

UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC
FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



Tesis

Estabilización e impermeabilización de la capa de afirmado con neumático reciclado granular y emulsión catiónica en vía vecinal AP - 650, Abancay- Apurímac, 2025

Presentado por:

Shamira Jaudry Vega Bolivar

Sulma Challco Leon

Para optar el título de Ingeniero Civil

Abancay, Perú

2026



UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

Estabilización e impermeabilización de la capa de afirmado con neumático reciclado granular y emulsión catiónica en vía vecinal AP - 650, Abancay - Apurímac, 2025

Presentado por **Shamira Jaudry Vega Bolivar** y **Sulma Chalco Leon**, para optar el título de Ingeniero Civil

Sustentado y aprobado el 17 de diciembre del 2025 ante el jurado evaluador

Presidente:

Dr. Calixto Cañari Otero

Primer miembro:

Mtro. Charles Néstor Checya Alata

Segundo miembro:

Mtro. Rodrigo Loayza Elguera

Asesor:

Dr. Edwar Ilasaca Cañuata



"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD N° 294-2025

La Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, a través de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería declara que, la Tesis en formato de artículo científico intitulada: **Estabilización e impermeabilización de la capa de afirmado con neumático reciclado granular y emulsión catiónica en vía vecinal AP - 650, Abancay-Apurímac, 2025**, presentada por las Bachrs. **Shamira Jaudry Vega Bolívar** y **Sulma Chalco León**, para optar el Título de **Ingeniero Civil**; ha sido sometido a un mecanismo de evaluación y verificación de similitud, a través del Software Turnitin, siendo el índice de similitud **ACEPTABLE de (7%)** por lo que, cumple con los criterios de originalidad establecidos por la Universidad.

Abancay, 04 de diciembre del 2025

Atentamente,


Dra. Heriberto Rojas Enriquez
DIRECTORA DE LA UNIDAD DE INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA

C. c.
Archivo
REG. N° 990



Agradecimiento

Expresamos nuestro sincero agradecimiento a la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac (UNAMBA) por brindarnos la oportunidad de crecer académica y personalmente. A nuestros docentes, quienes con su conocimiento y valores nos guiaron en este camino. Un reconocimiento especial a nuestro asesor, Dr. Edwar Ilasaca Cahuata, por su valiosa orientación, paciencia y profesionalismo, fundamentales en el desarrollo de esta investigación.



Dedicatoria

La luz divina del Señor, que me fortaleció y llenó de claridad el recorrido de este logro; A mi Madre, maestra y guía constante en cada etapa de mi vida, gracias por inspirarme a perseverar y por enseñarme a encontrar aprendizaje en cada desafío; A mis abuelitos, cuya sabiduría y cariño han enriquecido mi espíritu; A mi familia, por su amor y apoyo constante; A Yef, que desde el cielo me acompaña con su fuerza invisible. Y a mi fiel Peluzza, por su dulce compañía que alegra mis días. Este logro lleva consigo la huella del amor, la fé y el invaluable respaldo de cada uno de ustedes. Siempre los llevo en mi corazón.

Shamira Jaudry Vega Bolivar

A Dios por darme la sabiduría necesaria a lo largo de mi carrera universitaria, a mis queridos padres Ricardo y Felicitas, por su apoyo incondicional. Cada sacrificio que han hecho, cada día de trabajo duro son el fundamento de mi éxito. Este crecimiento profesional es gracias a su dedicación y compromiso con mi educación, el cual estoy profundamente agradecida y también agradezco a mis hermanos y esposo por su apoyo y motivación para lograr mis metas.

Sulma Challco Leon



Estabilización e impermeabilización de la capa de afirmado con neumático reciclado granular y emulsión catiónica en vía vecinal AP - 650, Abancay-Apurímac, 2025

Línea de investigación: Ingeniería de la construcción

Esta publicación está bajo una Licencia Creative Commons



ÍNDICE

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
RESUMEN	3
ABSTRACT	4
CAPÍTULO I	5
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	5
1.1 Descripción del problema	5
1.2 Enunciado del problema	7
1.2.1 Problema general	7
1.2.2 Problemas específicos	7
1.2.3 Justificación de la investigación	8
CAPÍTULO II	12
OBJETIVOS E HIPÓTESIS	12
2.1 Objetivos de la investigación	12
2.1.1 Objetivo general	12
2.1.2 Objetivos específicos	12
2.2 Hipótesis de la investigación	13
2.2.1 Hipótesis general	13
2.2.2 Hipótesis específicas	13
2.3 Operacionalización de variables	14
CAPÍTULO III	15
MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	15
3.1 Antecedentes	15
3.2 Marco teórico	23
3.2.1 Infraestructura vial en el Perú	23
3.2.2 Estabilización de suelos	27
3.2.3 Impermeabilización de suelos	42
3.2.4 Materiales alternativos como potencial innovador	51
3.2.5 Importancia del uso del NRG y EC en la impermeabilización vial	65
3.3 Marco conceptual	67



CAPÍTULO IV	70
METODOLOGÍA	70
4.1 Tipo y nivel de investigación	70
4.2 Diseño de la investigación	71
4.3 Descripción ética de la investigación	72
4.4 Población y muestra	73
4.5 Procedimiento	76
4.6 Técnica e instrumentos	78
4.7 Análisis estadístico	83
CAPÍTULO V	87
RESULTADOS Y DISCUSIONES	87
5.1 Análisis de resultados	87
5.2 Contrastación de hipótesis	123
5.3 Discusión	135
CAPÍTULO VI	138
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	138
6.1 Conclusiones	138
6.2 Recomendaciones	141
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	144
ANEXOS	152



