastrado a la cuneta. Lo propio sucede con la rueda trasera exterior, aunque con menor intensidad por barrer un recorrido más largo y soportar menor carga.

Con cada paso vehicular se repite este ciclo de desgaste, contribuyendo a la pérdida del firme en la franja interior de la calzada. El material desgarrado se deposita en la cuneta a la espera de ser arrastrado por la escorrentía pluvial, y a menudo se constituye en una trampa de atolladero. Bajo este régimen de trabajo mecánico sobre la superficie, el incremento combinado del peralte y pendiente corrompen la curva hasta límites impracticables para vehículo pesados.

Desgaste del firme debido a la geometría horizontal en la curva de volteo

Para diferenciar del desgaste debido a la geometría vertical, longitudinal y transversal en la curva de volteo, pongamos un hipotético caso de una curva sin peralte ni pendiente, con el vehículo circulando a baja a velocidad. En este contexto, el fenómeno relevante es el esfuerzo tangencial lateral, que se explica porque las ruedas delanteras interior y exterior se orientan con diferente ángulo; entretanto, las ruedas traseras, que no giran, siguen trayectorias que no son concéntricas con las delanteras, y no son epígonos a ellas. Como resultado, se tiene una distribución no uniforme de velocidades en cada una de las huellas de contacto de los neumáticos. En consecuencia, en cada huella, una parte del neumático se deforma elásticamente y luego se desliza bruscamente sobre el pavimento, en una acción semejante a la frotación o «fregado». El resultado físico es un microdeslizamiento repetido entre la goma y el pavimento, reconocible por un chirrido o crujido característicos, que provoca el desgaste abrasivo del pavimento y del caucho, y constituye, a la vez, una fuerza de reacción lateral responsable de estabilizar el vehículo en la curva, para efectos explicativos, carente de peralte.

Efecto diferenciado de las ruedas

En una curva de volteo, cada rueda se mueve de manera diferente al resto, con efectos igualmente diferentes. Así, la delantera interior describe menor radio de giro y mayor ángulo direccional, y como consecuencia, mayor deformación lateral en la huella, dando lugar a una alta frotación lateral, desgaste concentrado y fricción audible. La delantera exterior describe mayor radio de giro y menor ángulo direccional, al tiempo que imparte mayor carga vertical debido al balanceo de la

carrocería, lo cual implica mayor presión de contacto y menor fricción sobre el pavimento, lo cual produce desgaste más marcado en la textura.

La rueda trasera interior, carente de direccionamiento, sigue trayectoria más cerrada que la delantera correspondiente, lo cual produce un arrastre lateral forzado, produciendo sobre el pavimento un esfuerzo de cizalla lateral más fuerte, con el chirrido característico. Finalmente, la rueda trasera exterior que es obligada a seguir trayectoria más abierta, debe allanarse al movimiento del resto deslizando el caucho hacia el interior, produciendo un patrón de micro-pulido en pavimentos rígidos con un desgaste más suave.

En un diagrama del conjunto, al par lateral total que produce el giro se oponen fuerzas de fricción en las cuatro ruedas que equilibran el sistema.

Caracterización del desgaste en el pavimento

El desgaste característico del concreto del pavimento rígido en curvas se debe al microcizallamiento, habida cuenta que cada punto del pavimento experimenta una sucesión de esfuerzos tangenciales alternos por paso de las ruedas en giro. Estos esfuerzos tangenciales pueden estimarse en el orden de 0.2 a 0.3 veces la presión de contacto. Por ejemplo, si el neumático que corresponde al camión de diseño HL-93 aplica $72.5\,kN$, la presión sobre el pavimento será $72.5/(0.254 \times 0.508) = 562\,kPa$, el esfuerzo lateral ronda los $110 - 170\,kPa$. Este valor es suficiente para pulir la superficie del concreto en el pavimento rígido, generar microfisuras superficiales o escamaciones y dejar marcas circulares o «brillos» en zonas de giro lento como accesos o intersecciones.

Se entenderá que, si bien, por consideraciones ilustrativas, en el análisis se acaba de hacer partícipe al pavimento de concreto, el comportamiento de los neumáticos sobre otros tipos de pavimento será el mismo, pero con efectos muy diferentes para cada caso. No obstante, esta sección constituye el preámbulo para plantear alternativas de tratamiento de curvas de volteo en caminos vecinales, que conduzcan a implementar estructuras más duraderas en estas singularidades.

4.7.5.4 desgaste por frenado en curvas de volteo

A tenor de lo descrito en la Sección 4.7.5.2, al tomar un vehículo una curva de volteo reduce la marcha a velocidad mínima, para lo cual es preciso frenar unos

metros antes del principio de curva. El efecto repetido del frenado produce arranque y desplazamiento del firme provocando mayor desgaste en la franja que antecede al principio de curva, con mayor intensidad en la sección superior de la curva con los vehículos en descenso. En la sección inferior el desgaste es menor, ya que estando en descenso no hay necesidad de frenado y estando en ascenso el arrastre por frenado es menor.

4.8 ANÁLISIS DEL ORIGEN DE LOS MÉTODOS DE DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES ADOPTADOS POR LA NORMA PERUANA

4.8.1 Síntesis de la adopción del método NAASRA / AUSTROADS por la norma peruana

Aunque el Artículo 11.2 - «Secciones de capas de afirmado» de la norma peruana faculta el uso de cualquier método de diseño que satisfaga los requerimientos del proyecto, adopta la ecuación del método NAASRA / AUSTROADS, ecuación que se utiliza para el cálculo del espesor de afirmado tomando como factores determinantes el valor de CBR del suelo de subrasante y la carga vehicular actuante sobre el afirmado, expresada en número de repeticiones de ejes equivalentes. La Guía Austroads, en su página 8.9 reproduce la fórmula y su correspondiente nomograma para el cálculo del espesor de afirmado. La ecuación que rige el diseño es:

$$\boldsymbol{e = \left[219 - 211\left(logCBR\right) + 58(logCBR)^2\right]log\left(N_{rep}/120\right)} \quad (9)$$

donde:

$\boldsymbol{e}$ es el espesor de la capa de afirmado en milímetros

$\boldsymbol{CBR}$ es el valor de CBR de la subrasante

$\boldsymbol{N_{rep}}$ es el número de repeticiones de eje equivalente (formas abreviadas EE en español o ESAL de Equivalent Single Axe Load en inglés) para el carril de diseño.

De la guía en mención podemos extraer los siguientes argumentos relevantes:

El numeral 8.3 - Empirical design of granular pavements with thin bituminous surfacing, estipula que este método de diseño se aplica a «*pavimento granular con superficie bituminosa delgada*», de manera imperativa, mas no facultativa, en lo que respecta a «*superficie bituminosa delgada*». Al respecto, la norma peruana

prescinde el requerimiento del uso de esta capa bituminosa como condición necesaria para el desempeño adecuado del afirmado, en correspondencia con el método de diseño que adopta. Así, en su parte introductoria del CAPÍTULO XI – AFIRMADOS, Artículo 11.1 – Metodología de diseño, señala: «Se presenta una metodología para diseñar estructuras de pavimentos cuya capa de rodadura estará compuesta por material de afirmado en su totalidad, entendiéndose ésta como una capa de material granular destinada a soportar las cargas del tránsito, que adicionalmente puede ser tratada para el control de polvo».

Como es de advertir, la norma no exhorta de manera taxativa el uso del recubrimiento bituminoso como parte integrante del afirmado. La sugerencia, a título facultativo, de un tratamiento para el control de polvo, no sienta un propósito manifiesto, habida cuenta de que son varios los métodos de control de polvo, siendo uno de ellos el recubrimiento bituminoso, aunque la función capital de este recubrimiento no es tal. El problema principal que capta la atención en la estructura de afirmado es el deterioro causado por las aguas de infiltración, y a tal efecto, la función primordial del recubrimiento bituminoso es proporcionar impermeabilidad y cubrir las irregularidades de la superficie compactada sellando fisuras y microfisuras a fin de evitar el calado de dichas aguas. De lo antedicho se sigue que el control de polvo por aplicación de recubrimiento bituminoso es un efecto benéfico marginal. Este supuesto se puede corroborar simulando el siguiente monólogo: «proporciono una capa de recubrimiento impermeable para proteger la estructura del afirmado, lo cual adicionalmente controlará la emisión de polvo». La norma no es preceptiva a este respecto.

En una segunda diferencia, la Guía Austroads delimita el espesor mínimo del afirmado en 100 mm para CBR de subrasante mayores de 30%, en tanto la norma peruana redobla este espesor mínimo a 150 mm, para las mismas condiciones de CBR de subrasante. Adicionalmente, la norma peruana precisa: «los sectores que presenten subrasantes con CBR menor de 6%, será materia de un estudio específico de estabilización o reemplazo de suelos de la subrasante».

No queda claro el argumento que sustenta el incremento de los 50 mm que la norma peruana impone al espesor mínimo, dejando entrever una justificación que apunta a «compensar» el recubrimiento bituminoso que se omite.

4.8.2 Breve referencia a la génesis del método NAASRA / AUSTROADS

El método NAASRA / AUSTROADS es resultado de un programa desplegado a lo largo de décadas, que comprendió el monitoreo y recolección de datos en toda la red de carreteras que se extienden en el territorio australiano. Se estableció abundante número de secciones de ensayo sobre carreteras afirmadas en toda Australia y Nueva Zelanda, y proyectos piloto a menor escala en diferentes regiones de ambas naciones. En el proceso se evaluó el comportamiento del afirmado sobre una variabilidad de cargas de tráfico real, condiciones climáticas diversas y multiplicidad de tipos de suelo y calidad de materiales granulares. Asimismo, se sentó las pautas que estandarizan las técnicas y procedimientos de construcción y soluciones de drenaje sobre carreteras afirmadas. Se introdujo en el desarrollo del método, resultados de estudios de la ARRB (Australian Road Research Board), entidad que realizó investigaciones profundas sobre el comportamiento de materiales granulares sin ligar, la interacción suelo-agua y los mecanismos de deterioro de caminos afirmados.

Dado el deterioro permanente al que están expuestos estos caminos, el método pone un fuerte énfasis en la gestión vial a largo plazo, basada en planes que contemplan modalidades y frecuencias de intervención con fines de mantenimiento. Bajo este enfoque, el diseño del espesor está asociado estrictamente a una estrategia de mantenimiento exhaustivamente planificada.

4.8.3 Entorno físico-geográfico en que se edificó el método NAASRA / AUSTROADS.

Resulta pertinente hacer un recuento de las características geográficas y climáticas del país que vio nacer el método, en razón a que estas características proyectan un cariz que controla el desempeño del método en nuestra región.

Geográficamente, el 75% del territorio australiano es desértico o semiárido, y en consecuencia llano, características que favorecen el diseño geométrico de carreteras con tangentes excepcionalmente largas. Lo habitual en Australia es trazar carreteras con secciones rectas de 10 a 20 km, y el país ostenta el segundo lugar en tener la carretera recta más larga del mundo, con 167.5 km de sección sin curvas y sin pendientes notables, la denominada Vía Eyre Highway, superado únicamente por la Autopista 10 de Arabia Saudita, con 256 km de carretera sin curvas que atraviesa el desierto de Rub’ al-khali, uniendo las ciudades de Haradah y Al-Batha.

En otro récord, Australia es el primer país en el mundo que cuenta con carreteras sin límite de velocidad, condición que emana no de la ingeniería en sí, sino de las condiciones geográficas propicias para la construcción de caminos seguros, donde la geometría horizontal y vertical no afrontan complejidades habitualmente presentes en nuestro territorio.

En Perú, sólo en la franja costera encontramos similitudes geográficas y ambientales a las de Australia, donde tramos de las rutas PE-1N y PE-1S (Carretera Panamericana) exhiben secciones cuasi rectas de entre 20 y 27 km. En los Andes peruanos, subtender un segmento recto de 300 metros de carretera es ya un logro excepcional.

Con una precipitación media anual de 419 mm, el 80 % del territorio australiano recibe lluvias menores de 600 mm, y el 20 % recibe lluvias menores de 200 mm. La mayor densidad de carreteras está concentrada en la región Sudeste, en el territorio de la capital australiana, región relativamente más húmeda que el resto del país. En contraste, en Perú, en la región sierra tenemos precipitaciones que van de 500 a 1000 mm por año, y en selva baja las precipitaciones sobrepasan los 5,000 mm por año.

Las carreteras australianas no afrontan singularidades geométricas caprichosas semejantes a las nuestras, como carreteras anfractuosas con elevada densidad de curvas, o caminos que cubren distancias horizontalmente cortas pero con gran desnivel que salvar. La Fig. 13 muestra una carretera rural típica australiana (a), y la carretera que une las capitales distritales de Salcahuasi, y Surcubamba, cuya traza serpentea las laderas de las márgenes izquierda y derecha del río Mantaro, respectivamente, en la provincia de Tayacaja, departamento de Huancavelica (b). La distancia horizontal entre Salcahuasi y Surcubamba es de apenas 13.3 km, que en condiciones de Australia sería tal, una carretera recta, amplia, fácilmente trabajable. No obstante, las condiciones geográficas de nuestro entorno demandan la construcción de una carretera de 57 km de longitud, de planta hipersinuosa, 34.2 km en descenso hacia el thalweg del río Mantaro y 22.8 km en ascenso, sobre laderas empinadas, con superabundancia de curvas normales y de volteo, sobre condiciones geológicas y geotécnicas complejas. Escenario como este se repite a lo largo de toda la cadena montañosa que se yergue a lo largo de la franja central

del territorio peruano, hendida por profundos álveos de ríos y cabelleras hídricas que surcan todo el panorama de Los Andes.

Condiciones como éstas contrastan con la geografía de la nación materna de la norma, donde se imponen carreteras rectas de pendiente predominantemente baja, todo lo cual implica un mecanismo distinto de desgaste del pavimento.

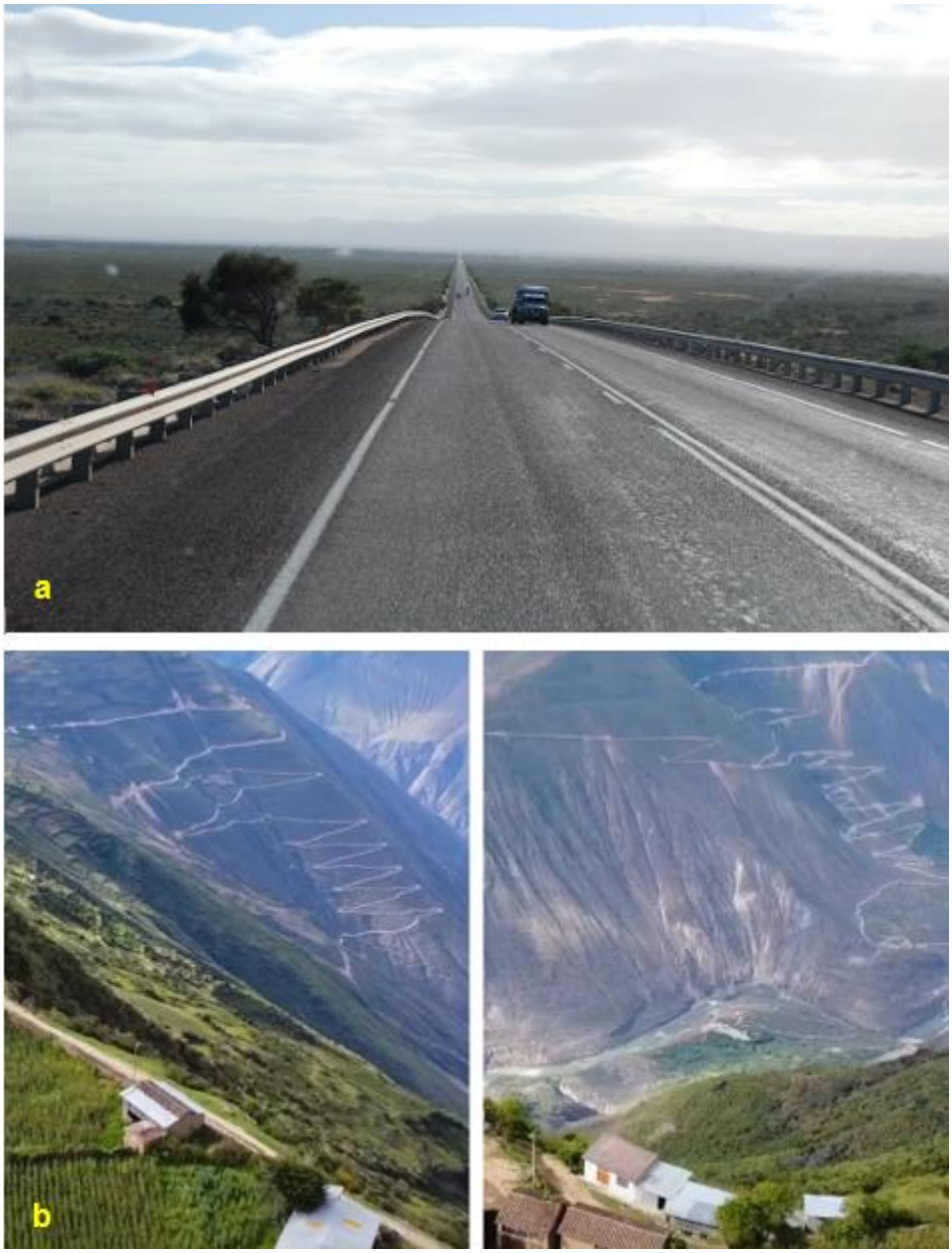


Figura 13. Escenarios viales de Australia y Perú.

La ausencia de singularidades en el país natal, tales como la alta densidad de curvas, entre normales, cerradas y las de volteo, así como la inexistencia de tramos con quiebre constante de pendientes, hacen que el modelo no comporte estos rasgos en su genética, por tanto, resultan estériles a la hora de aplicar en nuestro medio. Buscar estas singularidades en Australia para establecer allí las secciones de control, habría resultado más tedioso e innecesario para su modelo experimental, pues no es representativo en ese medio.