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 — Operacionalización de variable	14
Tabla 2 — Deterioro o fallas en vías no pavimentadas	26
Tabla 3 — Factores que afectan la estabilidad de las vías no pavimentadas	27
Tabla 4 — Sistema de clasificación SUCS y AASHTO	29
Tabla 5 — Clasificación general de las propiedades del suelo	30
Tabla 6 — Clasificación de suelos según tamaños de partículas	31
Tabla 7 — Clasificación de aditivos no-tradicionales	37
Tabla 8 — Factores geotécnicos que inciden la estabilización del suelo	38
Tabla 9 — Especificaciones de tipo de estabilizadores y parámetros	39
Tabla 10 — Tipos de estabilizadores y su aplicación según región	40
Tabla 11 — Efecto de infiltración en vía AP-650	46
Tabla 12 — Valores del coeficiente de permeabilidad “k” en (cm/s)	48
Tabla 13 — Factores que influyen en la permeabilidad por tipo y grado del suelo	48
Tabla 14 — Rangos típicos del coef. de permeabilidad (κ) en distintos tipos de suelo	49
Tabla 15 — Propiedades físico-químicas del NFU	53
Tabla 16 — Aplicación de suelo-caucho	57
Tabla 17 — Propiedades físico-químicas de la emulsión catiónica	59
Tabla 18 — Estructura de la emulsión asfáltica	60
Tabla 19 — Categorías principales de una emulsión asfáltica	61
Tabla 20 — Especificaciones para emulsiones asfálticas	64
Tabla 21 — Cuantificación de la muestra por objetivos	75
Tabla 22 — Juicio de expertos sobre la aplicación del tratamiento con NRG y EC	80
Tabla 23 — Valores promedio, coeficiente V de Aiken e intervalo de confianza	81
Tabla 24 — Resultados de la caracterización granulométrica	88
Tabla 25 — Características físicas y mecánicas del afirmado	88
Tabla 26 — Resultados de la máxima densidad seca y OCH en calicatas	89
Tabla 27 — Comportamiento del NRG y EC en la MDS, C-01	90
Tabla 28 — Comportamiento del NRG y EC en la MDS, C-02	91



Tabla 29 — Comportamiento del NRG y EC en la MDS, C-03	92
Tabla 30 — Comportamiento del NRG y EC en la MDS, C-04	93
Tabla 31 — Resumen del % de expansión para combinaciones de NRG y EC	94
Tabla 32 — Resultado de los valores del porcentaje de expansión, C-01	95
Tabla 33 — Resultado de los valores del % de expansión, C-02	96
Tabla 34 — Resultado de los valores del % de expansión, C-03	97
Tabla 35 — Resultado de los valores del % de expansión, C-04	98
Tabla 36 — Resumen del CBR en diferentes combinaciones de NRG y EC	99
Tabla 37 — Resultado de los valores del CBR, C-01	100
Tabla 38 — Resultado de los valores del CBR, C-02	101
Tabla 39 — Resultado de los valores del índice CBR, C-03	102
Tabla 40 — Resultado de los valores del índice CBR, C-04	103
Tabla 41 — Resumen comparativo de los valores de Proctor y CBR de la C-01	105
Tabla 42 — Resumen comparativo de los valores de Proctor y CBR de la C-02	106
Tabla 43 — Resumen comparativo de los valores de Proctor y CBR de la C-03	107
Tabla 44 — Resumen comparativo de los valores de Proctor y CBR de la C-04	108
Tabla 45 — Evaluación de los valores de CBR en calicatas	109
Tabla 46 — Resumen del CBR de las cuatro calicatas	110
Tabla 47 — Resumen del CBR en diferentes combinaciones de NRG y EC	111
Tabla 48 — Resumen de la permeabilidad del afirmado sin aditivo	112
Tabla 49 — Resultados de los valores de la permeabilidad, C-01	113
Tabla 50 — Resultados de los valores de la permeabilidad, C-02	114
Tabla 51 — Resultados de los valores de la permeabilidad, C-03	116
Tabla 52 — Resultados de los valores de la permeabilidad, C-04	117
Tabla 53 — Valores mín, máx del coef. de permeabilidad “k (m/s)”por calicata	118
Tabla 54 — Evaluación de los valores del coeficiente de permeabilidad en calicatas	119
Tabla 55 — Características físicas y mecánicas del afirmado + aditivos por	121
Tabla 56 — Cuadro de resumen con los valores óptimos por calicata	122
Tabla 57 — Prueba de normalidad	124
Tabla 58 — Análisis estadístico ANOVA del afirmado +%NRG + %EC para la MDS	125
Tabla 59 — Efecto de NRG y EC sobre la máxima densidad seca (MDS)	126
Tabla 60 — Análisis estadístico ANOVA del afirmado +%NRG +%EC – del % exp.	127

Tabla 61 — Efecto de NRG y EC el porcentaje de expansión (%)	128
Tabla 62 — Análisis estadístico ANOVA del afirmado +%NRG + %EC para el CBR	130
Tabla 63 — Efecto de NRG y EC sobre el índice CBR	131
Tabla 64 — Prueba de Friedman para la permeabilidad (k) - % NRG	132
Tabla 65 — Prueba de Friedman para la permeabilidad (k) - %EC	132
Tabla 66 — Efecto de NRG y EC sobre la permeabilidad	134
Tabla 67 — Matriz de consistencia	153



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 — Vías vecinales a nivel nacional	24
Figura 2 — Vías vecinales a nivel regional	25
Figura 3 — Sección transversal de un camino no pavimentado	26
Figura 4 — Límites de Atterberg	32
Figura 5 — Cuchara de Casagrande	32
Figura 6 — Dirección del flujo del agua	46
Figura 7 — Rango de la permeabilidad según el tipo de suelo	50
Figura 8 — Permeabilidad de carga constante	51
Figura 9 — Diferentes granulometrías de caucho reciclado procedentes de NFU	52
Figura 10 — NRG, textura homogénea como aditivo estabilizante	53
Figura 11 — Niveles de tratamiento de neumático fuera de uso	55
Figura 12 — Producción de material granular a partir de NFU	55
Figura 13 — Flujograma del proceso de obtención NRG	56
Figura 14 — Beneficios ambientales del reciclaje de neumáticos	58
Figura 15 — Diagrama esquemático de una emulsión	59
Figura 16 — Estructura de la emulsión catiónica utilizada	63
Figura 17 — EC utilizada en la investigación	64
Figura 18 — Flujograma del procedimiento de investigación	77
Figura 19 — Esquema de criterios de una distribución normal	85
Figura 20 — Resultados de los valores de la MDS, C-01	90
Figura 21 — Resultados de los valores de la MDS, C-02	91
Figura 22 — Resultados de los valores de la MDS, C-03	92
Figura 23 — Resultados de los valores de la MDS, C-04	93
Figura 24 — Resultados del porcentaje de expansión, C-01	95
Figura 25 — Resultados del porcentaje de expansión, C-02	96
Figura 26 — Resultados del porcentaje de expansión, C-03	97
Figura 27 — Resultados del porcentaje de expansión, C-04	98
Figura 28 — Resultados del CBR, C-01	100
Figura 29 — Resultados de los valores del índice CBR, C-02	102

Figura 30 — Resultados del índice CBR, C-03	103
Figura 31 — Resultados de los valores del índice CBR, C-04	104
Figura 32 — Gráfico comparativo de los valores de Proctor y CBR de la C-01	105
Figura 33 — Gráfico comparativo de los valores de Proctor y CBR de la C-02	106
Figura 34 — Gráfico comparativo de los valores de Proctor y CBR de la C-03	107
Figura 35 — Gráfico comparativo de los valores de Proctor y CBR de la C-04	108
Figura 36 — Gráfico comparativo del Índice CBR, C1, C2, C3 y C4	110
Figura 37 — Permeabilidad del afirmado sin aditivos	113
Figura 38 — Evolución del coeficiente de permeabilidad en el tiempo C-01	114
Figura 39 — Evolución del coeficiente de permeabilidad en el tiempo C-02	115
Figura 40 — Evolución del coeficiente de permeabilidad vs tiempo C-03	117
Figura 41 — Evolución del coeficiente de permeabilidad en el tiempo C-04	118
Figura 42 — Comparación de los valores de “k” entre calicatas	119
Figura 43 — Gráfico comparativo de “k (m/s)”, C1, C2, C3 y C4	121
Figura 44 — Comparación de coef. de permeabilidad: sin aditivo vs con aditivo	122
Figura 45 — Comparación estadística de la MDS según tratamiento	126
Figura 46 — Comparación estadística del porcentaje de expansión según tratamiento	128
Figura 47 — Comparación estadística del CBR según tratamiento	131
Figura 48 — Comparación estadística de la permeabilidad según tratamiento	134
Figura 49 — Formato de ensayo de análisis granulométrico	155
Figura 50 — Formato de ensayo de Proctor modificado	156
Figura 51 — Formato de ensayo de CBR	157
Figura 52 — Formato de ensayo de permeabilidad de carga constante	158
Figura 53 — Formato de ensayo resumen de combinación de la permeabilidad	158
Figura 54 — Búsqueda y selección de neumáticos fuera de uso	164
Figura 55 — Acopio del NFU el cual será usado en la investigación	164
Figura 56 — Muestra de los aditivos (EC y NRG) para la investigación	165
Figura 57 — Fallas visibles en la vía vecinal AP-650	165
Figura 58 — Extracción de muestras de las cuatro calicatas	166
Figura 59 — Supervisión del asesor académico en la vía de estudio	166
Figura 60 — Supervisión del asesor académico a los ensayos de laboratorio	167

Figura 61 — Ensayos de CBR en muestras combinadas	167
Figura 62 — Ensayo de permeabilidad (carga constante)	168
Figura 63 — Testimonio de la directora sobre el estado de la vía en estudio	168
Figura 64 — Entrevista técnica – diagnóstico situacional en la vía vecinal AP-650	169
Figura 65 — Resultados de los ensayos de laboratorios – Proctor, C-01	172
Figura 66 — Resultado de los ensayos de laboratorios – CBR, C-01	173
Figura 67 — Resultado de los ensayos de laboratorios – CBR, (A+5%NRG+9%EC)	174
Figura 68 — Resultados de los ensayos de laboratorio – Proctor, C-02	175
Figura 69 — Resultado de los ensayos de laboratorios – CBR, C-02	176
Figura 70 — Resultado de los ensayos de laboratorios – CBR, (A+2%NRG+6%EC)	177
Figura 71 — Resultados de los ensayos de laboratorio – Proctor, C-03	178
Figura 72 — Resultado de los ensayos de laboratorios – CBR, C-03	179
Figura 73 — Resultado de los ensayos de laboratorios – CBR, (A +2% NRG+9%EC)	180
Figura 74 — Resultados de los ensayos de laboratorio – Proctor, C-04	181
Figura 75 — Resultado de los ensayos de laboratorios – CBR, C-04	182
Figura 76 — Resultado de los ensayos de laboratorios – CBR, (A+2% NRG+6%EC)	183
Figura 77 — Resultado de ensayos de laboratorio – permeabilidad	184
Figura 78 — Hoja técnica de la emulsión asfáltica imprimante CQS-1HP	185
Figura 79 — Declaratoria de originalidad del autor 1	186
Figura 80 — Declaratoria de originalidad del autor 2	187