En contraposición, nuestro entorno nos hubiera obligado a plantear un enfoque diametralmente opuesto, concentrando secciones de control en tramos curvos por su excesiva abundancia, bajo un espectro grande de variabilidad de pendientes, lo que habría resultado en una ecuación distinta a la del método madre. Estas variables no pueden ser despreciables en nuestro entorno, donde las llanuras de costa y selva se hallan traspuestos por imponentes cadenas montañosas, y donde en el seno de estas propias cadenas, los accidentes geográficos son profusamente hostiles.

Es sabido que la cuasi totalidad de países latinoamericanos aplican los métodos NAASRA / AUSTROADS y AASHTO ’93 para el diseño de pavimentos granulares y flexibles, respectivamente, lo cual ejerce una influencia gravitatoria sobre el nuestro, de modo tal que pertenecemos a un conglomerado de usuarios de estos métodos, por convención. No obstante, es necesario destacar que ninguno de los países del bloque comparte la geografía nuestra. Solo las regiones sierra y selva de Bolivia y Argentina guardan alguna similitud con la nuestra, y someramente, las de costa y sierra de Chile. Y deparando nuestra atención a la sierra peruana, que por sus características socio-demográficas peculiares concentra el 92% de carreteras afirmadas y trochas carrozables del país, no hay razón que justifique nuestra asimilación al bloque.

Las geometrías horizontal y vertical son determinantes en los resultados de un diseño estructural de pavimento en cualquiera de sus formas, pero están ausentes como variables en los modelos de diseño. Y aun cuando hubieron de estar presentes, no tendrían la ponderación que impone nuestro entorno. En consecuencia, el método NAASRA / AUSTROADS, altamente pragmático, opera con eficacia en las condiciones de Australia, pragmatismo que no se puede trasladar a distinto ámbito sólo por contar con insumos de igual denominación.

En conclusión, los experimentos australianos de NAASRA usaron principalmente tramos rectos de las llanuras y no incorporaron módulos de daño lateral por fuerzas centrífugas, razón por la cual su modelo empírico-mecanicista está calibrado para condiciones de tráfico rectilíneo, con poca evidencia experimental de desgaste en curvas.

4.8.4 Repercusiones de la supresión del recubrimiento bituminoso por la norma peruana

En el desarrollo del método NAASRA / AUSTROADS, el comportamiento estructural de las secciones de control y la calibración empírica estuvieron sujetos a la presencia del recubrimiento bituminoso. Aunque este recubrimiento no tuvo -y hasta la actualidad no lo tiene- función de refuerzo estructural, la práctica tuvo por finalidad:

- Evitar variabilidad por cambios en la humedad de la estructura granular sujeto a observación,
- Controlar el desprendimiento de las partículas superficiales por acción de las ruedas y de la lluvia.
- Evitar el desgaste de la estructura granular por desprendimiento en forma de polvo

De esta manera se reducía la variabilidad del desempeño de las muestras por influencias ambientales, al tiempo que estadísticamente, sin este control previo, los resultados de las mediciones habrían carecido de consistencia. De hecho, en los principios del experimento no se aplicó este recubrimiento, dando lugar a que las secciones de control acusen fallas a temprana edad.

Es por ello que los autores destacan el título «*Design chart for granular pavements with thin bituminous surfacing*» del nomograma, a modo de advertencia para quien haga uso del producto, que el método es válido para esta configuración del diseño.

Así, la norma peruana incurre en el uso inconsistente del método, ya que el modelo fue calibrado bajo condiciones sensiblemente distintas a causa del recubrimiento asfáltico, cuya supresión conduce a modos distintos de deterioro, siendo lo fundamental el deterioro prematuro, claramente visible en carreteras de la sierra y selva del Perú. Se puede afirmar que los resultados de los diseños subestiman la verdadera magnitud del deterioro.

Del análisis abordado en la Sección 4.8.3 se concluye que las condiciones físico-geográficas de nuestro entorno son más hostiles que las del país donde se fraguó el método. Y como tal, el uso del recubrimiento bituminoso (Fig. 14) adquiere el importancia por su actuación como elemento de confinamiento de la estructura granular, cuyas funciones se pueden resumir en: a) proteger la superficie de rodadura contra la pérdida de granos desprendidos por acción de los neumáticos o por las aguas pluviales; b) evitar la infiltración de aguas pluviales en la matriz; c)

favorecer el drenaje de las aguas pluviales de la superficie de rodadura; d) proporcionar rugosidad a la superficie para mejorar el agarre entre ésta y los neumáticos; y e) proporcionar confort a los viajeros.

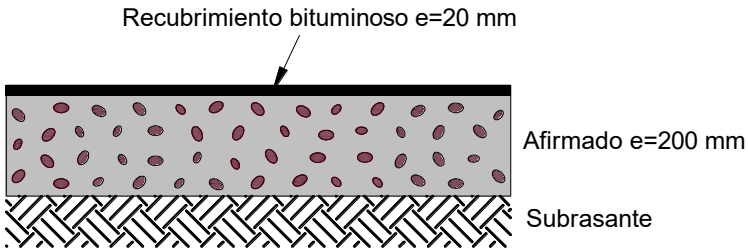


Figura 14. Afirmado estabilizado con recubrimiento bituminoso

La norma peruana, en su Artículo 11.3 – Materiales de afirmado, cita el siguiente pasaje: «Un aspecto que debe tenerse en cuenta en los caminos afirmados, es el control de polvo, debido a que todos estos caminos emiten polvo por el tráfico circulante. La cantidad de polvo que se produce en un camino afirmado es muy variable, depende de la zona del país (lluvioso o árido), del tráfico que soporta y la calidad del afirmado. Es necesario que el Ingeniero Proyectista, analice y sustente la necesidad de aplicación de paliativos de control de polvo, especialmente en cruces urbanos, zonas agrícolas o restos históricos, donde el polvo generado por el tráfico resulta perjudicial a la salud, a la producción agrícola y al deterioro progresivo del patrimonio cultural; el análisis debe incluir el periodo de servicio, debido a que prácticamente la aplicación de todos los métodos de control de polvo es anual. Los tipos de control de polvo, pueden ser riegos con agua natural, riegos incluyendo cloruros o aditivos, aplicación de productos asfálticos (imprimación reforzada, diferentes tipos de sellos asfálticos), utilización de cal, cemento u otros estabilizadores químicos».

Según este párrafo, el control de polvo está orientado a mitigar el impacto socio-ambiental, mas no así propiamente a la preservación de la estructura del afirmado, quedando esto último, como un beneficio marginal. La generación del polvo como consecuencia del tráfico vehicular constituye propiamente un proceso de desgaste de la estructura del afirmado, ya que implica el desprendimiento y expulsión del material fino que mantiene cohesionada la estructura del suelo. Bajo este enfoque, el objetivo del estabilizador como cloruro de sodio, la cal hidratada, el recubrimiento bituminoso y otros, es mantener los finos en su lugar, y de esta manera preservar la cohesión de la matriz del afirmado. La estabilización cumple este rol, de evitar la

pérdida de finos, tras lo cual, como beneficio subalterno cumple un rol positivo en el impacto ambiental.

4.8.5 Breve referencia del origen del método AASHTO '93

4.8.5.1 Descripción del entorno donde se desarrolló el método

Es pertinente, en este punto, hacer una visita al entorno donde igualmente se forjó el método AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) de diseño de pavimentos flexibles y rígidos, método que también adopta la norma peruana. A diferencia del de NAASRA / AUSTROADS, el método AASHTO es resultado del análisis y procesamiento de datos masivos acopiados en 24 meses, en una carretera experimental construido exclusivamente para tal fin. La «AASHO Road Test» -AASHO cambia de denominación a AASHTO el 13 de noviembre del 1973, al añadir a la primigenia el término «and Transportation»-, una carretera experimental construida a lo largo de 8 millas en el Oeste de la ciudad de Ottawa, Illinois, tuvo por finalidad estudiar el comportamiento de pavimentos flexibles y rígidos bajo cargas móviles. Se construyeron seis circuitos, de carriles mellizos en la tangente y circulares en los extremos, de figura de ojales, cada circuito pavimentado mitad con asfalto y mitad con concreto. Cuatro de ellos, los circuitos 3, 6, 5 y 4 más largos y colineales, de 2070 metros de longitud tangente cada uno, estuvo destinado al experimento con cargas pesadas. Los circuitos 1 y 2, más pequeños, se emplazaron paralelos por el Sur al circuito 5; de ellos, el circuito 1, el más pequeño, estuvo destinado a medir los efectos ambientales, y el circuito 2 se sometió a cargas livianas. La construcción tuvo lugar entre agosto de 1956 y setiembre de 1958, y en octubre de ese mismo año se inició la aplicación de cargas y la recopilación de datos sobre un total de 836 secciones de control, proceso que duró hasta octubre de 1960. En 1961 salió a luz la guía «AASHO Interim Guide for the Design of Rigid and Flexible Pavements», primera versión del método publicada interinamente para uso inmediato. En adelante, la guía fue sometida a revisión y perfeccionamiento continuo sobre la base de investigaciones desarrolladas, publicándose versiones mejoradas, una en el año 1972 y otra en 1986. Finalmente, en 1993 se publica la «AASHTO Guide for Design of Pavements», versión refinada que se convirtió en el estándar, usada hasta la actualidad.

Así, el caudal de datos con que se edificó el método tuvo su venero en un entorno geográfico y climático localizado.

4.8.5.2 Fórmulas de diseño del método AASHTO ’93 para pavimento flexible

La Ec. (10) del método AASHTO ’93 se utiliza para el cálculo de espesor total de la estructura del pavimento flexible (carpeta asfáltica). No obstante, en el presente trabajo se utiliza la Ec. (10) para el diseño del espesor de afirmado estabilizado con cal de una sola capa, $a_1 d_1$ de la Ec. (11) (véase Anexo 3). Al mismo tiempo, siguiendo la línea del análisis del origen del método NAASRA / AUSTROADS, se analizará el ambiente de origen de este método y sus repercusiones de la adopción por la norma peruana. La ecuación que rige el diseño de pavimentos flexibles es:

$$log(W_{18}) = Z_r S_0 + 9.36\, log(SN+1) - 0.2 + \frac{log\left(\frac{\Delta PSI}{4.2-1.5}\right)}{0.4 + \frac{1094}{(SN+1)^{5.19}}} + 2.32\, log(M_R) - 8.07 \quad (10)$$

donde

$\boldsymbol{W_{18}}$ es el número previsto de aplicaciones de carga de un solo eje equivalente (EE o ESAL) a 8.17 toneladas.

$\boldsymbol{Z_R}$ es la desviación estándar de los errores de predicción del tráfico y del desempeño del pavimento, una medida de la incertidumbre en la proyección del tráfico y desempeño del pavimento asociada a la confiabilidad del diseño $\boldsymbol{R}$, la que a su vez representa la probabilidad de que el pavimento funcione durante el período de diseño previsto manteniendo la servicialidad por encima del nivel terminal preestablecido.

$\boldsymbol{S_0}$ es el error estándar combinado del tráfico y desempeño del pavimento previstos. El término $\boldsymbol{Z_R S_0}$ representa la incertidumbre y variabilidad inherentes a la predicción de tráfico y desempeño del pavimento, asociadas a la confiabilidad.

$\Delta\boldsymbol{PSI}$ representa la caída de servicialidad vinculada a la capacidad estructural del pavimento luego de un determinado período de operación. $\Delta\boldsymbol{PSI} = \boldsymbol{p_0} - \boldsymbol{p_t}$, donde $\boldsymbol{p_0}$ es la servicialidad inicial, cuyo valor fijado por el propio modelo es 4.2, y $\boldsymbol{p_t}$ es la servicialidad terminal, cuyo valor es fijado por el diseñador.

$\boldsymbol{M_R}$ es el módulo resiliente, y representa la resistencia del suelo de subrasante a la deformación bajo cargas cíclicas del tráfico. Su valor se puede determinar por fórmulas que correlacionan el $\boldsymbol{CBR}$ y $\boldsymbol{M_R}$.

$\boldsymbol{SN}$ es el número estructural, que representa la capacidad estructural necesaria que el pavimento debe tener para soportar el tráfico de diseño, $\boldsymbol{W_{18}}$ durante

su vida útil, manteniendo las condiciones de servicialidad impuestas. En un proceso de diseño, a partir de la Ec. (10) se calcula el número estructural $\boldsymbol{S_N}$ teniendo por conocidos los valores de las demás variables (véase su forma de cálculo en el Anexo 3, de diseño de afirmado estabilizado con cal, que se diseña como pavimento semirrígido con la fórmula de AASHTO).

Sobre la base del número estructural $\boldsymbol{S_N}$ calculado se dimensiona el espesor total de la estructura del pavimento, como sumatoria de espesores de cada una de las capas, a partir de las características estructurales del material conformante de cada capa y las propiedades de drenaje definidas para la base y subbase, mediante la siguiente fórmula:

$$\boldsymbol{SN_P = a_1 d_1 + a_2 d_2 m_2 + a_3 d_3 m_3} \quad (11)$$

Cada término del segundo miembro define un número estructural para cada una de las capas, que en el caso de la Ec. (11) contempla tres, correspondientes a las de asfalto, base y subbase, en ese orden. En la ecuación, $\boldsymbol{d_1}$, $\boldsymbol{d_2}$ y $\boldsymbol{d_3}$ son los espesores reales de cada una de las capas, en el orden establecido, en pulgadas o centímetros; $\boldsymbol{a_1}$, $\boldsymbol{a_2}$ y $\boldsymbol{a_3}$ son los coeficientes estructurales de cada una de las capas, en pulgadas^{-1} o centímetros^{-1}, cuyo valor depende de las propiedades de la capa, incluido su módulo resiliente; y, $\boldsymbol{m_2}$ y $\boldsymbol{m_3}$ son los coeficientes de drenaje de las capas de subbase y base, respetivamente, adimensionales.

Se obtendrá como resultado el número estructural proporcionado $\boldsymbol{SN_P}$, que representa las contribuciones estructurales de cada capa a la estructura total del pavimento. En una suerte de «balanceo» de números estructurales calculado y proporcionado, se procura que el valor $\boldsymbol{SN_P}$ sea sensiblemente mayor al número estructural $\boldsymbol{S_N}$ calculado. De este modo, $\boldsymbol{SN_P}$ representa la capacidad estructural real, resultado de un producto numérico de espesores de capas y características de materiales.

4.8.5.3 Evolución del método AASHTO '93

La versión 1961 del método no desarrolló una fórmula como la actualmente conocida; en su lugar, incluía nomogramas y ábacos que relacionaban las variables, con formas de ecuaciones más simples, de las cuales se mantienen en la actualidad las del tráfico e índice de servicialidad. La resistencia de la subrasante,

actualmente representada por el módulo resiliente M_R, se caracterizaba con el índice de grupo, IG, que era un parámetro de clasificación de suelos. El factor climático no estaba incluido en los nomogramas debido a que el método había sido desarrollado en el entorno específico de Ottawa. Por ello, la aplicación del método estuvo restringido sólo al Estado de Illinois.

En la versión 1972 se introdujo el módulo resiliente M_R, como forma de caracterizar la resistencia de la subrasante, a base de correlaciones que permiten convertir el CBR a M_R. Se introdujo factores de indicador regional para caracterizar las variaciones climáticas y de suelo no capturadas en la AASHO Road Test. Los cambios introducidos en esta versión hicieron posible que el uso del método fuera extendido a todos los Estados

La versión 1982 es resultado de la revisión mayor del método, que dio origen a la forma exacta de la fórmula actual. Se introdujo el factor $Z_r S_0$, que sobre el concepto de confiabilidad R valúa la incertidumbre de las proyecciones de tráfico y durabilidad del pavimento. Se introdujeron los coeficientes de drenaje para ajustar la capacidad estructural de las capas granulares en función de la calidad del drenaje del pavimento.

4.8.5.4 Restricciones a la aplicabilidad del método en el país

Esta descripción de la concepción y evolución del método nos permite aproximar una valoración de su eficacia en un entorno fuera de su ámbito de origen. De ello, podemos sacar las siguientes conclusiones:

a. La primera versión del método ha sido desarrollada en base a insumos recogidos en los circuitos viales experimentales descritos en la Sección 4.8.5.1, en un entorno físico-geográfico estacionario, razón por la que, a lo largo de una década, el uso del método estuvo restringido, de manera interina, al Estado de illinois, entre tanto se incorporaba información acopiada en otros Estados para la calibración del método. Sólo cuando se culminó la calibración, se permitió expandir su uso a los demás Estados.
b. La complejidad que comporta la sintetización de datos experimentales para consolidarlo como herramienta de diseño, hace que el método no sea extrapolable a ámbitos fuera de los límites del país que le dio el advenimiento. Así, una variable esencial como el factor ambiental, está discretamente integrada

en los términos de la ecuación, sin posibilidad de ser discretizada y develada su identidad, de modo tal que su efecto particular no es conmensurable. Se puede afirmar con seguridad, que el factor ambiental está mimetizado en todas las variables de la ecuación.

c. Análogamente, los términos constantes - 0.2 y - 8.07, carentes de identidad que los caracterice, fueron diligentemente introducidos por el edificador del método para calibrar curvas y ecuaciones a los resultados experimentales, razón por la que se mantienen apartados, mas no condensados en una suma aritmética.
d. Los valores que toma el factor $\boldsymbol{Z_R S_0}$ corresponden a condiciones intrínsecas del ámbito de los Estados Unidos, ya que la población de datos de errores de predicción del tráfico y del desempeño del pavimento que configuran la curva normal y sus respectivas características estadísticas corresponde estrictamente al ámbito de los Estados Unidos. Y no puede, en rigor, guardar semejanza con una curva normal elaborado con datos de diferente ámbito geográfico; ya en este punto se colisiona con un principio propiamente estadístico.
e. La geometría horizontal tiene influencia directa en la caída de servicialidad, ya que, de acuerdo al análisis abordado en el ítem g), el método no incluye el efecto de las fuerzas horizontales sobre el pavimento, factor que puede no ser importante en el país nativo por tener una topografía dominantemente llana, en comparación con los andes peruanos donde las carreteras presentan alto grado de sinuosidad.
f. Tomando en consideración que la humedad del suelo tiene influencia sobre la resistencia, expresada como módulo resiliente $\boldsymbol{M_R}$ de las capas de la estructura del pavimento y sobre el suelo de la subrasante, dicha resistencia está relacionada al factor drenaje, la que a su vez guarda relación con la geometría vertical. En carreteras de buena pendiente, el factor drenaje será favorable a la durabilidad de la estructura, en contraposición a carreteras de baja pendiente.
g. En referencia a la geometría horizontal, si bien los circuitos de la AAHTO Road Test tuvieron tramos curvos, éstos no formaban parte del diseño experimental y no se le incluyeron en el análisis de datos que condujo a las ecuaciones de diseño. Por tanto, las fuerzas horizontales de fricción generadas por inercia de la masa del vehículo no fueron variable de estudio, y como tal, el efecto de estas fuerzas en la deformación, fatiga o deterioro del pavimento no está representado en las fórmulas del método. Lo propio sucede con la geometría vertical, por cuanto el experimento se ha desarrollado en tramos de pendiente uniforme y

baja. Por estar asociado a la capacidad de drenaje de la estructura del pavimento, la pendiente juega un rol importante en la deformación del pavimento en sus diversas formas, siendo las carreteras de baja pendiente longitudinal las más propensas a daños por capacidad de drenaje pobre de sus capas.