SIGLAS Y ACRÓNIMOS

AASHTO — Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes (American Association of State Highway and Transportation Officials).

ANOVA — Análisis de Varianza

AP-650 — Vía vecinal AP-650

ASTM — Asociación Americana para el Ensayo de Materiales (American Society for Testing Materials)

CBR — Relación de Soporte de California (California Bearing Ratio)

CIC — Capacidad de Intercambio Catiónico.

COA — Contenido Óptimo de Agua

CR — Crumb Rubber

EC — Emulsión catiónica

GCR — Gránulo de Caucho Reciclado

INACAL — Instituto Nacional de Calidad.

IP — Índice de Plasticidad

IVP — Instituto Vial Provincial.

LL — Límite Líquido.

LP — Límite Plástico.

MDS — Máxima Densidad Seca

MTC — Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

NFU — Neumáticos Fuera de Uso.

NRG — Neumático reciclado granular.

NTP — Norma Técnica Peruana.

OCH — Óptimo Contenido de Humedad.

PESEM — Plan Estratégico Sectorial Multianual.

SINAC — Sistema Nacional de Carreteras.

SUCS — Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

TNU — Tratamiento Neumáticos Usados.

WEF — Foro Económico Mundial (World Economic Forum).

“k” — Coeficiente de permeabilidad.

v — Velocidad de descarga



INTRODUCCIÓN

En el Perú y en todas sus regiones, la red vial es una infraestructura fundamental para el desarrollo socioeconómico de la población. Según la SINAC 2022-2024 del MTC, la región de Apurímac presenta con un déficit del 85% de vías no pavimentadas, siendo una de las regiones con menor conectividad vial del país. Específicamente, según el Plan Vial Provincial de Abancay (2023), el distrito de Abancay cuenta con 103,15 km de vía vecinal no pavimentadas sin rehabilitar, representando el 68% de su red vial total.

La vía vecinal AP-650, identificada en el tramo km 0+000 al km 1+050, presenta un deterioro del 70% de su superficie según evaluación visual. Los problemas cuantificados incluyen: baches detectados (promedio 38.9 baches/km), erosión superficial del 45% del ancho de la vía, que supera en 12 veces el límite máximo recomendado por la OMS (2021) de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para promedio anual y en 4 veces el límite de $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para promedio de 24 horas, representando un riesgo sanitario crítico para los estudiantes expuestos diariamente según evaluación de calidad ambiental. Todos estos eventos fueron las causas principales para el deterioro prematuro de la vía, ya que afectan directamente a la capa de rodadura del afirmado, ocasionando así, el mal funcionamiento de la carretera, generan inseguridad y malestar en los usuarios de la vía y con ello un alto costo de mantenimiento.

Esta situación compromete la transitabilidad de usuarios diarios y afecta el acceso a instituciones educativas, 1 centro de salud, mercados locales y comunidades rurales conectadas. La degradación prematura de la vía (vida útil de 2 años vs. 5-7 años de una vía estabilizada) hace urgente la búsqueda de soluciones tecnológicas sostenibles que reduzcan costos de mantenimiento en mínimo.

El objetivo de esta investigación fue evaluar cuantitativamente la influencia del uso de neumático reciclado granular (NRG) y emulsión catiónica (EC) en la estabilización e impermeabilización de la capa de afirmado, mediante el análisis de densidad seca máxima, CBR, porcentaje de expansión y permeabilidad. Con una metodología de investigación cuantitativa - cuasiexperimental - aplicada, se empleó un diseño



completamente aleatorizado con grupos experimentales y 1 grupo control. Los ensayos de laboratorio fueron realizados según las normas MTC E 115 (Proctor Modificado), MTC E 132 (CBR), MTC E 118 (Permeabilidad) y ASTM D698 (Standard Proctor). La muestra constituida por 4 calicatas distribuidas sistemáticamente cada 262.5 metros.

Para el desarrollo actual de investigación se siguió el esquema metodológico establecido por la Unidad de Investigación de la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac (UNAMBA), estructurado en VI capítulos organizados secuencialmente:

- Capítulo I: Se estableció el planteamiento del problema, exponiendo el contexto regional, la justificación técnica y social, la formulación del problema general y específicos con sus respectivas delimitaciones espaciales, temporales y temáticas.
- Capítulo II: Se presentó el marco metodológico específico con objetivos (general y específicos), hipótesis (general y específicas) y la operacionalización de variables independientes y dependientes con sus respectivas dimensiones e indicadores cuantificables.
- Capítulo III: Se desarrolló el marco teórico referencial que integra antecedentes nacionales e internacionales relevantes, el sustento teórico científico sobre estabilización vial y el marco conceptual técnico-normativo.
- Capítulo IV: Se detalló la metodología de investigación desarrollada, incluyendo tipo, nivel y diseño experimental, población y muestra, procedimientos de laboratorio, técnicas e instrumentos de recolección de datos y análisis estadístico (ANOVA, post-hoc de Tukey).
- Capítulo V: Se presentaron los resultados y discusiones derivados del estudio experimental, incluyendo análisis descriptivos, inferenciales y contrastación de hipótesis con discusión teórica de hallazgos.
- Capítulo VI: Se desarrollaron las conclusiones y recomendaciones técnicas de la investigación, las referencias bibliográficas según normas ISO 690 y anexos correspondientes.



RESUMEN

La presente investigación se centró en evaluar la influencia del uso de neumático reciclado granular y la emulsión catiónica en la estabilización e impermeabilización de la capa de afirmado. Con una metodología de tipo aplicada, enfoque cuantitativo y diseño cuasiexperimental, la población y muestra conformada por la vía vecinal AP-650, específicamente la progresiva 0+00 – 1 + 050km. Los resultados indicaron que, en condición base, la MDS varió entre 2.21 y 2.31 g/cm³ (OCH 3.19–5.21%), mientras que se incrementó hasta 2.40 g/cm³ con 8% NRG + 9% EC (C-02). El % de expansión del afirmado natural fue 0.829–1.025% y con aditivos osciló entre 0.44 y 1.09%, logrando mínimos de 0.44 (C-01: 2% NRG + 9% EC) y 0.50 (C-03), aunque una combinación llegó a 1.09 (C-04: 5% NRG + 9% EC). El CBR natural fue 41.65–53.87% y con NRG+EC varió entre 28.97 y 65.59%, alcanzando el máximo 65.59% (C-02: 2% NRG + 6% EC). En permeabilidad, sin aditivo tuvo $k = 7.61E-04$ a $1.38E-03$, con aditivos fue altamente variable ($1.94E-04$ a $9.96E-03$), la combinación más equilibrada fue C-02: 2% NRG + 6% EC al alcanzar el mayor CBR = 65.59% con expansión controlada (0.79%). Concluyendo que en la vía AP-650, la adición de NRG y EC mejoró la estabilización, elevando la MDS y el CBR con expansiones mínimas de 0.44–0.50%. Sin embargo, la permeabilidad fue altamente variable ($1.94E-04$ a $9.96E-03$) y no logró una impermeabilización consistente según el criterio normativo.

Palabras clave: Estabilización, neumático reciclado granular, emulsión catiónica, permeabilidad.



ABSTRACT

This study focused on evaluating the influence of the use of granular recycled tire (NRG) and cationic emulsion (EC) on the stabilization and waterproofing of the base course. Using an applied methodology, quantitative approach, and quasi-experimental design, the population and sample consisted of the AP-650 local road, specifically the 0+00 – 1 + 050 km section. The results indicated that, under base conditions, the MDS varied between 2.21 and 2.31 g/cm³ (OCH 3.19–5.21%), while it increased to 2.40 g/cm³ with 8% NRG + 9% EC (C-02). The expansion percentage of the natural pavement was 0.829–1.025%, and with additives it ranged from 0.44 to 1.09%, reaching minimums of 0.44 (C-01: 2% NRG + 9% EC) and 0.50 (C-03), although one combination reached 1.09 (C-04: 5% NRG + 9% EC). Natural CBR was 41.65–53.87%, and with NRG+EC it ranged from 28.97 to 65.59%, reaching a maximum of 65.59% (C-02: 2% NRG + 6% EC). In terms of permeability, without additives it was $k = 7.61E-04$ to $1.38E-03$, with additives it was highly variable ($1.94E-04$ to $9.96E-03$), the most balanced combination was C- 02: 2% NRG + 6% EC, achieving the highest CBR = 65.59% with controlled expansion (0.79%). In conclusion, on the AP-650 road, the addition of NRG and EC improved stabilization, increasing the MDS and CBR with minimal expansions of 0.44–0.50%. However, permeability was highly variable ($1.94E-04$ to $9.96E-03$) and did not achieve consistent waterproofing according to regulatory criteria.

Keywords: *Soil stabilization, granular recycled tire, cationic emulsion, permeability.*



CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción del problema

A nivel internacional la infraestructura vial deficiente constituye uno de los principales obstáculos para el desarrollo global. Según Liming, y otros (2021), el 65% de la población rural mundial carece de acceso adecuado a carreteras pavimentadas, siendo este factor determinante en la perpetuación de la pobreza rural. Además, según el Foro Económico Mundial (WEF), publica anualmente el reporte de competitividad global, analiza la calidad de la infraestructura vial y el transporte, en sus informes Perú ocupó el lugar 88 de 141 economías en el pilar de infraestructura. En el subcomponente de infraestructura de transporte el país ocupó el lugar 97, con una mejoría en la eficiencia de los servicios portuarios e interconexión de envíos. Sin embargo, los indicadores de conectividad de vías puesto 102 y calidad de carreteras puesto 110, reflejan desafíos significativos en la infraestructura vial peruana WEF (2020).