Hasta acá se ha tomado prestado el patrimonio del método AASHTO de diseño de pavimento flexible, para resaltar el por qué un método de diseño no puede tener el mismo desempeño en un ámbito fuera de su entorno de origen, y por qué, además, su extrapolación o calibración para un entorno distinto resultaría inviable. Esta visión guarda paralelismo respecto a la aplicación del método NAASRA / AUSTROADS de diseño de pavimentos granulares, desarrollado igualmente, con insumos propios de Australia y Nueva Zelanda.

Instituir un eventual método peruano del tipo AASHTO, resultaría, con seguridad, en tres formulaciones morfológicamente idénticas, con variaciones internas sensibles, acorde al triplete de pisos altitudinales que exhiben las regiones de costa, sierra y selva.

4.8.6 Inaplicabilidad exterior del método Mecanístico-Empírico de AASHTO

Un moderno método de diseño mecanístico-empírico desarrollado por AASHTO, publicado en la guía «Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide – MEPDG», cuyo software fue desarrollado por la NCHRP (National Cooperative Highway Research Program), constituye un ejemplo más palmario de cómo un método no se puede translocar cual espécimen exótico para adaptarlo a entorno distinto. Aspectos relevantes al propósito del estudio son:

- El método se considera mecanístico porque para calcular los esfuerzos y deformaciones en las capas del pavimento sometidas a cargas se basa en principios de mecánica de materiales, que incluye análisis de elementos finitos, teoría de elasticidad, etc.
- Se considera empírico porque relaciona matemáticamente, mediante regresiones estadísticas, esos esfuerzos y deformaciones calculados con el desempeño real observado en el pavimento, tales como ahuellamiento, fisuración por fatiga, agrietamiento térmico, etc.

- En lugar de unos pocos insumos que utiliza la AASHTO ’93, el nuevo método requiere una gran cantidad de datos y un alto nivel de calibración de sus modelos. Así:
  - En lugar del ESAL, requiere el espectro de cargas por eje y por tipo de vehículo, lo cual implica datos de estaciones de pesaje en movimiento.
  - No usa simples coeficientes estructurales, requiere las propiedades mecánicas y viscoelásticas de cada material de capas, por ejemplo, el módulo de elasticidad dinámico del asfalto a diferentes temperaturas, el módulo resiliente de los suelos, etc.
  - Requiere datos climáticos horarios y específicos del lugar de ubicación del proyecto, tales como temperatura, precipitación, humedad, viento, etc., datos que, además, el programa los captura de bancos de datos de estaciones meteorológicas mediante procesos de captura automática o «ingesta» de datos, sin permitir el ingreso manual por el usuario.
- El núcleo del método son sus ecuaciones de predicción de desempeño; es decir, los modelos que estiman la formación de roderas, fisuras, etc. Estos modelos fueron calibrados con datos del programa LTPP (Long-Term Pavement Performance) de los Estados Unidos.
- Aunque parte de un enfoque mecanicista basado en tensiones, deformaciones y criterios de fatiga, su calibración base viene en gran medida de datos de tramos rectos, no introducen explícitamente la acción centrípeta de los vehículos en curvas. En Estados Unidos, donde se probó y calibró, las curvas suelen tener radios amplios, por lo cual, el deslizamiento lateral no es un factor dominante.

En síntesis, el método Mecanístico-Empírico requiere una base de datos local muy amplia y un proceso de calibración extensivo, razón suficiente para que ningún país haya intentado siquiera, adaptarlo a su entorno. Y razón para mantener en uso el tradicional método AASHTO ’93.

4.9 RESUMEN DE LOS MECANISMOS DE DEFORMACIÓN Y APLICABILIDAD DEL MÉTODO

Algunas consecuencias que se pueden vislumbrar acerca del método NAASRA / AUSTROADS que la norma peruana recomienda son:

La fórmula del método ha sido desarrollada y calibrada en un entorno geográfico y climático propios del territorio australiano, y como tal, comporta un vigor tomado de

él y consagrado a este entorno originario. Su eficacia en un entorno distinto se reducirá en la medida en que las facciones de la geografía física local se van diferenciando del aspecto del entorno originario.

En el territorio peruano, el panorama vial de la franja costera caracterizada por secciones largas de carreteras rectas o cuasi rectas, con una densidad baja de curvas y sin variaciones notables de pendientes puede responder, si no de manera óptima, cuanto menos aceptablemente al modelo.

En la región selva, el efecto del rigor climático caracterizado por precipitaciones que superan los 5 000 mm por año y las características físicas de los suelos restan efectividad al desempeño del método.

Respecto a la región sierra es pertinente tratar momentáneamente de manera desglosada los documentos que encarnan el método; por una parte la Guía Austroads (véase Sección 4.8.1), que incluye de manera taxativa el recubrimiento bitumimnoso; y por otra, la norma peruana que adopta el método antedicho relegando el recubrimiento bituminoso, lo que nos permitirá determinar los contextos de su aplicabilidad en el entorno andino, distinción necesaria a consecuencia de la desemejanza en las características físico-geográficas del país originario. Hecho el desglose, es necesario tipificar la infraestructura, en atención a su geometría vertical, teniendo a la pendiente como elemento de interés, y en atención a su geometría horizontal, que nos permitirá analizar su aplicabilidad en tramos sinuosos y en curvas.

Deformaciones en carreteras de pendiente hidráulicamente eficiente

Como se desprende del análisis abordado en 4.5.4, en carreteras de pendiente óptima el drenaje favorable evita la saturación del suelo por exceso de humedad; en consecuencia, las deformaciones por ahuellamiento vertical (Sección 4.7.1) y por formación de surcos (Sección 4.7.3.3) no dan lugar a la pérdida de servicialidad de la vía, aspecto que se ha corroborado en campo. En estas carreteras, el drenaje eficiente evita la deformación por formación de hoyos. En consecuencia, en estos tramos, tanto la Guía Austroads como la norma peruana tienen desempeño aceptable.

Formación de hoyos en carreteras de pendiente hidráulicamente no-drenante

Acorde al análisis abordado en las Secciones 4.5.5 y 4.7.4, estos tramos son severamente afectados por la formación de hoyos. Como se ha discutido en las secciones que anteceden, el método NAASRA / AUSTROADS, cuyo modelo fue desarrollado a partir de carreteras de baja pendiente, contempla el uso de recubrimiento bituminoso, aun cuando las precipitaciones son comparativamente inferiores a las de la sierra peruana e inmensamente inferiores a las de selva.

En consecuencia, en estas carreteras resulta imprescindible aplicar la Guía Austroads en su completa expresión.



Figura 15. Baches en superficie de pendiente nula en el tramo Cunya - Huaychao

Ahuellamiento en secciones curvas de carreteras

Del análisis efectuado en la Sección 4.7.2, la deformación predominante en curvas abiertas es el ahuellamiento reclinado. Bajo condiciones adecuadas de diseño y construcción, este tipo de ahuellamiento no genera demasiada caída de servicialidad, siendo recuperable a través de trabajos de mantenimiento rutinario. En este sentido, en estas secciones se puede aplicar la norma peruana, y con mayor prioridad, la Guía Austroads.



Figura 16. Ahuellamiento reclinado típico en curva

En la Fig. 16, el tráfico se da por una misma rodera en ambos sentidos debido a la estrechez de la calzada, condición que se da con frecuencia en curvas con paso de alcantarilla.

Deformación por pérdida de capa en curvas de volteo

En virtud al análisis abordado en la Sección 4.7.5 se concluye que el método NAASRA / AUSTROADS no incorpora en su calibración el mecanismo de desgaste de las curvas de volteo, y desde ya la norma peruana.

En consecuencia, ni la aplicación de la guía Austroads ni la de la norma peruana surtirán efecto positivo en estas secciones, siendo éstas, el punto de atención del presente estudio.



Figura 17. Típica deformación de la curva de volteo

En la Fig. 17 se observa pendientes longitudinal y transversal muy pronunciadas. El surco tiene origen exógeno a la estructura del firme, pues deriva del drenaje lateral defectuoso.

4.10 ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN A LA DEFORMACIÓN EN CARRETERAS DE PENDIENTE HIDRÁULICAMENTE NO-DRENANTE

En estos tramos es necesario considerar, de manera imperativa, la aplicación estricta de un afirmado estabilizado, para lo cual existe dos vertientes:

a. La aplicación estricta de la Guía Austroads en cuanto al uso de tratamiento superficial bituminoso delgado (Fig. 14). Se tiene experiencia de este tratamiento en caminos vecinales de importancia regional, donde se ha observado las bondades que ofrece en cuanto a durabilidad y confort del usuario.
b. La aplicación de la norma peruana en lo concerniente al uso de estabilizadores que se adapten al entorno ambiental, ocupando la primera prioridad el tratamiento bituminoso delgado, al que se añade el uso de cal hidratada por su inocuidad con el medio ambiente. En el Anexo 3 se presenta el diseño de afirmado con suelo estabilizado con cal, así como del tratamiento superficial bicapa.

4.11 ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN A LA DEFORMACIÓN EN CURVAS DE VOLTEO

Habiendo analizado el mecanismo del desgaste del afirmado en las curvas de volteo, y a la luz de las indagaciones de las condiciones locales donde se llevaron a cabo las mediciones que dieron lugar al desarrollo del método NAASRA / AUSTROAS, queda explícitamente definido que el método, representado por la única fórmula de desarrollo, no puede ser aplicado a curvas de volteo.

Bajo las modalidades de deformación descritas, un incremento del espesor del afirmado como modo de atenuación de la pérdida de capa en estas curvas no es una solución efectiva, habida cuenta de que el perfil de la deformación será la misma bajo condiciones de un afirmado de mayor espesor, que la de un afirmado más delgado.

Las alternativas que mejor responden a estas deformaciones severas según disponibilidad de material y tecnología, son el pavimento rígido y el afirmado

estabilizado con cal. En lo que sigue, se analiza las ventajas comparativas de estas alternativas, precisándose previamente que, antes de emprender la construcción de cualquiera de las estructuras, las obras de drenaje lateral y subsuperficial deben haber sido encauzadas correctamente, pues ningún tratamiento tendrá el comportamiento previsto si el suelo de subrasante y la subbase granular son afectados por las aguas de infiltración.

a. El pavimento de concreto ofrece mayor resistencia al desgaste por frenado y arrastre que un afirmado tratado.
b. En el pavimento de concreto no existe pérdida de material superficial por arrastre hídrico; las partículas superficiales del afirmado tratado se hallan propensos a las abrasión y desprendimiento por acción de la carga de tráfico y, por tanto, a la migración por arrastre hídrico y por desplazamiento del neumático.
c. En estas curvas donde la inercia es nula, las solicitaciones laterales y de tracción son altas; la losa de concreto responde mucho mejor a la deformación plástica que el afirmado tratado con cal.
d. El pavimento de concreto promete mayor vida útil con menos intervenciones que el afirmado tratado con cal.

Especificaciones constructivas

- Pavimento de concreto f'c=210 kg/cm2, de 200 mm de espesor (véase cálculos de diseño en el Anexo 4)
- Subbase granular e=250 mm, compactada al 95% del Proctor modificado
- Juntas térmicas a cada 3 a 5 m en ambos sentidos
- Refuerzos y dowels para transferencia de carga en juntas transversales
- Acabado superficial fratasado y escobillado para macrotextura antideslizante
- Curado humectante por un período mínimo de 7 días y óptimo de 14 días
- Pendiente longitudinal acondicionada a la de la superficie del terreno
- Peralte máximo, 4% en el vértice

El detalle de la sección pavimentada de una curva de volteo se presenta en la Fig. 18.

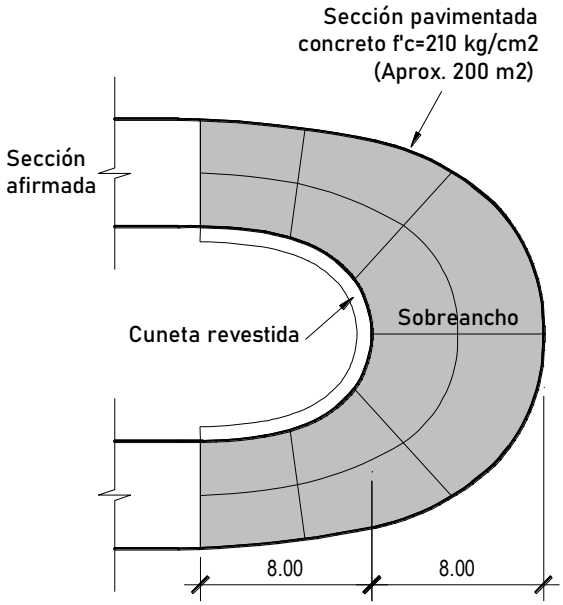


Figura 18. Pavimento de concreto en curva de volteo

CAPÍTULO V
RESULTADOS DE LA PROPUESTA

5.1 RESULTADO GENERAL

Se ha elaborado el documento «Análisis objetivo de la metodología de diseño de pavimento granular adoptada por la norma peruana, a partir de deformaciones observadas en la carretera Uchuraccay – Ccano, del distrito de Uchuraccay – Huanta – Ayacucho», cuyos resultados se plasman en las conclusiones y recomendaciones subsiguientes.

5.2 CONCLUSIONES

- El método de diseño NAASRA / AUSTROADS de diseño de pavimentos granulares adoptada por la norma peruana fue desarrollado en un ambiente físico-geográfico de características muy diferentes al territorio peruano, por lo cual no comporta intrínsecamente los efectos climáticos y las geometrías horizontal y vertical que influyen en gran medida sobre la durabilidad del afirmado en nuestro medio.
- La norma peruana prescinde el uso del recubrimiento bituminoso, elemento activamente presente en el campo experimental del método NAASRA / AUSTROADS, y como tal, factor condicionante en el éxito del método.
- En correspondencia a los anterior, la aplicación del método no exhibe resultados satisfactorios en:
  - Carreteras altamente anfractuosas, característica de los caminos vecinales de la sierra y selva alta peruanas por su elevada densidad de curvas
  - En curvas de volteo
  - En secciones de carreteras de baja pendiente o pendiente nula
  - En carreteras de pendientes antes consideradas excepcionales, pero que en la actualidad, gracias a la modernización de la mecánica automotriz, son aceptadas como normales.
- Si bien, la norma peruana prescribe el uso facultativo del recubrimiento bituminoso, la política de inversiones basada en líneas de corte, limita su aplicabilidad constituyendo una valla para mejorar la calidad del gasto.
- El método NAASRA / AUSTROADS muestra un comportamiento eficaz en carreteras de pendiente favorable al drenaje superficial, comprendido entre el 2.5 y 8.0%.

- La deformación por ahuellamiento reclinado, típico en curvas normales, puede ser mitigado por aplicación de afirmado tratado con cal; no obstante, su servicialidad es recuperable mediante actividades de mantenimiento rutinario.

5.3 IMPLICANCIAS DE LA APLICACIÓN DE LA NORMA PERUANA

Algunas implicancias de la aplicación de la norma peruana en el diseño de pavimentos granulares son:

- Pérdida acelerada de servicialidad general luego de una intervención, por el desgaste prematuro en tramos críticos tales como segmentos de baja pendiente o pendiente nula, en segmentos de pendiente hidráulicamente erosivo, en tramos altamente sinuosos y en curvas de volteo, lo cual da origen al deterioro disparejo de una ruta vial.
- Ineficiente calidad del gasto en infraestructura de caminos vecinales, en sus diversas etapas de intervención: rehabilitación, mantenimiento periódico y mantenimiento rutinario.
- Ineficiente logro de los impactos sociales y económicos de una intervención.

5.4 RECOMENDACIONES RESPECTO A LA NORMATIVA

Del análisis abordado en la Sección 4.8.3, que da cuenta de la diferencias físico-geográficas del territorio peruano respecto al país originario del método, y de la peculiaridad única de la sierra peruana entre los países latinoamericanos, resulta pertinente revisar y modernizar la norma peruana, para lo cual se propone:

- En el plazo inmediato, modernizar la política de inversiones en infraestructura de caminos vecinales, introduciendo mejoras en la normativa y flexibilizando la aplicación de líneas de corte limitativas, que permitan utilizar tecnologías apropiadas para cada contexto en particular, en las actividades de rehabilitación, mantenimiento periódico y rutinario. Esta flexibilización permitirá incorporar elementos que confieran mayor durabilidad a las obras de afirmado.
- Emprender la estructuración de un método propio de diseño, por el momento, de caminos vecinales, que incorporen variables asociadas a las geometrías horizontal y vertical, utilizando como campo experimental la amplia red de estos caminos subtendidos a lo largo y ancho del territorio nacional. Para este propósito es necesario crear un programa presupuestal propio, por un período de duración de cuanto menos 10 años.

5.5 RECOMENDACIONES TÉCNICAS DE APLICACIÓN INMEDIATA

De los análisis abordados a lo largo del estudio se sugieren las siguientes recomendaciones técnicas:

- En concordancia con la Guía Austroads de diseño de pavimentos granulares, utilizar irrestrictamente el recubrimiento betuminoso como capa protectora de la estructura del firme, con la finalidad de obtener resultados satisfactorios previstos por el método en el desempeño de la estructura.
- Las observaciones de campo evidencian una respuesta aceptable del pavimento granular desnudo en carreteras de pendiente óptima (2.6 – 8.0%), lo cual sugiere que la norma peruana puede aplicarse limitativamente a estos tramos.
- En carreteras de escasa pendiente o de pendiente nula (0 – 2.5%) se recomienda utilizar de manera imperativa un método de estabilización, pudiendo optarse por el tratamiento con cal o el recubrimiento bituminoso, en ese orden de prioridad.
- En curvas de volteo de radio estrecho y elevada pendiente, resultado del análisis abordado en la Sección 4.7.5, se considera conveniente el uso de pavimento rígido, de concreto f'c=210 kg/cm2.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

Alabama Departamento of Transportation. GASP N° 22-GA0044 – Lime Stabilized Roadbed. Alabama, USA, 2024.

AUSTROADS, Pavement Design - A Guide to the Structural Design of Roads Pavements. Sydney - Australia, 2004.

Basset, Christelle Nabil. Utilizing data science for insight into soil-water interactions. University of California, Davis. California – USA, 2024.

Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) – Australian Government. Australian rainfall – past, present and future. Australia, 2011.

Federal Highway Administration (FHWA). Soil and Base Stabilization and Associated Drainage Considerations, Volume II – Mixture Design Considerations. Washington D. C., 1992.

Juárez Badillo – Rico Rodríguez. Mecánica de Suelos – Tomo I: Fundamentos de la mecánica de suelos. Tercera edición. Editorial Limusa. México, 1980.

Karl Terzaghi. Theoretical Soil Mechanics. USA, 1943.

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. Glosario de términos de uso frecuente en proyectos de infraestructura vial. Lima, 2018.

Ministerio de Transportes y comunicaciones. Manual de carreteras – Suelos, geología, geotecnia y pavimentos – Sección Suelos y pavimentos. Lima, 2013.

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. Soluciones básicas en carreteras no pavimentadas. Lima, 2015.

Miroslav Kutílek. Saturated and unsaturated flow. The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics- College on Soil Physics. Czech Republic, 2001.

National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Report 128. Evaluation of AASHO Interim Guides for Design of Pavement Structures. Oakland, California, 1972.

National Lime Association – Boletín 326. Manual de Estabilización de suelo tratado con cal – Estabilización y modificación con cal. Arlington – Texas – USA, 2004.

Pan Ming Huang, Yuncong Li, Malcolm E. Sumner. Handbook of Soil Sciences – Properties and Processes. England, 2012

R. Byron Bird, Warren E. Stewart y Edwin N. Lightfoot. Fenómenos de Transporte. Editorial Reverté S. A. España, 1980.

Transportation Research Committee (TRC). Layer Coefficient / ACHM Stabilized Base. University of Arkansas, 1995.

U.S. Army Corps of Engineers (USACE) - Naval Facilities Engineering Command (NAVFAC) - Air Force Civil Engineer Center (AFCEC). Pavement Design for Roads and Parking Areas - Unified Facilities Criteria – UFC 3-250-01, USA, 2016.

ANEXOS

Anexo 1: Cálculo de Número de ejes equivalentes EE (ESAL)

Anexo 2: Diseño de afirmado

Anexo 3: Diseño de afirmado estabilizado con cal

Anexo 4: Diseño de pavimento rígido

ANEXO 1

CÁLCULO DE ESAL

ANEXO 1A

CÁLCULO DE ESAL - SECCIÓN I

ANEXO 1A

ESTUDIO DE CLASIFICACION VEHICULAR

CAMINO VECINAL	UCHURACCAY - CCANO		ESTACION	E-1	
UBICACIÓN	CUNYA KM 13+310		FECHA	LUN -28	04	2025

HORA	SENTIDO	AUTO	CAMIONETAS		MICRO	BUS		CAMION			SEMITRÁILER				TRÁILER				TOTAL
			PICKUP	RURAL		2E	3E	2E	3E	4E	2S1/2S2	2S3	3S1/3S2	>=3S3	2T2	2T3	3T2	3T3	
	DIAGRA. VEH																			
0	HUANTA-CCANO																		0
1	CCANO-HUANTA																		0
1	HUANTA-CCANO																		0
2	CCANO-HUANTA																		0
2	HUANTA-CCANO																		0
3	CCANO-HUANTA																		0
3	HUANTA-CCANO																		0
4	CCANO-HUANTA																		0
4	HUANTA-CCANO																		0
5	CCANO-HUANTA	1	1																2
5	HUANTA-CCANO	1		1				1											3
6	CCANO-HUANTA																		0
6	HUANTA-CCANO	1	1						1										3
7	CCANO-HUANTA							1											1
7	HUANTA-CCANO		1																1
8	CCANO-HUANTA		1			1			1										3
8	HUANTA-CCANO	1		1															2
9	CCANO-HUANTA		1	1															2
9	HUANTA-CCANO																		0
10	CCANO-HUANTA	1						1											2
10	HUANTA-CCANO		1	1															2
11	CCANO-HUANTA	1							1										2
11	HUANTA-CCANO																		0
12	CCANO-HUANTA		1	1															2
12	HUANTA-CCANO	1																	1
13	CCANO-HUANTA		1						1										2
13	HUANTA-CCANO	1	1	1															3
14	CCANO-HUANTA	1				1													2
14	HUANTA-CCANO	1	1					1											3
15	CCANO-HUANTA		1	1															2
15	HUANTA-CCANO	1																	1
16	CCANO-HUANTA	2		1															3
16	HUANTA-CCANO																		0
17	CCANO-HUANTA	1																	1
17	HUANTA-CCANO		1	1					1										3
18	CCANO-HUANTA	1																	1
18	HUANTA-CCANO	1	1	1		1													4
19	CCANO-HUANTA	1	1					1											3
19	HUANTA-CCANO	1	1																2
20	CCANO-HUANTA			1															1
20	HUANTA-CCANO																		0
21	CCANO-HUANTA																		0
21	HUANTA-CCANO																		0
22	CCANO-HUANTA																		0
22	HUANTA-CCANO																		0
23	CCANO-HUANTA																		0
23	HUANTA-CCANO																		0
24	CCANO-HUANTA																		0
TOTAL	HUANTA-CCANO	9	8	6	-	1	-	2	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28
	CCANO-HUANTA	9	7	5	-	2	-	3	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	29

ANEXO 1A

ESTUDIO DE CLASIFICACION VEHICULAR

TROCHA CARROZABLE	UCHURACCAY - CCANO	ESTACION	E-1
UBICACION	CUNYA KM 13+310	FECHA	MAR-29 / 04 / 2025

HORA	SENTIDO	AUTO	CAMIONETAS		MICRO	BUS		CAMION			SEMITRÁILER				TRÁILER				TOTAL
			PICKUP	RURAL		2E	3E	2E	3E	4E	2S1/2S2	2S3	3S1/3S2	>=3S3	2T2	2T3	3T2	3T3	
	DIAGRA. VEH																		
0	HUANTA-CCANO																		0
1	CCANO-HUANTA																		0
1	HUANTA-CCANO																		0
2	CCANO-HUANTA																		0
2	HUANTA-CCANO																		0
3	CCANO-HUANTA																		0
3	HUANTA-CCANO																		0
4	CCANO-HUANTA	1																	1
4	HUANTA-CCANO	1	1						1										3
5	CCANO-HUANTA			1															1
5	HUANTA-CCANO	1						1											2
6	CCANO-HUANTA																		0
6	HUANTA-CCANO	1	1						1										3
7	CCANO-HUANTA			1															1
7	HUANTA-CCANO	1						1											2
8	CCANO-HUANTA																		0
8	HUANTA-CCANO			1															1
9	CCANO-HUANTA		1						1										2
9	HUANTA-CCANO	1																	1
10	CCANO-HUANTA		1																1
10	HUANTA-CCANO			1															1
11	CCANO-HUANTA		1	1				1											3
11	HUANTA-CCANO		1																1
12	CCANO-HUANTA																		0
12	HUANTA-CCANO		1	1															2
13	CCANO-HUANTA	1																	1
13	HUANTA-CCANO			1															1
14	CCANO-HUANTA	1	1					1	1										4
14	HUANTA-CCANO																		0
15	CCANO-HUANTA	1	1																2
15	HUANTA-CCANO			1															1
16	CCANO-HUANTA	1	1																2
16	HUANTA-CCANO																		0
17	CCANO-HUANTA	1	1	1															3
17	HUANTA-CCANO		1	1															2
18	CCANO-HUANTA																		0
18	HUANTA-CCANO								1										1
19	CCANO-HUANTA	1	1					1											3
19	HUANTA-CCANO																		0
20	CCANO-HUANTA			1															1
20	HUANTA-CCANO			1															1
21	CCANO-HUANTA																		0
21	HUANTA-CCANO																		0
22	CCANO-HUANTA																		0
22	HUANTA-CCANO																		0
23	CCANO-HUANTA																		0
23	HUANTA-CCANO																		0
24	CCANO-HUANTA																		0
TOTAL	HUANTA-CCANO	5	5	7	-	-	-	2	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	22
	CCANO-HUANTA	7	8	5	-	-	-	3	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25

ANEXO 1A

ESTUDIO DE CLASIFICACION VEHICULAR

Trocha Carrozable	UCHURACCAY - CCANO		ESTACION	E-1	
UBICACION	CUNYA KM 13+310		FECHA	MIE-30	04	2025

HORA	SENTIDO	AUTO	CAMIONETAS		MICRO	BUS		CAMION			SEMITRAILER				TRAILER				TOTAL
			PICKUP	RURAL		2E	3E	2E	3E	4E	2S1/2S2	2S3	3S1/3S2	>=3S3	2T2	2T3	3T2	3T3	
	DIAGRA. VEH																			
0	HUANTA-CCANO																		0
1	CCANO-HUANTA																		0
1	HUANTA-CCANO																		0
2	CCANO-HUANTA																		0
2	HUANTA-CCANO																		0
3	CCANO-HUANTA																		0
3	HUANTA-CCANO																		0
4	CCANO-HUANTA		1																1
4	HUANTA-CCANO	1		1															2
5	CCANO-HUANTA							1	1										2
5	HUANTA-CCANO	1	1	1															3
6	CCANO-HUANTA																		0
6	HUANTA-CCANO	1		1				1											3
7	CCANO-HUANTA																		0
7	HUANTA-CCANO	1		1															2
8	CCANO-HUANTA		1																1
8	HUANTA-CCANO	1		1					1										3
9	CCANO-HUANTA							1											1
9	HUANTA-CCANO	1	1	1															3
10	CCANO-HUANTA																		0
10	HUANTA-CCANO																		0
11	CCANO-HUANTA	1						1											2
11	HUANTA-CCANO		1	1															2
12	CCANO-HUANTA								1										1
12	HUANTA-CCANO		1																1
13	CCANO-HUANTA	1																	1
13	HUANTA-CCANO																		0
14	CCANO-HUANTA	1	1	1				1											4
14	HUANTA-CCANO								1										1
15	CCANO-HUANTA	1		1															2
15	HUANTA-CCANO																		0
16	CCANO-HUANTA	1	1						1										3
16	HUANTA-CCANO							1											1
17	CCANO-HUANTA	1	1	1															3
17	HUANTA-CCANO																		0
18	CCANO-HUANTA	1	1	1															3
18	HUANTA-CCANO							1											1
19	CCANO-HUANTA			1															1
19	HUANTA-CCANO		1																1
20	CCANO-HUANTA			1															1
20	HUANTA-CCANO																		0
21	CCANO-HUANTA																		0
21	HUANTA-CCANO																		0
22	CCANO-HUANTA																		0
22	HUANTA-CCANO																		0
23	CCANO-HUANTA																		0
23	HUANTA-CCANO																		0
24	CCANO-HUANTA																		0
TOTAL	HUANTA-CCANO	6	5	7	-	-	-	3	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	23
	CCANO-HUANTA	7	6	6	-	-	-	4	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	26

ANEXO 1A

ESTUDIO DE CLASIFICACION VEHICULAR

Trocha Carrozable	UCHURACCAY - CCANO		ESTACION	E-1	
UBICACION	CUNYA KM 13+310		FECHA	JUE-1	05	2025

HORA	SENTIDO	AUTO	CAMIONETAS		MICRO	BUS		CAMION			SEMITRAILER				TRAILER				TOTAL
			PICKUP	RURAL		2E	3E	2E	3E	4E	2S1/2S2	2S3	3S1/3S2	>=3S3	2T2	2T3	3T2	3T3	
	DIAGRA. VEH																		
0	HUANTA-CCANO																		0
1	CCANO-HUANTA																		0
1	HUANTA-CCANO																		0
2	CCANO-HUANTA																		0
2	HUANTA-CCANO																		0
3	CCANO-HUANTA																		0
3	HUANTA-CCANO	1																	1
4	CCANO-HUANTA		1																1
4	HUANTA-CCANO	1		1															2
5	CCANO-HUANTA							1											1
5	HUANTA-CCANO	1	1																2
6	CCANO-HUANTA																		0
6	HUANTA-CCANO	1		1				1											3
7	CCANO-HUANTA		1	1															2
7	HUANTA-CCANO								1										1
8	CCANO-HUANTA			1															1
8	HUANTA-CCANO	1	1																2
9	CCANO-HUANTA																		0
9	HUANTA-CCANO	1		1															2
10	CCANO-HUANTA																		0
10	HUANTA-CCANO		1	1															2
11	CCANO-HUANTA	1							1										2
11	HUANTA-CCANO			1															1
12	CCANO-HUANTA	1																	1
12	HUANTA-CCANO		1																1
13	CCANO-HUANTA	1		1				1											3
13	HUANTA-CCANO																		0
14	CCANO-HUANTA	1	1	1					1										4
14	HUANTA-CCANO																		0
15	CCANO-HUANTA	1	1	1															3
15	HUANTA-CCANO																		0
16	CCANO-HUANTA	1		1				1											3
16	HUANTA-CCANO		1																1
17	CCANO-HUANTA		1	1															2
17	HUANTA-CCANO	1	1						1										3
18	CCANO-HUANTA																		0
18	HUANTA-CCANO		1	1				1											3
19	CCANO-HUANTA			1															1
19	HUANTA-CCANO		1					1											2
20	CCANO-HUANTA		1																1
20	HUANTA-CCANO							1											1
21	CCANO-HUANTA																		0
21	HUANTA-CCANO																		0
22	CCANO-HUANTA																		0
22	HUANTA-CCANO																		0
23	CCANO-HUANTA																		0
23	HUANTA-CCANO																		0
24	CCANO-HUANTA																		0
TOTAL	HUANTA-CCANO	7	8	6	-	-	-	4	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	27
	CCANO-HUANTA	6	6	8	-	-	-	3	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25

ANEXO 1A

ESTUDIO DE CLASIFICACION VEHICULAR

Trocha Carrozable	UCHURACCAY - CCANO		ESTACION	E-1	
UBICACION	CUNYA KM 13+310		FECHA	VIE-2	05	2025

HORA	SENTIDO	AUTO	CAMIONETAS		MICRO	BUS		CAMION			SEMITRAILER				TRAILER				TOTAL
			PICKUP	RURAL		2E	3E	2E	3E	4E	2S1/2S2	2S3	3S1/3S2	>=3S3	2T2	2T3	3T2	3T3	
	DIAGRA. VEH																			
0	HUANTA-CCANO																		0
1	CCANO-HUANTA																		0
1	HUANTA-CCANO																		0
2	CCANO-HUANTA																		0
2	HUANTA-CCANO																		0
3	CCANO-HUANTA																		0
3	HUANTA-CCANO																		0
4	CCANO-HUANTA		1																1
4	HUANTA-CCANO	1		1															2
5	CCANO-HUANTA																		0
5	HUANTA-CCANO	1	1						1										3
6	CCANO-HUANTA			1															1
6	HUANTA-CCANO	1						1											2
7	CCANO-HUANTA		1																1
7	HUANTA-CCANO	1		1															2
8	CCANO-HUANTA																		0
8	HUANTA-CCANO	1	1	1				1											4
9	CCANO-HUANTA								1										1
9	HUANTA-CCANO	1		1															2
10	CCANO-HUANTA		1																1
10	HUANTA-CCANO			1				1											2
11	CCANO-HUANTA		1																1
11	HUANTA-CCANO		1	1															2
12	CCANO-HUANTA							1											1
12	HUANTA-CCANO		1																1
13	CCANO-HUANTA	1		1															2
13	HUANTA-CCANO		1																1
14	CCANO-HUANTA	1		1															2
14	HUANTA-CCANO								1										1
15	CCANO-HUANTA	1	1	1				1											4
15	HUANTA-CCANO																		0
16	CCANO-HUANTA	1		1															2
16	HUANTA-CCANO																		0
17	CCANO-HUANTA	1	1	1					1										4
17	HUANTA-CCANO																		0
18	CCANO-HUANTA	1		1															2
18	HUANTA-CCANO																		0
19	CCANO-HUANTA	1	1	1				1											4
19	HUANTA-CCANO		1																1
20	CCANO-HUANTA	1	1																2
20	HUANTA-CCANO		1																1
21	CCANO-HUANTA																		0
21	HUANTA-CCANO																		0
22	CCANO-HUANTA																		0
22	HUANTA-CCANO																		0
23	CCANO-HUANTA																		0
23	HUANTA-CCANO																		0
24	CCANO-HUANTA																		0
TOTAL	HUANTA-CCANO	6	7	6	-	-	-	3	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	24
	CCANO-HUANTA	8	8	8	-	-	-	3	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	29