A nivel nacional, el deterioro prematuro de las carreteras no pavimentadas constituye uno de los principales desafíos de la gestión vial. El Ministerio de Transportes y Comunicaciones MTC (2013) reporta que el Perú cuenta con aproximadamente 176,000 km de red vial, de los cuales el 74 % (\approx 130,000 km) corresponde a vías no pavimentadas. De estas, el 47 % se encuentra en estado regular, malo o muy malo. Para el 2024 la SINAC, menciona que la región Apurímac cuenta con un total de 686.043 km de vía pavimentada y 6,753.569 km de vías no pavimentadas, entre las cuales: 1,276.953 km son rutas nacionales 1,302.34 km son rutas departamentales 4,860.319 km son rutas vecinales, en consecuencia, surge la necesidad de implementar criterios y soluciones técnicas innovadoras para garantizar la trabajabilidad y resiliencia de la infraestructura vial en la región, favoreciendo además eficiencia económica y sostenibilidad fiscal para los gobiernos.

A nivel local, la vía vecinal AP-650, ubicada en Abancay, Apurímac, y objeto de esta



investigación (tramo de 1.050 km), presenta un estado crítico de deterioro, el cual alcanza aproximadamente el 70% de su extensión. Estos deterioros prematuros se deben a la combinación del tránsito constante, la falta de drenaje adecuado y los efectos climáticos.

El diagnóstico actual de campo, que cumple con el criterio normativo de realizar una calicata cada 200 a 250 metros, se basó en el estudio de cuatro calicatas (C-01 en el km 0+240, C-02 en el km 0+480, C-03 en el km 0+750, y C-04 en el km 1+000), identificando fallas recurrentes de grado severo. Entre los daños principales, se registraron baches de hasta 20 cm de profundidad de grado 3 – severo, y ahuellamientos que cubren cerca del 40% del tramo y se clasifican también como grado 3 – severo. Además, la vía padece de erosión severa, lodazales y cruces de agua que resultan en intransitabilidad durante las épocas de lluvia, catalogados como grado 3 – severo. La pérdida de agregados y los encalaminados con hundimiento parcial del afirmado de 15 cm a más de grado severo exponen las capas inferiores, lo que justifica la necesidad de implementar soluciones innovadoras para mejorar la estabilidad y reducir la alta permeabilidad base del afirmado, la cual oscila entre 7.61 E-04 cm/s y 1.38 E-03 cm/s en estado natural.

Por ende, la transitabilidad se ve interrumpida entre 2 y 4 días por mes durante la temporada de lluvias, afectando principalmente al IEI San Francisco Solano N° 1154, al Hospital EsSalud II, así como a moradores y transportistas que dependen de esta vía para acceder a servicios básicos. Además, se evidencia la presencia de neumáticos fuera de uso (NFU) acumulados en diferentes puntos del distrito, lo que constituye un riesgo ambiental y sanitario. Esta problemática demuestra la urgencia de implementar soluciones de estabilización con neumático reciclado granular (NRG) y emulsión catiónica, como alternativa sostenible para mejorar el desempeño estructural e hidráulico del afirmado.

Además, que el comportamiento climático en el distrito de Abancay agrava significativamente el deterioro de la vía AP-650, Según el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - SENAMHI (2023), la ciudad presenta un régimen de lluvias altamente estacional, concentrando entre los meses de diciembre y marzo exactamente el 70% de la precipitación anual, con valores mensuales que oscilan entre 103 y 117.3 mm (enero: 117.3 mm, febrero: 106 mm, marzo: 103 mm),



y con picos diarios que alcanzan hasta 25 mm durante eventos de lluvia intensa en la sierra sur según boletines oficiales del SENAMHI, lo cual incrementa la saturación del afirmado, la pérdida de finos y la formación de lodazales y erosión lateral debido a la ausencia de un drenaje eficiente.

1.2 Enunciado del problema

1.2.1 Problema general

¿Cómo influye el uso de neumático reciclado granular y emulsión catiónica en la estabilización e impermeabilización de la capa de afirmado en vía vecinal AP-650, Abancay - Apurímac, 2025?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿Cómo influye el uso de neumático reciclado granular y emulsión catiónica en la máxima densidad seca del afirmado para la estabilización e impermeabilización en vía vecinal AP-650, Abancay - Apurímac, 2025?
- ¿Cómo influye el uso de neumático reciclado granular y emulsión catiónica en el porcentaje de expansión del afirmado para la estabilización e impermeabilización en vía vecinal AP-650, Abancay - Apurímac, 2025?
- ¿Cómo influye el uso de neumático reciclado granular y emulsión catiónica en CBR del afirmado para la estabilización e impermeabilización en vía vecinal AP-650, Abancay - Apurímac, 2025?
- ¿Cómo influye el uso de neumático reciclado granular y emulsión catiónica en la permeabilidad del afirmado para la estabilización e impermeabilización en vía vecinal AP-650, Abancay - Apurímac, 2025?

1.2.3 Justificación de la investigación

1.2.3.1 Justificación teórica

Desde el enfoque teórico, esta investigación se delimita como un estudio cuasi experimental comparativo de tipo aplicada, cuyo



propósito principal es evaluar y comparar el comportamiento del afirmado tratado con distintas combinaciones de (NRG) y (EC). A partir de estos resultados, se establece una metodología para la estabilización de la capa de afirmado combinando el NRG y EC, además de identificar la combinación más eficiente y técnicamente viable, lo que constituye una propuesta de mezcla óptima para las condiciones específicas de suelos granulares altoandinos. Esta delimitación resulta relevante porque permite diferenciar el presente trabajo de investigaciones previas que aplicaron aditivos de manera aislada; en cambio, este estudio analiza de forma conjunta los efectos físicos-elásticos del NRG y los efectos químico-impermeabilizantes de la EC, construyendo un marco teórico que explica su interacción y desempeño bajo condiciones reales de humedad y deterioro. De esta manera, la investigación se posiciona como un aporte teórico que integra fundamentos de la mecánica de suelos, tecnología de materiales y flujo en medios porosos para comprender y sustentar la eficacia de una mezcla alternativa de estabilización para vías no pavimentadas.