ANEXO 1A

ESTUDIO DE CLASIFICACION VEHICULAR

Trocha Carrozable	UCHURACCAY - CCANO
UBICACION	CUNYA KM 13+310

ESTACION	E-1		
FECHA	SAB-3	05	2025

HORA	SENTIDO	AUTO	CAMIONETAS		MICRO	BUS		CAMION			SEMITRAILER				TRAILER				TOTAL
			PICKUP	RURAL		2E	3E	2E	3E	4E	2S1/2S2	2S3	3S1/3S2	>=3S3	2T2	2T3	3T2	3T3	
	DIAGRA. VEH																		
0	HUANTA-CCANO																		0
1	CCANO-HUANTA																		0
1	HUANTA-CCANO																		0
2	CCANO-HUANTA																		0
2	HUANTA-CCANO																		0
3	CCANO-HUANTA																		0
3	HUANTA-CCANO																		0
4	CCANO-HUANTA		1																1
4	HUANTA-CCANO		1																1
5	CCANO-HUANTA																		0
5	HUANTA-CCANO		1					1											2
6	CCANO-HUANTA	1		1															2
6	HUANTA-CCANO																		0
7	CCANO-HUANTA							1											1
7	HUANTA-CCANO	1	1																2
8	CCANO-HUANTA			1					1										2
8	HUANTA-CCANO	1						1											2
9	CCANO-HUANTA		1																1
9	HUANTA-CCANO																		0
10	CCANO-HUANTA	1		1															2
10	HUANTA-CCANO		2	1					1										4
11	CCANO-HUANTA																		0
11	HUANTA-CCANO	1	1	1				1											4
12	CCANO-HUANTA																		0
12	HUANTA-CCANO																		0
13	CCANO-HUANTA	1		1															2
13	HUANTA-CCANO								1										1
14	CCANO-HUANTA	1	1	1															3
14	HUANTA-CCANO	1		1															2
15	CCANO-HUANTA		1						1										2
15	HUANTA-CCANO																		0
16	CCANO-HUANTA	1	1					1											3
16	HUANTA-CCANO			1															1
17	CCANO-HUANTA		1								1								2
17	HUANTA-CCANO	1		1															2
18	CCANO-HUANTA								1										1
18	HUANTA-CCANO		1	1															2
19	CCANO-HUANTA	1		1				1	1										4
19	HUANTA-CCANO		1	1															2
20	CCANO-HUANTA	1																	1
20	HUANTA-CCANO		1																1
21	CCANO-HUANTA																		0
21	HUANTA-CCANO																		0
22	CCANO-HUANTA																		0
22	HUANTA-CCANO																		0
23	CCANO-HUANTA																		0
23	HUANTA-CCANO																		0
24	CCANO-HUANTA																		0
TOTAL	HUANTA-CCANO	5	9	7	-	-	-	3	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	26
	CCANO-HUANTA	7	6	6	-	-	-	3	4	-	1	-	-	-	-	-	-	-	27

ANEXO 1A

ESTUDIO DE CLASIFICACION VEHICULAR

TROCHA CARROZABLE	UCHURACCAY - CCANO	ESTACION	E-1
UBICACION	CUNYA KM 13+310	FECHA	DOM-4 / 05 / 2025

HORA	SENTIDO	AUTO	CAMIONETAS		MICRO	BUS		CAMION			SEMITRAILER				TRAILER				TOTAL
			PICKUP	RURAL		2E	3E	2E	3E	4E	2S1/2S2	2S3	3S1/3S2	>=3S3	2T2	2T3	3T2	3T3	
	DIAGRA. VEH																		
0	HUANTA-CCANO																		0
1	CCANO-HUANTA																		0
1	HUANTA-CCANO																		0
2	CCANO-HUANTA																		0
2	HUANTA-CCANO																		0
3	CCANO-HUANTA																		0
3	HUANTA-CCANO																		0
4	CCANO-HUANTA																		0
4	HUANTA-CCANO		1	1															2
5	CCANO-HUANTA																		0
5	HUANTA-CCANO	1		1															2
6	CCANO-HUANTA		1																1
6	HUANTA-CCANO	1	1	1				1											4
7	CCANO-HUANTA																		0
7	HUANTA-CCANO	1							1										2
8	CCANO-HUANTA		1					1											2
8	HUANTA-CCANO		1	1															2
9	CCANO-HUANTA	1																	1
9	HUANTA-CCANO			1															1
10	CCANO-HUANTA																		0
10	HUANTA-CCANO		1					1	1										3
11	CCANO-HUANTA	1																	1
11	HUANTA-CCANO			1															1
12	CCANO-HUANTA		1																1
12	HUANTA-CCANO			1															1
13	CCANO-HUANTA		1					1											2
13	HUANTA-CCANO	1							1										2
14	CCANO-HUANTA		1					1											2
14	HUANTA-CCANO	1																	1
15	CCANO-HUANTA		1	1					1										3
15	HUANTA-CCANO																		0
16	CCANO-HUANTA	1	1	1															3
16	HUANTA-CCANO		1																1
17	CCANO-HUANTA	1	1	1				1	1										5
17	HUANTA-CCANO																		0
18	CCANO-HUANTA	1																	1
18	HUANTA-CCANO	2	1																3
19	CCANO-HUANTA			1					1										2
19	HUANTA-CCANO		1					1											2
20	CCANO-HUANTA			1															1
20	HUANTA-CCANO																		0
21	CCANO-HUANTA																		0
21	HUANTA-CCANO																		0
22	CCANO-HUANTA																		0
22	HUANTA-CCANO																		0
23	CCANO-HUANTA																		0
23	HUANTA-CCANO																		0
24	CCANO-HUANTA																		0
TOTAL	HUANTA-CCANO	7	7	7	-	-	-	3	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	27
	CCANO-HUANTA	5	8	5	-	-	-	4	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25

ANEXO 1A

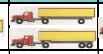
CÁLCULO DE IMD

CAMINO VECINAL	UCHURACCAY - CCANO
ESTACIÓN	E-1
UBICACIÓN	CUNYA KM 13+310

Año base: 2025

Factor de corrección estacional (Fce)	Vehículos livianos	1.0000
	Vehículos pesados	1.0000

Tasa de crecimiento vehicular	Vehículos livianos	1.18 %
	Vehículos pesados	3.60 %
Período de diseño		10 Años

FECHA	SENTIDO	AUTO	CAMIONETAS		MICRO	BUS		CAMION			SEMI TRAYLER				TRAYLER				TOTAL
			PICKUP	RURAL		2E	3E	2E	3E	4E	2S1/2S2	2S3	3S1/3S2	>=3S3	2T2	2T3	3T2	3T3	
																				
LUN 28/04/2025	HUANTA-CCANO	9	8	6	-	1	-	2	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28
	CCANO - HUANTA	9	7	5	-	2	-	3	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	29
	TOTAL	18	15	11	-	3	-	5	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	57
MAR 29/04/2025	HUANTA-CCANO	5	5	7	-	-	-	2	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	22
	CCANO - HUANTA	7	8	5	-	-	-	3	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25
	TOTAL	12	13	12	-	-	-	5	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	47
MIE 30/04/2025	HUANTA-CCANO	6	5	7	-	-	-	3	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	23
	CCANO - HUANTA	7	6	6	-	-	-	4	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	26
	TOTAL	13	11	13	-	-	-	7	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	49
JUE 01/05/2025	HUANTA-CCANO	7	8	6	-	-	-	4	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	27
	CCANO - HUANTA	6	6	8	-	-	-	3	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25
	TOTAL	13	14	14	-	-	-	7	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	52
VIE 02/05/2025	HUANTA-CCANO	6	7	6	-	-	-	3	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	24
	CCANO - HUANTA	8	8	8	-	-	-	3	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	29
	TOTAL	14	15	14	-	-	-	6	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	53
SAB 03/05/2025	HUANTA-CCANO	5	9	7	-	-	-	3	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	26
	CCANO - HUANTA	7	6	6	-	-	-	3	4	-	1	-	-	-	-	-	-	-	27
	TOTAL	12	15	13	-	-	-	6	6	-	1	-	-	-	-	-	-	-	53
DOM 04/05/2025	HUANTA-CCANO	7	7	7	-	-	-	3	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	27
	CCANO - HUANTA	5	8	5	-	-	-	4	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25
	TOTAL	12	15	12	-	-	-	7	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	52
IMDsemanal	HUANTA-CCANO	6	7	7	-	0	-	3	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25
	CCANO - HUANTA	7	7	6	-	0	-	3	3	-	0	-	-	-	-	-	-	-	27
	TOTAL	13	14	13	-	0	-	6	5	-	0	-	-	-	-	-	-	-	52
IMDcorregido (IMDsemanal x Fce)	HUANTA-CCANO	6	7	7	-	0	-	3	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25
	CCANO - HUANTA	7	7	6	-	0	-	3	3	-	0	-	-	-	-	-	-	-	27
	TOTAL	13	14	13	-	0	-	6	5	-	0	-	-	-	-	-	-	-	52
IMDdiseño (IMDcorregido x T_R)		**15**	**16**	**14**	**-**	**0**	**-**	**8**	**7**	**-**	**0**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**61**

1. Ecuación para cálculo de tasa de crecimiento y proyección

$$T_R = T_0(1 + R_t)^{n-1}$$

ANEXO 1A

CÁLCULO DE ESAL

Tipo de vehículo			IMDdiseño (veh/día)	Tipo de eje	N° de ruedas	Carga/eje (t)	Pavimento flexible		Pavimento rígido	
							Fv	$ESAL_0$	Fv	$ESAL_0$
OMNIBUS		AUTO	15	SIMPLE	2	1	0.0005270	0.00787	0.0004364	0.00651
			15	SIMPLE	2	1	0.0005270	0.00787	0.0004364	0.00651
		PICKUP	16	SIMPLE	2	1	0.0005270	0.00820	0.0004364	0.00679
			16	SIMPLE	2	1	0.0005270	0.00820	0.0004364	0.00679
		RURAL	14	SIMPLE	2	1	0.0005270	0.00745	0.0004364	0.00617
			14	SIMPLE	2	1	0.0005270	0.00745	0.0004364	0.00617
		MICRO	0	SIMPLE	2	1	0.0005270	0.00000	0.0004364	0.00000
			0	SIMPLE	2	1	0.0005270	0.00000	0.0004364	0.00000
OMNIBUS		2E	0	SIMPLE	2	7	1.2653667	0.54230	1.2728342	0.54550
			0	SIMPLE	4	11	3.2382870	1.38784	3.3348263	1.42921
		3E	0	SIMPLE	2	7	1.2653667	0	1.2728342	0
			0	TANDEM	8	16	1.2605850	0	2.1335371	0
CAMIÓN		2E	8	SIMPLE	2	7	1.2653667	10.68623	1.2728342	10.74930
			8	SIMPLE	4	11	3.2382870	27.34787	3.3348263	28.16316
		3E	7	SIMPLE	2	7	1.2653667	8.69810	1.2728342	8.74943
			7	TANDEM	8	18	2.0192135	13.88002	3.4580044	23.77023
		4E	0	SIMPLE	2	7	1.2653667	0	1.2728342	0
			0	TRIDEM	12	23	1.2324186	0	2.9837274	0
SEMITRÁILER		2S1/2S2	0	SIMPLE	2	7	1.2653667	0.18077	1.2728342	0.18183
			0	SIMPLE	4	11	3.2382870	0.46261	3.3348263	0.47640
			0	TANDEM	8	18	2.0192135	0.28846	3.4580044	0.49400
		2S3	0	SIMPLE	2	7	1.2653667	0	1.2728342	0
			0	SIMPLE	4	11	3.2382870	0	3.3348263	0
			0	TRIDEM	12	25	1.7060262	0	4.1649313	0
		3S1/3S2	0	SIMPLE	2	7	1.2653667	0	1.2728342	0
			0	TANDEM	8	18	2.0192135	0	3.4580044	0
			0	TANDEM	8	18	2.0192135	0	3.4580044	0
		>=3S3	0	SIMPLE	2	7	1.2653667	0	1.2728342	0
			0	TANDEM	8	18	2.0192135	0	3.4580044	0
			0	TRIDEM	12	25	1.7060262	0	4.1649313	0
TRÁILER		2T2	0	SIMPLE	2	7	1.2653667	0	1.2728342	0
			0	SIMPLE	4	11	3.2382870	0	3.3348263	0
			0	SIMPLE	4	11	3.2382870	0	3.3348263	0
			0	SIMPLE	4	11	3.2382870	0	3.3348263	0
		2T3	0	SIMPLE	2	7	1.2653667	0	1.2728342	0
			0	SIMPLE	4	11	3.2382870	0	3.3348263	0
			0	SIMPLE	4	11	3.2382870	0	3.3348263	0
			0	TANDEM	8	18	2.0192135	0	3.4580044	0
		3T2	0	SIMPLE	2	7	1.2653667	0	1.2728342	0
			0	TANDEM	8	18	2.0192135	0	3.4580044	0
			0	SIMPLE	4	11	3.2382870	0	3.3348263	0
			0	SIMPLE	4	11	3.2382870	0	3.3348263	0
		3T3	0	SIMPLE	2	7	1.2653667	0	1.2728342	0
			0	TANDEM	8	18	2.0192135	0	3.4580044	0
			0	SIMPLE	4	11	3.2382870	0	3.3348263	0
			0	TANDEM	8	18	2.0192135	0	3.4580044	0
	$ESAL_0$ = Σ(IMDdiseño x Fv) de camiones pesados*							**63.47420**		**74.55906**

(*) Fv es el factor de relación de cargas por eje para cómputo de eje equivalente de 8.2 t

El aporte de vehículos livianos al deterioro del pavimento es insignificante, por ello es práctica común trabajar con datos de vehículos pesados.

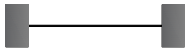
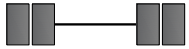
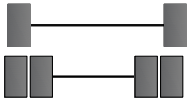
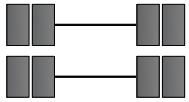
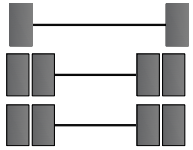
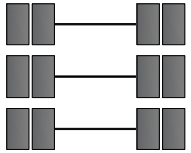
ESAL = $ESAL_0$ x 365 x Fca x Fd x Fc x Fp

Factores para cálculo de ESAL		Pavimento flexible	Pavimento rígido
$ESAL_0$		63.47420	74.55906
Tasa de crecimiento vehicular de vehículos pesados	(r)	3.60 %	3.60 %
Período de diseño	(n)	10 Años	20 Años
Factor de crecimiento acumulado para el período de diseño	(Fca)	11.7858	28.5721
Factor direccional	(Fd)	0.5	0.5
Factor carril	(Fc)	1.0	1.0
Factor presión de neumático	(Fp)	1.0	1.0
ESAL		**136,527**	**388,781**

$$F_{ca} = \frac{(1+r)^n - 1}{r}$$

ANEXO 1A

Configuración de ejes y relación de cargas por ejes para determinar ejes equivalentes

Ejes	Nomenclatura	N° de ruedas	Gráfico	Relación de cargas por ejes (Fv) para cómputo de ejes equivalentes ($EE_{8.2\ ton}$)	
				Afirmado, pavimento rígido, pavimento semirrígido	Pavimento rígido
EJE SIMPLE (con rueda simple)	1RS	2		$EE_{S1} = [P/6.6]^{4.0}$	$EE_{S1} = [P/6.6]^{4.1}$
EJE SIMPLE (con rueda doble)	1RD	4		$EE_{S2} = [P/8.2]^{4.0}$	$EE_{S2} = [P/8.2]^{4.1}$
EJE TANDEM (1 eje rueda simple + 1 eje rueda doble)	1RS + 1RD	6		$EE_{TA1} = [P/14.8]^{4.0}$	$EE_{TA1} = [P/13.0]^{4.1}$
EJE TANDEM (2 ejes rueda doble)	2DR	8		$EE_{TA2} = [P/15.1]^{4.0}$	$EE_{TA2} = [P/13.3]^{4.1}$
EJE TRIDEM (1 rueda simple + 2 ejes rueda doble)	1RS + 2RD	10		$EE_{TR1} = [P/20.7]^{3.9}$	$EE_{TR1} = [P/16.6]^{4.0}$
EJE TRIDEM (3 ejes rueda doble)	3RD	12		$EE_{TR2} = [P/21.8]^{3.9}$	$EE_{TR2} = [P/17.5]^{4.0}$

RS: Rueda simple
RD: Rueda doble
P: Peso real por eje en toneladas

ANEXO 1A

Factores de distribución direccional y de carril para determinar el tránsito en el carril de diseño

Número de calzadas	Número de sentidos	Número de carriles por sentido	Factor direccional (Fd)	Factor carril (Fc)	Factor ponderado para carril de diseño (Fd x Fc)
1 calzada (para IMDa total de la calzada)	1 sentido	1	1	1	1
	1 sentido	2	1	0.8	0.8
	1 sentido	3	1	0.6	0.6
	1 sentido	4	1	0.5	0.5
	2 sentidos	1	0.5	1	0.5
	2 sentidos	2	0.5	0.8	0.4
2 calzadas con separador central (para IMDa total de las dos calzadas)	2 sentidos	1	0.5	1	0.5
	2 sentidos	2	0.5	0.8	0.4
	2 sentidos	3	0.5	0.6	0.3
	2 sentidos	4	0.5	0.5	0.25

Manual de Carreteras - Sección Suelos y Pavimentos, pág. 62

ANEXO 1A

Factor de ajuste por presión de neumático (Fp) para ejes equivalente (EE)