1.2.3.2 Justificación práctica

El presente estudio surge como respuesta al estado crítico de la vía AP- 650 en la ciudad de Abancay, donde aproximadamente el 70 % del tramo evaluado presenta fallas graves en la capa de afirmado, afectando la conectividad local. Ante este escenario, resulta imperativo implementar propuestas prácticas innovadoras, ambientalmente sostenibles y financieramente accesibles que superen las técnicas convencionales de reparación; por ello, esta investigación valida experimentalmente una solución práctica mediante el uso combinado del NRG y la EC. Donde el primero mejora la elasticidad y la resistencia estructural, mientras que la emulsión catiónica impermeabiliza y cohesiona el material; los ensayos de laboratorio con diversas dosificaciones evidencian mejoras técnicas significativas en la estabilización y reducción parcial de la permeabilidad, disminuyendo los costos de



mantenimiento, ampliando la vida útil de la vía y promoviendo la reutilización de NFU.

1.2.3.3 Justificación social

La justificación social de esta investigación responde a una necesidad urgente de garantizar la conectividad como derecho básico. El mal estado de la vía vecinal AP-650 ilimita el acceso a servicios fundamentales como salud, educación, mercados, etc. y fomenta la desigualdad en cuanto a derechos básicos. La rehabilitación mediante técnicas sostenibles no solo genera mejoras técnicas significativas (MDS, porcentaje de expansión, CBR y permeabilidad), sino que impacta positivamente en la vida diaria de la población (mejor calidad de vida).

1.2.3.4 Justificación económica

El mantenimiento de las carreteras rurales cada vez representa un desafío más complejo en la infraestructura vial, ya sea por las restricciones presupuestarias de las municipalidades, la inconsistencia en la calidad de los materiales empleados, las condiciones climáticas extremas, que aceleran su deterioro de la vía y las frecuentes reposiciones de los materiales tradicionales generan gastos recurrentes a los gobiernos locales, es por ello que en esta investigación demuestra que la estabilización con NRG y EC representa una alternativa costo-eficiente ya que disminuirá los gastos por manteamientos recurrentes y amplía la vida útil de la vía.

1.2.3.5 Justificación metodológica

La justificación metodológica de la investigación se sustenta en un diseño cuasiexperimental que combina ensayos de laboratorio, validación en condiciones reales de la vía y análisis estadístico-rigurosos. La matriz experimental de 9 combinaciones NRG-EC, evaluada por triplicado, permitió identificar la dosificación óptima de NRG y EC mediante ANOVA y pruebas post-hoc. El control



estricto de variables (MDS, % de exp., CBR y permeabilidad) y la simulación de condiciones reales de lluvia aseguran la confiabilidad de los resultados. La metodología desarrollada es replicable y transferible, proporcionando protocolos detallados para su aplicación por entidades técnicas en contextos similares.

1.2.3.6 Justificación técnica

Desde el punto de vista técnico, esta investigación establece una metodología para la estabilización de la capa de afirmado mediante el uso combinado del NRG y EC, esto respaldado por los ensayos normalizados (ASTM D1883, D5856) evidencian una mejora en la estabilización, reducción parcial de la permeabilidad y con ello amplía la vida útil de la vía. Las dosificaciones óptimas hallada para suelos granulares superan métodos tradicionales, mientras los protocolos desarrollados facilitan su réplica en entornos similares, constituyendo una alternativa técnica viable para capas granulares sostenibles.

1.2.3.7 Justificación ambiental

La investigación tiene relevancia ambiental porque promueve el aprobechamiento del (NFU), reduciendo su acumulación en botaderos, riberas y zonas urbanas, donde genera impactos negativos en el entorno. El uso del NRG y la EC ayuda a mejorar la impermeabilidad y durabilidad del afirmado, disminuyendo la erosión, la infiltración y la necesidad de mantenimientos frecuentes, lo que reduce el consumo de materiales y las emisiones asociadas al transporte. Así, la propuesta aporta a la sostenibilidad y a la gestión eficiente de residuos en Abancay y la región Apurímac.

1.2.3.8 Aporte científico

La investigación aporta un valor científico-técnico al generar evidencia experimental sobre cómo el (NRG) y la (EC) modifican la MDS, el porcentaje de expansión, el CBR y la permeabilidad del afirmado, variables no contempladas de manera conjunta por la



normativa vigente del MTC. Este aporte amplía el conocimiento sobre la interacción suelo-caucho-emulsión y proporciona criterios de dosificación y comportamiento replicables en proyectos viales, constituyéndose en una alternativa técnica válida para la mejora de la estabilización e impermeabilización del afirmado, sustentada en principios de la mecánica de suelos y de la estabilización de capas granulares.

1.2.3.9 Justificación por relevancia

La relevancia de esta investigación radica en que, aunque existen estudios que han incorporado materiales complementarios para mejorar propiedades específicas del suelo, no se ha evaluado de manera integrada el efecto combinado del (NRG) y la (EC) en suelos granulares de zonas altoandinas, donde las condiciones climáticas, la saturación estacional y la variabilidad térmica generan comportamientos diferentes en otras regiones. Este estudio es importante porque propone una alternativa sostenible y económicamente viable para vías rurales expuestas a alta pluviosidad, aportando evidencia experimental sobre la interacción simultánea del NRG como elemento elástico hidrofóbico y la EC como agente complementario de integrar un enfoque dual a los avances previos.