Espesor de capa de rodadura (mm)	Presión de contacto de neumático (PCN) en psc						
	80	**90**	**100**	**110**	**120**	**130**	**140**
50	1.00	1.30	1.80	2.13	2.91	3.59	4.37
60	1.00	1.33	1.72	2.18	2.69	3.27	3.92
70	1.00	1.30	1.65	2.05	2.49	2.99	3.53
80	1.00	1.28	1.59	1.94	2.32	2.74	3.20
90	1.00	1.25	1.53	1.84	2.17	2.52	2.91
100	1.00	1.23	1.48	1.75	2.04	2.35	2.68
110	1.00	1.21	1.43	1.66	1.91	2.17	2.44
120	1.00	1.19	1.38	1.59	1.80	2.02	2.25
130	1.00	1.17	1.34	1.52	1.70	1.89	2.09
140	1.00	1.15	1.30	1.46	1.62	1.78	1.94
150	1.00	1.13	1.26	1.39	1.52	1.66	1.79
160	1.00	1.12	1.24	1.36	1.47	1.59	1.71
170	1.00	1.11	1.21	1.31	1.41	1.51	1.61
180	1.00	1.09	1.18	1.27	1.36	1.45	1.53
190	1.00	1.08	1.16	1.24	1.31	1.39	1.46
200	1.00	1.08	1.15	1.22	1.28	1.35	1.41

PCN = 0.90 x PIN (en psi)
donde PIN es la presión de inflado de neumático, y está referido al promedio de presiones de inflado de neumáticos por tipo de vehíclo pesado.
Para espesores menores de capa de rodadura asfáltica aplicar el factor de ajuste correspondiente al de 50 mm

ANEXO 1B

CÁLCULO DE ESAL - SECCIÓN II

ANEXO 1B

ESTUDIO DE CLASIFICACION VEHICULAR

CAMINO VECINAL	UCHURACCAY - CCANO	ESTACION	E-1
UBICACIÓN	CUNYA KM 13+310	FECHA	LUN -28 / 04 / 2025

HORA	SENTIDO	AUTO	CAMIONETAS		MICRO	BUS		CAMION			SEMITRÁILER				TRÁILER				TOTAL
			PICKUP	RURAL		2E	3E	2E	3E	4E	2S1/2S2	2S3	3S1/3S2	>=3S3	2T2	2T3	3T2	3T3	
	DIAGRA. VEH																		
0	HUANTA-CCANO																		0
1	CCANO-HUANTA																		0
1	HUANTA-CCANO																		0
2	CCANO-HUANTA																		0
2	HUANTA-CCANO																		0
3	CCANO-HUANTA																		0
3	HUANTA-CCANO																		0
4	CCANO-HUANTA																		0
4	HUANTA-CCANO		1																1
5	CCANO-HUANTA	1	2	2															5
5	HUANTA-CCANO	1	2	2				1											6
6	CCANO-HUANTA		3	1															4
6	HUANTA-CCANO	1	2	2					1										6
7	CCANO-HUANTA		3	1				1			1								6
7	HUANTA-CCANO	2	1	2															5
8	CCANO-HUANTA		1	3		1			1										6
8	HUANTA-CCANO	1	2	1				1											5
9	CCANO-HUANTA	1	2	1	1														5
9	HUANTA-CCANO		1	1					1										3
10	CCANO-HUANTA	1		2				1											4
10	HUANTA-CCANO		2	2	1														5
11	CCANO-HUANTA	2	3						1										6
11	HUANTA-CCANO																		0
12	CCANO-HUANTA		1	2					1										4
12	HUANTA-CCANO	1		3															4
13	CCANO-HUANTA		3					1	1										5
13	HUANTA-CCANO		2	2	1						1								6
14	CCANO-HUANTA	2		1		1													4
14	HUANTA-CCANO	1	2	1				1											5
15	CCANO-HUANTA		1	2															3
15	HUANTA-CCANO	1		3	1				1										6
16	CCANO-HUANTA	2		2							1								5
16	HUANTA-CCANO		2	3															5
17	CCANO-HUANTA	1		1	1			1											4
17	HUANTA-CCANO		1	1					1										3
18	CCANO-HUANTA	1		1															2
18	HUANTA-CCANO	1	1	1		1													4
19	CCANO-HUANTA	1	1	3				1											6
19	HUANTA-CCANO	1	1																2
20	CCANO-HUANTA			1															1
20	HUANTA-CCANO																		0
21	CCANO-HUANTA																		0
21	HUANTA-CCANO																		0
22	CCANO-HUANTA																		0
22	HUANTA-CCANO																		0
23	CCANO-HUANTA																		0
23	HUANTA-CCANO																		0
24	CCANO-HUANTA																		0
TOTAL	HUANTA-CCANO	10	20	24	3	1	-	3	4	-	1	-	-	-	-	-	-	-	66
	CCANO-HUANTA	12	20	23	2	2	-	5	4	-	2	-	-	-	-	-	-	-	70

ANEXO 1B

ESTUDIO DE CLASIFICACION VEHICULAR

TROCHA CARROZABLE	UCHURACCAY - CCANO	ESTACION	E-1
UBICACION	CUNYA KM 13+310	FECHA	MAR-29 / 04 / 2025

HORA	SENTIDO	AUTO	CAMIONETAS		MICRO	BUS		CAMION			SEMITRÁILER				TRÁILER				TOTAL
			PICKUP	RURAL		2E	3E	2E	3E	4E	2S1/2S2	2S3	3S1/3S2	>=3S3	2T2	2T3	3T2	3T3	
	DIAGRA. VEH																		
0	HUANTA-CCANO																		0
1	CCANO-HUANTA																		0
1	HUANTA-CCANO																		0
2	CCANO-HUANTA																		0
2	HUANTA-CCANO																		0
3	CCANO-HUANTA																		0
3	HUANTA-CCANO							1											1
4	CCANO-HUANTA	1																	1
4	HUANTA-CCANO	1	1	2					1										5
5	CCANO-HUANTA		2	1															3
5	HUANTA-CCANO	1	3	1				1			1								7
6	CCANO-HUANTA	2	2	3		1													8
6	HUANTA-CCANO	1	1	1					1										4
7	CCANO-HUANTA			1															1
7	HUANTA-CCANO	1	2	2				1											6
8	CCANO-HUANTA		3	2															5
8	HUANTA-CCANO	2	2	1	1														6
9	CCANO-HUANTA		1	2					1										4
9	HUANTA-CCANO	1	3	2		1													7
10	CCANO-HUANTA	2	2	2					1										7
10	HUANTA-CCANO		2	1				1											4
11	CCANO-HUANTA		1	1	1														3
11	HUANTA-CCANO	2	3	3					1										9
12	CCANO-HUANTA		2			1													3
12	HUANTA-CCANO		1	1															2
13	CCANO-HUANTA	1		2				1			1								5
13	HUANTA-CCANO		2	1															3
14	CCANO-HUANTA	1	3						1										5
14	HUANTA-CCANO	2		3	1			1											7
15	CCANO-HUANTA	1	2						1										4
15	HUANTA-CCANO			1															1
16	CCANO-HUANTA	1	1	3															5
16	HUANTA-CCANO		2			1													3
17	CCANO-HUANTA	1	1	1	1			1											5
17	HUANTA-CCANO		2	1															3
18	CCANO-HUANTA		3	3					1		1								8
18	HUANTA-CCANO								1										1
19	CCANO-HUANTA	1	1					1											3
19	HUANTA-CCANO			3															3
20	CCANO-HUANTA		2	1															3
20	HUANTA-CCANO			1															1
21	CCANO-HUANTA																		0
21	HUANTA-CCANO																		0
22	CCANO-HUANTA																		0
22	HUANTA-CCANO																		0
23	CCANO-HUANTA																		0
23	HUANTA-CCANO																		0
24	CCANO-HUANTA																		0
TOTAL	HUANTA-CCANO	11	24	24	2	2	-	5	4	-	1	-	-	-	-	-	-	-	73
	CCANO-HUANTA	11	26	22	2	2	-	3	5	-	2	-	-	-	-	-	-	-	73

ANEXO 1B

ESTUDIO DE CLASIFICACION VEHICULAR

Trocha Carrozable	UCHURACCAY - CCANO
UBICACION	CUNYA KM 13+310

ESTACION	E-1		
FECHA	MIE-30	04	2025

HORA	SENTIDO	AUTO	CAMIONETAS		MICRO	BUS		CAMION			SEMITRAILER				TRAILER				TOTAL
			PICKUP	RURAL		2E	3E	2E	3E	4E	2S1/2S2	2S3	3S1/3S2	>=3S3	2T2	2T3	3T2	3T3	
	DIAGRA. VEH																		
0	HUANTA-CCANO																		0
1	CCANO-HUANTA																		0
1	HUANTA-CCANO																		0
2	CCANO-HUANTA																		0
2	HUANTA-CCANO																		0
3	CCANO-HUANTA																		0
3	HUANTA-CCANO								1										1
4	CCANO-HUANTA		1																1
4	HUANTA-CCANO	1	1	1				1											4
5	CCANO-HUANTA			3															3
5	HUANTA-CCANO	1	2	1		1													5
6	CCANO-HUANTA	2	3																5
6	HUANTA-CCANO	1		1				1											3
7	CCANO-HUANTA		2	3					1		1								7
7	HUANTA-CCANO	1	1	2				1											5
8	CCANO-HUANTA		1	3	1														5
8	HUANTA-CCANO	1	3	1		1			1										7
9	CCANO-HUANTA		3	3				1											7
9	HUANTA-CCANO	1	1	1															3
10	CCANO-HUANTA		2	2	1				1										6
10	HUANTA-CCANO	2		1															3
11	CCANO-HUANTA	2	3					1											6
11	HUANTA-CCANO		2	1															3
12	CCANO-HUANTA			3					1										4
12	HUANTA-CCANO		2	3															5
13	CCANO-HUANTA	1		1				1											3
13	HUANTA-CCANO	2	3	2	1														8
14	CCANO-HUANTA	1	1	1		1		1											5
14	HUANTA-CCANO				1				1		1								3
15	CCANO-HUANTA	1	3	1				1											6
15	HUANTA-CCANO	2	3	2															7
16	CCANO-HUANTA	1	1	1		1			1										5
16	HUANTA-CCANO		2	2				1											5
17	CCANO-HUANTA	1	1	1															3
17	HUANTA-CCANO		3	3	1			1											8
18	CCANO-HUANTA	1	2	1															4
18	HUANTA-CCANO		1	3				1											5
19	CCANO-HUANTA		1	1															2
19	HUANTA-CCANO		1	3															4
20	CCANO-HUANTA		1	1															2
20	HUANTA-CCANO		1																1
21	CCANO-HUANTA																		0
21	HUANTA-CCANO																		0
22	CCANO-HUANTA																		0
22	HUANTA-CCANO																		0
23	CCANO-HUANTA																		0
23	HUANTA-CCANO																		0
24	CCANO-HUANTA																		0
TOTAL	HUANTA-CCANO	12	26	27	3	2	-	6	3	-	1	-	-	-	-	-	-	-	80
	CCANO-HUANTA	10	25	25	2	2	-	5	4	-	1	-	-	-	-	-	-	-	74

ANEXO 1B

ESTUDIO DE CLASIFICACION VEHICULAR

Trocha Carrozable	UCHURACCAY - CCANO	ESTACION	E-1
UBICACION	CUNYA KM 13+310	FECHA	JUE-1 / 05 / 2025

HORA	SENTIDO	AUTO	CAMIONETAS		MICRO	BUS		CAMION			SEMITRAILER				TRAILER				TOTAL
			PICKUP	RURAL		2E	3E	2E	3E	4E	2S1/2S2	2S3	3S1/3S2	>=3S3	2T2	2T3	3T2	3T3	
	DIAGRA. VEH																			
0	HUANTA-CCANO																		0
1	CCANO-HUANTA																		0
1	HUANTA-CCANO																		0
2	CCANO-HUANTA																		0
2	HUANTA-CCANO																		0
3	CCANO-HUANTA																		0
3	HUANTA-CCANO	1																	1
4	CCANO-HUANTA		1	3															4
4	HUANTA-CCANO	1		1					1										3
5	CCANO-HUANTA	2	1					1											4
5	HUANTA-CCANO	1	1	3							1								6
6	CCANO-HUANTA		2																2
6	HUANTA-CCANO	1	2	1				1											5
7	CCANO-HUANTA	2	1	2		1													6
7	HUANTA-CCANO		1		1				1										3
8	CCANO-HUANTA		3	2															5
8	HUANTA-CCANO	1	1					1											3
9	CCANO-HUANTA		2	2					2										6
9	HUANTA-CCANO	1	3	2															6
10	CCANO-HUANTA		2		1														3
10	HUANTA-CCANO	2	1	2															5
11	CCANO-HUANTA	1	3	3					1										8
11	HUANTA-CCANO		1	2				1											4
12	CCANO-HUANTA	1	3																4
12	HUANTA-CCANO		1																1
13	CCANO-HUANTA	1	3	1				1			1								7
13	HUANTA-CCANO	2	2		1														5
14	CCANO-HUANTA	1	1	1		1			1										5
14	HUANTA-CCANO		3	3				1											7
15	CCANO-HUANTA	1	1	1	1														4
15	HUANTA-CCANO		2			1			2										5
16	CCANO-HUANTA	1		1				1											3
16	HUANTA-CCANO	2	3	3	1														9
17	CCANO-HUANTA		1	1															2
17	HUANTA-CCANO		1	3					1										5
18	CCANO-HUANTA		2	1															3
18	HUANTA-CCANO		1	1				1											3
19	CCANO-HUANTA		1	1															2
19	HUANTA-CCANO		1					1											2
20	CCANO-HUANTA		1																1
20	HUANTA-CCANO																		0
21	CCANO-HUANTA							1											1
21	HUANTA-CCANO																		0
22	CCANO-HUANTA																		0
22	HUANTA-CCANO																		0
23	CCANO-HUANTA																		0
23	HUANTA-CCANO																		0
24	CCANO-HUANTA																		0
TOTAL	HUANTA-CCANO	12	24	21	3	1	-	6	5	-	1	-	-	-	-	-	-	-	73
	CCANO-HUANTA	10	28	19	2	2	-	4	4	-	1	-	-	-	-	-	-	-	70

ANEXO 1B

ESTUDIO DE CLASIFICACION VEHICULAR

Trocha Carrozable	UCHURACCAY - CCANO		ESTACION	E-1	
UBICACION	CUNYA KM 13+310		FECHA	VIE-2	05	2025

HORA	SENTIDO	AUTO	CAMIONETAS		MICRO	BUS		CAMION			SEMITRAILER				TRAILER				TOTAL
			PICKUP	RURAL		2E	3E	2E	3E	4E	2S1/2S2	2S3	3S1/3S2	>=3S3	2T2	2T3	3T2	3T3	
	DIAGRA. VEH																			
0	HUANTA-CCANO																		0
1	CCANO-HUANTA																		0
1	HUANTA-CCANO																		0
2	CCANO-HUANTA																		0
2	HUANTA-CCANO																		0
3	CCANO-HUANTA																		0
3	HUANTA-CCANO																		0
4	CCANO-HUANTA		1																1
4	HUANTA-CCANO	1	1	1															3
5	CCANO-HUANTA	2	1	3															6
5	HUANTA-CCANO	1	2						1										4
6	CCANO-HUANTA		3	2															5
6	HUANTA-CCANO	1		3	1			1											6
7	CCANO-HUANTA	2	2																4
7	HUANTA-CCANO	1		1					1										3
8	CCANO-HUANTA		2	3		1													6
8	HUANTA-CCANO	1	1	1				2											5
9	CCANO-HUANTA	2	2		1				1										6
9	HUANTA-CCANO	1	3	2							1								7
10	CCANO-HUANTA			3															3
10	HUANTA-CCANO		2	1				1											4
11	CCANO-HUANTA	2	1	1					1										5
11	HUANTA-CCANO		1	2															3
12	CCANO-HUANTA		3	3	1			1											8
12	HUANTA-CCANO	2	2																4
13	CCANO-HUANTA	1		2					1										4
13	HUANTA-CCANO		1	3															4
14	CCANO-HUANTA	1	2	1	1						1								6
14	HUANTA-CCANO		2	1					1										4
15	CCANO-HUANTA	1	1	1				1											4
15	HUANTA-CCANO	2	2			1			1										6
16	CCANO-HUANTA	1		1															2
16	HUANTA-CCANO		3	3	1														7
17	CCANO-HUANTA	1	1	1					1										4
17	HUANTA-CCANO	2	2																4
18	CCANO-HUANTA	1		1		1													3
18	HUANTA-CCANO		2	3															5
19	CCANO-HUANTA		1					1			1								3
19	HUANTA-CCANO	1	1		1														3
20	CCANO-HUANTA	1	1					1											3
20	HUANTA-CCANO		1																1
21	CCANO-HUANTA							1											1
21	HUANTA-CCANO																		0
22	CCANO-HUANTA																		0
22	HUANTA-CCANO																		0
23	CCANO-HUANTA																		0
23	HUANTA-CCANO																		0
24	CCANO-HUANTA																		0
TOTAL	HUANTA-CCANO	13	26	21	3	1	-	4	4	-	1	-	-	-	-	-	-	-	73
	CCANO-HUANTA	15	21	22	3	2	-	5	4	-	2	-	-	-	-	-	-	-	74

ANEXO 1B

ESTUDIO DE CLASIFICACION VEHICULAR

Trocha Carrozable	UCHURACCAY - CCANO		ESTACION	E-1	
UBICACION	CUNYA KM 13+310		FECHA	SAB-3	05	2025

HORA	SENTIDO	AUTO	CAMIONETAS		MICRO	BUS		CAMION			SEMITRAILER				TRAILER				TOTAL
			PICKUP	RURAL		2E	3E	2E	3E	4E	2S1/2S2	2S3	3S1/3S2	>=3S3	2T2	2T3	3T2	3T3	
	DIAGRA. VEH																			
0	HUANTA-CCANO																		0
1	CCANO-HUANTA																		0
1	HUANTA-CCANO																		0
2	CCANO-HUANTA																		0
2	HUANTA-CCANO																		0
3	CCANO-HUANTA																		0
3	HUANTA-CCANO																		0
4	CCANO-HUANTA		1																1
4	HUANTA-CCANO		1																1
5	CCANO-HUANTA		1																1
5	HUANTA-CCANO		2	2				1	1										6
6	CCANO-HUANTA	1	2	1															4
6	HUANTA-CCANO	2	3	2					1										8
7	CCANO-HUANTA			3				1											4
7	HUANTA-CCANO	2	2	2		1					1								8
8	CCANO-HUANTA			1	1				1										3
8	HUANTA-CCANO	1	3	3				1											8
9	CCANO-HUANTA	2	1	3															6
9	HUANTA-CCANO			2				1											3
10	CCANO-HUANTA	1	3	1															5
10	HUANTA-CCANO	2	2	2	1			1	1		1								10
11	CCANO-HUANTA	2	2																4
11	HUANTA-CCANO	1	1	1				1											4
12	CCANO-HUANTA		2	3		1													6
12	HUANTA-CCANO		2																2
13	CCANO-HUANTA	1	2	2	1														6
13	HUANTA-CCANO	2	2	3					1										8
14	CCANO-HUANTA	2	2	2				1											7
14	HUANTA-CCANO	1	3	1															5
15	CCANO-HUANTA	2	2	2	1				1										8
15	HUANTA-CCANO	2	2	3															7
16	CCANO-HUANTA	1	1	2				1											5
16	HUANTA-CCANO		3	1	1														5
17	CCANO-HUANTA		2	3					1		1								7
17	HUANTA-CCANO	1		1		1													3
18	CCANO-HUANTA		3	3				1	1										8
18	HUANTA-CCANO		2	1	1														4
19	CCANO-HUANTA	1	2	1				1	1										6
19	HUANTA-CCANO		1	1															2
20	CCANO-HUANTA		1																1
20	HUANTA-CCANO		1																1
21	CCANO-HUANTA		1																1
21	HUANTA-CCANO																		0
22	CCANO-HUANTA																		0
22	HUANTA-CCANO																		0
23	CCANO-HUANTA																		0
23	HUANTA-CCANO																		0
24	CCANO-HUANTA																		0
TOTAL	HUANTA-CCANO	14	30	25	3	2	-	5	4	-	2	-	-	-	-	-	-	-	85
	CCANO-HUANTA	13	28	27	3	1	-	5	5	-	1	-	-	-	-	-	-	-	83

ANEXO 1B

ESTUDIO DE CLASIFICACION VEHICULAR

TROCHA CARROZABLE	UCHURACCAY - CCANO	ESTACION	E-1
UBICACION	CUNYA KM 13+310	FECHA	DOM-4 / 05 / 2025

HORA	SENTIDO	AUTO	CAMIONETAS		MICRO	BUS		CAMION			SEMITRAILER				TRAILER				TOTAL
			PICKUP	RURAL		2E	3E	2E	3E	4E	2S1/2S2	2S3	3S1/3S2	>=3S3	2T2	2T3	3T2	3T3	
	DIAGRA. VEH																			
0	HUANTA-CCANO																		0
1	CCANO-HUANTA																		0
1	HUANTA-CCANO																		0
2	CCANO-HUANTA																		0
2	HUANTA-CCANO																		0
3	CCANO-HUANTA																		0
3	HUANTA-CCANO																		0
4	CCANO-HUANTA		1																1
4	HUANTA-CCANO		1	1															2
5	CCANO-HUANTA		2	1															3
5	HUANTA-CCANO	1	1	1															3
6	CCANO-HUANTA	2	1	3	1				1										8
6	HUANTA-CCANO	1	2	1				1											5
7	CCANO-HUANTA			1		1					1								3
7	HUANTA-CCANO	1	3	1	1				1										7
8	CCANO-HUANTA	2	2	3				1											8
8	HUANTA-CCANO		2	1															3
9	CCANO-HUANTA	1	3	3															7
9	HUANTA-CCANO	2		1				2											5
10	CCANO-HUANTA	2	2	1	1														6
10	HUANTA-CCANO		3	1				1	1										6
11	CCANO-HUANTA	2	3	3		1													9
11	HUANTA-CCANO		3	1	1			1											6
12	CCANO-HUANTA	2	2																4
12	HUANTA-CCANO		2	1															3
13	CCANO-HUANTA		1					1											2
13	HUANTA-CCANO	2	3	3		1			1										10
14	CCANO-HUANTA		1					1											2
14	HUANTA-CCANO	2	1	3	1						1								8
15	CCANO-HUANTA		2	2					1										5
15	HUANTA-CCANO	2	2	3		1													8
16	CCANO-HUANTA	1	1	2				1											5
16	HUANTA-CCANO	2	3																5
17	CCANO-HUANTA	1	1	1				1	1										5
17	HUANTA-CCANO			3							1								4
18	CCANO-HUANTA	1	3	2															6
18	HUANTA-CCANO	2	1					1											4
19	CCANO-HUANTA		3	3					1										7
19	HUANTA-CCANO		2	3				1											6
20	CCANO-HUANTA		2	1															3
20	HUANTA-CCANO		1																1
21	CCANO-HUANTA		1																1
21	HUANTA-CCANO																		0
22	CCANO-HUANTA																		0
22	HUANTA-CCANO																		0
23	CCANO-HUANTA																		0
23	HUANTA-CCANO																		0
24	CCANO-HUANTA																		0
TOTAL	HUANTA-CCANO	15	30	24	3	2	-	7	3	-	2	-	-	-	-	-	-	-	86
	CCANO-HUANTA	14	31	26	2	2	-	5	4	-	1	-	-	-	-	-	-	-	85

ANEXO 1B

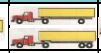
CÁLCULO DE IMD

CAMINO VECINAL	UCHURACCAY - CCANO
ESTACIÓN	E-1
UBICACIÓN	CUNYA KM 13+310

Año base: 2025

Factor de corrección estacional (Fce)	Vehículos livianos	1.0000
	Vehículos pesados	1.0000

Tasa de crecimiento vehicular	Vehículos livianos	1.18 %
	Vehículos pesados	3.60 %
Período de diseño		10 Años

FECHA	SENTIDO	AUTO	CAMIONETAS		MICRO	BUS		CAMION			SEMI TRAYLER				TRAYLER				TOTAL
			PICKUP	RURAL		2E	3E	2E	3E	4E	2S1/2S2	2S3	3S1/3S2	>=3S3	2T2	2T3	3T2	3T3	
																				
LUN 28/04/2025	HUANTA-CCANO	10	20	24	3	1	-	3	4	-	1	-	-	-	-	-	-	-	66
	CCANO - HUANTA	12	20	23	2	2	-	5	4	-	2	-	-	-	-	-	-	-	70
	TOTAL	22	40	47	5	3	-	8	8	-	3	-	-	-	-	-	-	-	136
MAR 29/04/2025	HUANTA-CCANO	11	24	24	2	2	-	5	4	-	1	-	-	-	-	-	-	-	73
	CCANO - HUANTA	11	26	22	2	2	-	3	5	-	2	-	-	-	-	-	-	-	73
	TOTAL	22	50	46	4	4	-	8	9	-	3	-	-	-	-	-	-	-	146
MIE 30/04/2025	HUANTA-CCANO	12	26	27	3	2	-	6	3	-	1	-	-	-	-	-	-	-	80
	CCANO - HUANTA	10	25	25	2	2	-	5	4	-	1	-	-	-	-	-	-	-	74
	TOTAL	22	51	52	5	4	-	11	7	-	2	-	-	-	-	-	-	-	154
JUE 01/05/2025	HUANTA-CCANO	12	24	21	3	1	-	6	5	-	1	-	-	-	-	-	-	-	73
	CCANO - HUANTA	10	28	19	2	2	-	4	4	-	1	-	-	-	-	-	-	-	70
	TOTAL	22	52	40	5	3	-	10	9	-	2	-	-	-	-	-	-	-	143
VIE 02/05/2025	HUANTA-CCANO	13	26	21	3	1	-	4	4	-	1	-	-	-	-	-	-	-	73
	CCANO - HUANTA	15	21	22	3	2	-	5	4	-	2	-	-	-	-	-	-	-	74
	TOTAL	28	47	43	6	3	-	9	8	-	3	-	-	-	-	-	-	-	147
SAB 03/05/2025	HUANTA-CCANO	14	30	25	3	2	-	5	4	-	2	-	-	-	-	-	-	-	85
	CCANO - HUANTA	13	28	27	3	1	-	5	5	-	1	-	-	-	-	-	-	-	83
	TOTAL	27	58	52	6	3	-	10	9	-	3	-	-	-	-	-	-	-	168
DOM 04/05/2025	HUANTA-CCANO	15	30	24	3	2	-	7	3	-	2	-	-	-	-	-	-	-	86
	CCANO - HUANTA	14	31	26	2	2	-	5	4	-	1	-	-	-	-	-	-	-	85
	TOTAL	29	61	50	5	4	-	12	7	-	3	-	-	-	-	-	-	-	171
IMDsemanal	HUANTA-CCANO	12	26	24	3	2	-	5	4	-	1	-	-	-	-	-	-	-	77
	CCANO - HUANTA	12	26	23	2	2	-	5	4	-	1	-	-	-	-	-	-	-	76
	TOTAL	25	51	47	5	3	-	10	8	-	3	-	-	-	-	-	-	-	152
IMDcorregido (IMDsemanal x Fce)	HUANTA-CCANO	12	26	24	3	2	-	5	4	-	1	-	-	-	-	-	-	-	77
	CCANO - HUANTA	12	26	23	2	2	-	5	4	-	1	-	-	-	-	-	-	-	76
	TOTAL	25	51	47	5	3	-	10	8	-	3	-	-	-	-	-	-	-	152
IMDdiseño (IMDcorregido x T_R)		**27**	**57**	**52**	**6**	**3**	**-**	**13**	**11**	**-**	**3**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**173**

1. Ecuación para cálculo de tasa de crecimiento y proyección

$$T_R = T_0(1 + R_t)^{n-1}$$

ANEXO 1B

CÁLCULO DE ESAL

Tipo de vehículo			IMDdiseño (veh/día)	Tipo de eje	N° de ruedas	Carga/eje (t)	Pavimento flexible		Pavimento rígido	
							Fv	$ESAL_0$	Fv	$ESAL_0$
OMNIBUS		AUTO	27	SIMPLE	2	1	0.0005270	0.01439	0.0004364	0.01192
			27	SIMPLE	2	1	0.0005270	0.01439	0.0004364	0.01192
		PICKUP	57	SIMPLE	2	1	0.0005270	0.03004	0.0004364	0.02487
			57	SIMPLE	2	1	0.0005270	0.03004	0.0004364	0.02487
		RURAL	52	SIMPLE	2	1	0.0005270	0.02761	0.0004364	0.02286
			52	SIMPLE	2	1	0.0005270	0.02761	0.0004364	0.02286
		MICRO	6	SIMPLE	2	1	0.0005270	0.00301	0.0004364	0.00249
			6	SIMPLE	2	1	0.0005270	0.00301	0.0004364	0.00249
OMNIBUS		2E	3	SIMPLE	2	7	1.2653667	4.33840	1.2728342	4.36400
			3	SIMPLE	4	11	3.2382870	11.10270	3.3348263	11.43369
		3E	0	SIMPLE	2	7	1.2653667	0	1.2728342	0
			0	TANDEM	8	16	1.2605850	0	2.1335371	0
CAMIÓN		2E	13	SIMPLE	2	7	1.2653667	16.89916	1.2728342	16.99889
			13	SIMPLE	4	11	3.2382870	43.24780	3.3348263	44.53709
		3E	11	SIMPLE	2	7	1.2653667	14.16547	1.2728342	14.24907
			11	TANDEM	8	18	2.0192135	22.60460	3.4580044	38.71151
		4E	0	SIMPLE	2	7	1.2653667	0	1.2728342	0
			0	TRIDEM	12	23	1.2324186	0	2.9837274	0
SEMITRÁILER		2S1/2S2	3	SIMPLE	2	7	1.2653667	3.43457	1.2728342	3.45484
			3	SIMPLE	4	11	3.2382870	8.78964	3.3348263	9.05167
			3	TANDEM	8	18	2.0192135	5.48072	3.4580044	9.38601
		2S3	0	SIMPLE	2	7	1.2653667	0	1.2728342	0
			0	SIMPLE	4	11	3.2382870	0	3.3348263	0
			0	TRIDEM	12	25	1.7060262	0	4.1649313	0
		3S1/3S2	0	SIMPLE	2	7	1.2653667	0	1.2728342	0
			0	TANDEM	8	18	2.0192135	0	3.4580044	0
			0	TANDEM	8	18	2.0192135	0	3.4580044	0
		>=3S3	0	SIMPLE	2	7	1.2653667	0	1.2728342	0
			0	TANDEM	8	18	2.0192135	0	3.4580044	0
			0	TRIDEM	12	25	1.7060262	0	4.1649313	0
TRÁILER		2T2	0	SIMPLE	2	7	1.2653667	0	1.2728342	0
			0	SIMPLE	4	11	3.2382870	0	3.3348263	0
			0	SIMPLE	4	11	3.2382870	0	3.3348263	0
			0	SIMPLE	4	11	3.2382870	0	3.3348263	0
		2T3	0	SIMPLE	2	7	1.2653667	0	1.2728342	0
			0	SIMPLE	4	11	3.2382870	0	3.3348263	0
			0	SIMPLE	4	11	3.2382870	0	3.3348263	0
			0	TANDEM	8	18	2.0192135	0	3.4580044	0
		3T2	0	SIMPLE	2	7	1.2653667	0	1.2728342	0
			0	TANDEM	8	18	2.0192135	0	3.4580044	0
			0	SIMPLE	4	11	3.2382870	0	3.3348263	0
			0	SIMPLE	4	11	3.2382870	0	3.3348263	0
		3T3	0	SIMPLE	2	7	1.2653667	0	1.2728342	0
			0	TANDEM	8	18	2.0192135	0	3.4580044	0
			0	SIMPLE	4	11	3.2382870	0	3.3348263	0
			0	TANDEM	8	18	2.0192135	0	3.4580044	0
	$ESAL_0$ = Σ(IMDdiseño x Fv) de camiones pesados*							**130.06305**		**152.18678**

(*) Fv es el factor de relación de cargas por eje para cómputo de eje equivalente de 8.2 t

El aporte de vehículos livianos al deterioro del pavimento es insignificante, por ello es práctica común trabajar con datos de vehículos pesados.

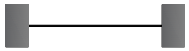
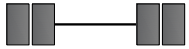
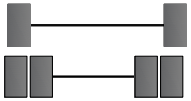
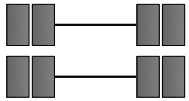
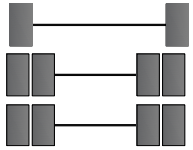
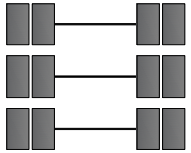
ESAL = $ESAL_0$ x 365 x Fca x Fd x Fc x Fp

Factores para cálculo de ESAL		Pavimento flexible	Pavimento rígido
$ESAL_0$		130.06305	152.18678
Tasa de crecimiento vehicular de vehículos pesados	(r)	3.60 %	3.60 %
Período de diseño	(n)	10 Años	20 Años
Factor de crecimiento acumulado para el período de diseño	(Fca)	11.7858	28.5721
Factor direccional	(Fd)	0.5	0.5
Factor carril	(Fc)	1.0	1.0
Factor presión de neumático	(Fp)	1.0	1.0
ESAL		**279,753**	**793,563**

$$F_{ca} = \frac{(1+r)^n - 1}{r}$$

ANEXO 1B

Configuración de ejes y relación de cargas por ejes para determinar ejes equivalentes

Ejes	Nomenclatura	N° de ruedas	Gráfico	Relación de cargas por ejes (Fv) para cómputo de ejes equivalentes ($EE_{8.2\ ton}$)	
				Afirmado, pavimento rígido, pavimento semirrígido	Pavimento rígido
EJE SIMPLE (con rueda simple)	1RS	2		$EE_{S1} = [P/6.6]^{4.0}$	$EE_{S1} = [P/6.6]^{4.1}$
EJE SIMPLE (con rueda doble)	1RD	4		$EE_{S2} = [P/8.2]^{4.0}$	$EE_{S2} = [P/8.2]^{4.1}$
EJE TANDEM (1 eje rueda simple + 1 eje rueda doble)	1RS + 1RD	6		$EE_{TA1} = [P/14.8]^{4.0}$	$EE_{TA1} = [P/13.0]^{4.1}$
EJE TANDEM (2 ejes rueda doble)	2DR	8		$EE_{TA2} = [P/15.1]^{4.0}$	$EE_{TA2} = [P/13.3]^{4.1}$
EJE TRIDEM (1 rueda simple + 2 ejes rueda doble)	1RS + 2RD	10		$EE_{TR1} = [P/20.7]^{3.9}$	$EE_{TR1} = [P/16.6]^{4.0}$
EJE TRIDEM (3 ejes rueda doble)	3RD	12		$EE_{TR2} = [P/21.8]^{3.9}$	$EE_{TR2} = [P/17.5]^{4.0}$

RS: Rueda simple
RD: Rueda doble
P: Peso real por eje en toneladas

ANEXO 1B

Factores de distribución direccional y de carril para determinar el tránsito en el carril de diseño

Número de calzadas	Número de sentidos	Número de carriles por sentido	Factor direccional (Fd)	Factor carril (Fc)	Factor ponderado para carril de diseño (Fd x Fc)
1 calzada (para IMDa total de la calzada)	1 sentido	1	1	1	1
	1 sentido	2	1	0.8	0.8
	1 sentido	3	1	0.6	0.6
	1 sentido	4	1	0.5	0.5
	2 sentidos	1	0.5	1	0.5
	2 sentidos	2	0.5	0.8	0.4
2 calzadas con separador central (para IMDa total de las dos calzadas)	2 sentidos	1	0.5	1	0.5
	2 sentidos	2	0.5	0.8	0.4
	2 sentidos	3	0.5	0.6	0.3
	2 sentidos	4	0.5	0.5	0.25

Manual de Carreteras - Sección Suelos y Pavimentos, pág. 62

ANEXO 1B

Factor de ajuste por presión de neumático (Fp) para ejes equivalente (EE)

Espesor de capa de rodadura (mm)	Presión de contacto de neumático (PCN) en psc						
	80	90	100	110	120	130	140
50	1.00	1.30	1.80	2.13	2.91	3.59	4.37
60	1.00	1.33	1.72	2.18	2.69	3.27	3.92
70	1.00	1.30	1.65	2.05	2.49	2.99	3.53
80	1.00	1.28	1.59	1.94	2.32	2.74	3.20
90	1.00	1.25	1.53	1.84	2.17	2.52	2.91
100	1.00	1.23	1.48	1.75	2.04	2.35	2.68
110	1.00	1.21	1.43	1.66	1.91	2.17	2.44
120	1.00	1.19	1.38	1.59	1.80	2.02	2.25
130	1.00	1.17	1.34	1.52	1.70	1.89	2.09
140	1.00	1.15	1.30	1.46	1.62	1.78	1.94
150	1.00	1.13	1.26	1.39	1.52	1.66	1.79
160	1.00	1.12	1.24	1.36	1.47	1.59	1.71
170	1.00	1.11	1.21	1.31	1.41	1.51	1.61
180	1.00	1.09	1.18	1.27	1.36	1.45	1.53
190	1.00	1.08	1.16	1.24	1.31	1.39	1.46
200	1.00	1.08	1.15	1.22	1.28	1.35	1.41

PCN = 0.90 x PIN (en psi)
donde PIN es la presión de inflado de neumático, y está referido al promedio de presiones de inflado de neumáticos por tipo de vehíclo pesado.
Para espesores menores de capa de rodadura asfáltica aplicar el factor de ajuste correspondiente al de 50 mm

ANEXO 2

Diseño de afirmado

Se reproduce la ecuación de la Guía Austroads para el diseño de pavimento granular, en su expresión prístina, ya presentada en la sección 4.7.1, la cual está dada por:

$$e = [219 - 211(logCBR) + 58(logCBR)^2)]log\left(N_{rep}/120\right)$$

donde:

1. De los estudios de mecánica de suelos se ha seleccionado, para cada sección, valores de CBR de diseño presentados en la siguiente tabla, que corresponde suelos desfavorablemente más representativos en cuanto a capacidad de carga de la subrasante.

Sección	CBR (%)
I. Cumbre Saccsahuillca – Uchuraccay – Cunya - Pucaccasa	17.4
II. Pucaccasa – Huaynacancha – Carhuahurán – Pampalca – Chuyas - Ccano	12.8

   El CBR (California Bearing Ratio) es una medida de la capacidad resistente de un suelo, y como tal, está presente en todo diseño de estructuras de pavimentos viales. Su cuantía se valúa comparando la carga necesaria para que un pistón penetre en el suelo de ensayo una profundidad preestablecida, generalmente de 0.1 pulgadas, con la carga que se usó previamente para penetrar un material estándar de características conocidas, consistente básicamente en piedra triturada cuidadosamente calibrada. En su forma simple, se representa por la siguiente expresión:

$$CBR = \frac{Carga\ aplicada\ a\ la\ muestra\ de\ suelo}{Carga\ aplicada\ a\ la\ muestra\ estándar} \times 100$$

2. Del cálculo de ESAL (o EE) que se presenta en el Anexo 1, se tiene que el número de repeticiones de eje equivalente a 8.2 t es el que se muestra en la siguiente tabla.

Sección	ESAL
I. Cumbre Saccsahuillca – Uchuraccay – Cunya - Pucaccasa	136,527
II. Pucaccasa – Huaynacancha – Carhuahurán – Pampalca – Chuyas - Ccano	279,753

Reemplazando datos en la ecuación se tiene:

<u>Espesor de afirmado Sección I</u>

$$e = [219 - 211(\log 17.4) + 58(log17.4)^2)]log(136{,}527/120)$$

$e = 142\ mm$

Espesor de afirmado Sección II

$e = [219 - 211(\log 12.8) + 58(log 12.8)^2)]log(279\ 753/120)$
$e = 181\ mm$

Los resultados conducen a plantear un proyecto de afirmado de 150 mm de espesor para la Sección I y de 200 mm para Sección II. Las secciones transversales típicas de ambas secciones se muestran en las siguientes figuras.

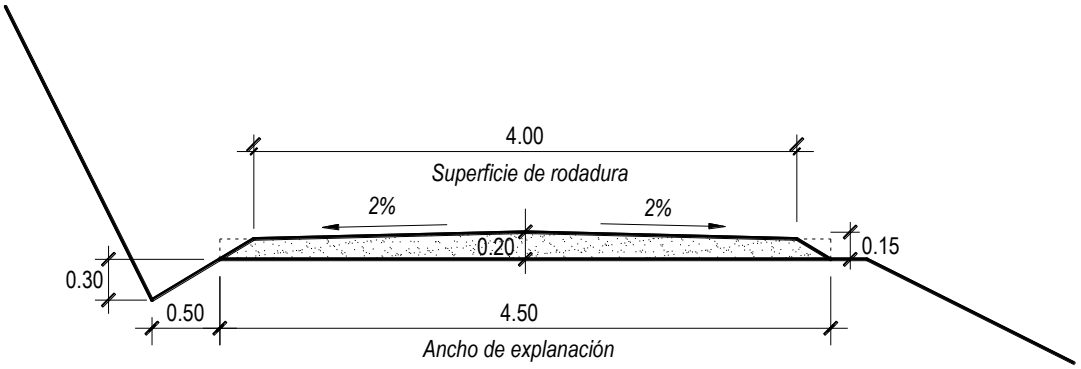


Figura A – Perfil transversal típico de afirmado para Sección I

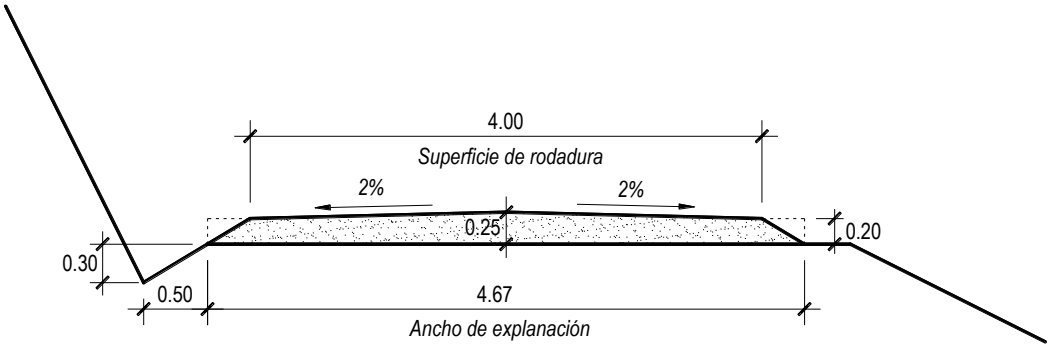


Figura B – Perfil transversal típico de afirmado para Sección II

ANEXO 3

Diseño de afirmado estabilizado con cal y tratamiento superficial bicapa

1. Cálculo del número estructural requerido SN

Se replica la ecuación para el diseño de pavimento flexible presentada en la sección 4.8.5.2, la cual está dada por:

$$log(W_{18}) = Z_r S_0 + 9.36\, log(SN+1) - 0.2 + \frac{log\left(\frac{\Delta PSI}{4.2-1.5}\right)}{0.4 + \frac{1094}{(SN+1)^{5.19}}} + 2.32\, log(M_R) - 8.07$$

Sección I

Datos de diseño:

W_{18} = 136 527

Z_r = -0.674 (para R = 75%)

S_0 = 0.45

P_i = 4.2

P_t = 2.0

ΔPSI = 2.2

M_R = 3 000 x $17.4^{0.65}$ = 19 208 psi

Reemplazando datos en la ecuación se tiene:

$$log(136\,527) = -0.674 \times 0.45 + 9.36\, log(SN+1) - 0.2 + \frac{log\left(\frac{2.2}{2.7}\right)}{0.4 + \frac{1094}{(SN+1)^{5.19}}} + 2.32\, log(19\,208) - 8.07$$

Desarrollando las operaciones aritméticas y agrupando términos constantes se tiene:

$$3.77084 = 9.36\, log(SN+1) - \frac{0.08894}{0.4 + \frac{1094}{(SN+1)^{5.19}}}$$

Resolviendo la ecuación se obtiene SN = 1.535

Sección II

Datos de diseño:

W_{18} = 279 753

Z_r = -0.674 (para R = 75%)

S_0 = 0.45

P_i = 4.2

P_t = 2.0

ΔPSI = 2.2

M_R = 3 000 x $12.8^{0.65}$ = 15 733 psi

Reemplazando datos se tiene:

$$log(279\,753) = -0.674 \times 0.45 + 9.36\,log(SN+1) - 0.2 + \frac{log\left(\frac{2.2}{2.7}\right)}{0.4 + \frac{1094}{(SN+1)^{5.19}}}$$

$$+ 2.32\,log(15\,733) - 8.07$$

Desarrollando las operaciones aritméticas y agrupando términos constantes se tiene:

$$4.28347 = 9.36\,log(SN+1) - \frac{0.08894}{0.4 + \frac{1094}{(SN+1)^{5.19}}}$$

Resolviendo la ecuación se obtiene SN = 1.881

2. Cálculo del espesor de afirmado estabilizado con cal

Sección I

SN = 1.535

$a_{cal} = 0.063$ (Coeficiente de capa del suelo estabilizado con cal)

El número estructural proporcionado (véase pág. 72) está dado por:

$SN_P = a_{cal} d_I$

$$d_I = \frac{1.535}{0.063} = 24.37\ cm$$

Asumiendo $d_I = 25.0\ cm$ se tendrá:

$SN_P = 0.063 \times 25.0 = 1.575$

Sección II

SN = 1.881

$a_{cal} = 0.063$ (Coeficiente de capa del suelo estabilizado con cal)

$SN_P = a_{cal} d_{II}$

$$d_{II} = \frac{1.881}{0.063} = 29.86\ cm$$

Asumiendo $d_{II} = 30.0\ cm$ se tendrá:

$SN_P = 0.063 \times 30.0 = 1.890$

El resumen de diseño de afirmado estabilizado con cal para las secciones I y II se muestra en la siguiente tabla:

Sección	SN	$a\ (cm^{-1})$	$d\ (cm)$	SN_P
I	1.535	0.063	25.0	1.575
II	1.881	0.063	30.0	1.890

3. Cálculo de tratamiento superficial bicapa

El número estructural proporcionado (véase pág. 72) está dado por:

$NE_P = a_{asf} d_{asf} + m a_{bgr} d_{bgr}$

con m = 1.0

Sección I:

SN = 1.535

$a_{asf} = 0.165\ cm^{-1}$

$a_{bgr} = 0.052\ cm^{-1}$

Asumiendo:

$d_{asf} = 2.0\ cm$, y

$d_{bgr} = 25.0\ cm$

Se tiene:

$NE_P = 0.165 \times 2.0 + 1.0 \times 0.052 \times 25.0 = 1.630$

Sección II:

SN = 1.881

$a_{asf} = 0.165\ cm^{-1}$

$a_{bgr} = 0.052\ cm^{-1}$

Asumiendo:

$d_{asf} = 2.0\ cm$, y

$d_{bgr} = 30.0\ cm$

se tiene:

$$NE_P = 0.165 \times 2.0 + 1.0 \times 0.052 \times 30.0 = 1.890$$

El resumen de diseño de tratamiento superficial bicapa para las secciones I y II se muestra en la siguiente tabla:

Sección	$\boldsymbol{SN}$	$\boldsymbol{a_{asf}\ (cm^{-1})}$	$\boldsymbol{d_{asf}\ (cm)}$	$\boldsymbol{m}$	$\boldsymbol{a_{bgr}\ (cm^{-1})}$	$\boldsymbol{d_{bgr}\ (cm)}$	$\boldsymbol{SN_P}$
I	1.535	0.165	2.0	1.0	0.052	25.0	1.630
II	1.881	0.165	2.0	1.0	0.052	30.0	1.890

ANEXO 4

Diseño de pavimento rígido

1. Cálculos previos:

Modulo de elasticidad del concreto (E_c)

Se calcula a partir de la fórmula ACI, Artículo 5.4.2.4

$$E_c = 0.008 W_c^2 f_c'^{0.33}$$

donde:

W_c es el peso específico del concreto	Wc =	2400	kg/m3	
f'_c es resistencia a compresión del concreto	f'_c =	280	kg/cm2	
	E_c =	295,852	kg/cm2	= 29 023 Mpa

Módulo de rotura del concreto (M_r)

Se calcula a partir de la fórmula ACI, Artículo 5.4.2.6:

$$M_r = 2.012\sqrt{f_c'}$$

	M_r =	34	kg/cm2	= 3.30 Mpa

2. Datos de diseño

La fórmula AASHTO, adaptada en la norma peruana al SI de unidades es:

$$logW_{8.2} = Z_R S_0 + 7.35\, log(D + 25.4) - 10.39 + \frac{log\left(\frac{\Delta PSI}{4.5 - 1.5}\right)}{1 + \frac{1.25x10^{19}}{(D + 25.4)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32P_t) log\left[\frac{M_r C_d (0.09D^{0.75} - 1.132)}{1.51J\left[0.09D^{0.75} - \frac{7.38}{\left(\frac{E_c}{k}\right)^{0.25}}\right]}\right]$$

donde los factores y sus repectivos valores se dan en la siguiente tabla:

Variable	Notación	Valor	Unidades	Referencia norma peruana*
Numero de ejes equivalentes de 8.2 t para el período de diseño previsto, Sección I	$W_{8.2}$	388,781	ESAL (Anexo 1)	
Numero de ejes equivalentes de 8.2 t para el período de diseño previsto, Sección II	$W_{8.2}$	793,563	ESAL (Anexo 1)	
Espesor del pavimento	D	Incógnita	mm	
Desviación estándar de los errores de predicción del tráfico y desempeño del pavimento	Z_R	-0.842		(Cuadro 14.5)
Error estándar combinado del tráfico y desempeño del pavimento previstos	S_0	0.35		Pág. 266
Caída de servicialidad previsto durante el período de diseño	ΔPSI	2.1		(Cuadro 14.4)
Índice de servicialidad terminal	P_t	2.0		(Cuadro 14.4)
Módulo de rotura del concreto	M_r	3.3	Mpa	
Coeficiente de drenaje	C_d	1.0		(Cuadros 14.8, 14.9)
Coeficiente de transmisión de carga en las juntas	J	3.2		(Cuadro 14.10)
Módulo de elasticidad del concreto	E_c	29,023	Mpa	
Módulo de reacción de la capa base del pavimento para CBR 40%	k	119	Mpa/m	(Figura 14.1)

(*) Manual de Carreteras - Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos - Sección: Suelos y Pavimentos

2.1 Diseño de espesor de pavimento de concreto - Sección I

Reemplazando cada uno de los valores en la ecuación se tiene:

$$log(388{,}781) = -0.842 \times 0.35 + 7.35\, log(D + 25.4) - 10.39 + \frac{log\left(\frac{2.1}{3}\right)}{1 + \frac{1.25 \times 10^{19}}{(D + 25.4)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32 \times 2.0) log\left[\frac{3.3 \times 1.0 \times (0.09D^{0.75} - 1.132)}{1.51 \times 3.2\left[0.09D^{0.75} - \frac{7.38}{\left(\frac{29{,}023}{119}\right)^{0.25}}\right]}\right]$$

Efectuando las operaciones aritméticas básicas y reagrupando términos independientes, la ecuación se reduce a:

$$16.27441 = 7.35\, log(D + 25.4) - \frac{0.1549}{1 + \frac{1.25 \times 10^{19}}{(D + 25.4)^{8.46}}} + 3.58 log\left[\frac{0.682947(0.09D^{0.75} - 1.132)}{[0.09D^{0.75} - 1.91233]}\right]$$

16.27440032 **

Introduciendo la fórmula en (**) y asignando valores a $D_{cálculo}$ hasta balancear con el valor numérico del primer miembro se obtiene:

$D_{cálculo}$ = 143.08 mm

2.1 Diseño de espesor de pavimento de concreto - Sección II

Siguiendo el mismo procedimiento dado para el tramo I se tiene:

$$log(793{,}563) = -0.842 \times 0.35 + 7.35\, log(D + 25.4) - 10.39 + \frac{log\left(\frac{2.1}{3}\right)}{1 + \frac{1.25 \times 10^{19}}{(D + 25.4)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32 \times 2.0) log\left[\frac{3.3 \times 1.0 \times (0.09D^{0.75} - 1.132)}{1.51 \times 3.2\left[0.09D^{0.75} - \frac{7.38}{\left(\frac{29{,}023}{119}\right)^{0.25}}\right]}\right]$$

y

$$16.58428 = 7.35\, log(D + 25.4) - \frac{0.1549}{1 + \frac{1.25 \times 10^{19}}{(D + 25.4)^{8.46}}} + 3.58 log\left[\frac{0.682947(0.09D^{0.75} - 1.132)}{[0.09D^{0.75} - 1.91233]}\right]$$

16.58432426 **

El $D_{cálculo}$ resulta:

$D_{cálculo}$ = 169.22 mm

En razón al desgaste por efecto de abrasión en curvas de volteo analizado en 4.7.5, se adopta un espesor mínimo de pavimento rígido de:

$D_{diseño}$ = 200 mm

Nota:

¿Por qué se usa distinto ESAL en una misma carretera, a pavimentar una parte con afirmado y otra parte con concreto?

El ESAL no es una medida del tráfico, como el IMD; el ESAL es una medida de respuesta al desgaste del pavimento. Esto se puede comprobar por la siguiente afirmación: En el tramo II, el afirmado y el pavimento rígido llegarán a un mismo nivel de deterioro, cuando hayan soportado la carga de 279,753 y 793,563 ESALS, respectivamente. Esto demuestra que el concreto necesita mucha mayor carga para llegar a la misma fatiga que el afirmado.