CAPÍTULO II

OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1 Objetivos de la investigación

2.1.1 Objetivo general

Evaluar la influencia del uso de neumático reciclado granular y emulsión catiónica en la estabilización e impermeabilización de la capa de afirmado en vía vecinal AP-650, Abancay - Apurímac, 2025.

2.1.2 Objetivos específicos

- Determinar la influencia del uso de neumático reciclado granular y emulsión catiónica en la máxima densidad seca del afirmado en la estabilización e impermeabilización en vía vecinal AP-650, Abancay - Apurímac, 2025.
- Analizar la influencia del uso de neumático reciclado granular y emulsión catiónica en el porcentaje de expansión del afirmado en la estabilización e impermeabilización en vía vecinal AP-650, Abancay - Apurímac, 2025.
- Evaluar la influencia del neumático reciclado granular y emulsión catiónica en el CBR del afirmado en la estabilización e impermeabilización en vía vecinal AP-650, Abancay - Apurímac, 2025.
- Determinar la influencia del uso de neumático reciclado granular y emulsión catiónica en la permeabilidad del afirmado en la estabilización e impermeabilización en vía vecinal AP-650, Abancay - Apurímac, 2025.



2.2 Hipótesis de la investigación

2.2.1 Hipótesis general

La adición de neumático reciclado granular y emulsión catiónica influye en la estabilización e impermeabilización de la capa de afirmado en vía vecinal AP-650, Abancay - Apurímac, 2025.

2.2.2 Hipótesis específicas

- La adición de neumático reciclado granular y emulsión catiónica influye positivamente en la máxima densidad seca del afirmado para la estabilización e impermeabilización en vía vecinal AP-650, Abancay - Apurímac, 2025.
- La adición de neumático reciclado granular y emulsión catiónica influye positivamente en el porcentaje de expansión del afirmado para la estabilización e impermeabilización en vía vecinal AP-650, Abancay - Apurímac, 2025.
- La adición de neumático reciclado granular y emulsión catiónica influye positivamente en el CBR del afirmado para la estabilización e impermeabilización en vía vecinal AP-650, Abancay - Apurímac, 2025.
- La adición de neumático reciclado granular y emulsión catiónica influye positivamente en la permeabilidad del afirmado para la estabilización e impermeabilización en vía vecinal AP-650, Abancay - Apurímac, 2025.



2.3 Operacionalización de variables

Tabla 1 — Operacionalización de variable

VARIABLES		DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	UNIDAD DE MEDIDA	INSTRUMENTO
INDEPENDIENTE	• Neumático reciclado granular	Material obtenido mediante el proceso de trituración mecánica de neumáticos fuera de uso, donde se busca la calidad y la pureza del material, facilitándonos su utilización en nuevas aplicaciones (Zaga, 2022)	Para la incorporación de los neumáticos reciclados granulares se realizó la selección por tamizado, para luego ser incorporados en diferentes porcentajes (0%, 2%, 5% y 8%)	Incorporación de neumático reciclado granular	0	%	Ficha técnica de laboratorio
					2	%	
					5	%	
					8	%	
INDEPENDIENTE	• Emulsión catiónica.	Es utilizada para estabilizar vías, este compuesto por elementos como: agua, asfalto y un agente emulsificante (tensoactivo) (MTC, 2013 pág. 665)	Para la incorporación de la emulsión catiónica, se tomará la dosificación en base al peso de la muestra (0%, 3%,6% y 9%)	Incorporación de emulsión catiónica	0	%	Ficha técnica de laboratorio
					3	%	
					6	%	
					9	%	
DEPENDIENTE	• Estabilización	Consiste en mejorar la resistencia mecánica y durabilidad en el tiempo, mediante el mejoramiento de las propiedades físicas y mecánicas del suelo, por medio de la integración de agentes estabilizantes químicos, sintéticos y naturales a través de diferentes métodos mecánicos (MTC, 2014 pág. 89)	Mejora de la capacidad del suelo, mejorando sus propiedades mecánicas y físicas (MTC, 2014 pág. 92)	Densidad seca máxima	Densidad seca	gr/cm3	Ficha técnica de laboratorio
				CBR	CBR	%	
				Porcentaje de expansión	Expansión del suelo	%	
DEPENDIENTE	• Impermeabilización	La permeabilidad en el suelo está definida como la capacidad del suelo para permitir la circulación del agua a través de su masa.es decir a mayor permeabilidad menor impermeabilidad eso dependerá de los espacios vacíos que hay en el suelo. (Terzaghi, y otros, 1973)	Es la capacidad del suelo que deja pasar el agua por medio de sus poros, el cual estará determinado por su permeabilidad (DAS, 2022)	Ensayo de permeabilidad	Permeabilidad de carga constante	cm/s	Ficha técnica de laboratorio de permeabilidad de carga constante



CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

3.1 Antecedentes

3.1.1 Internacionales

- a) Gavilanes Pozo (2022), en la tesis titulada “Estudio del efecto de la adición de emulsión asfáltica en las propiedades Físico - mecánicas de suelos granulares, para el diseño de pavimentos flexibles”, planteó como objetivo analizar el estudio de los efectos de la incorporación de emulsión asfáltica en las propiedades físico-mecánicas del suelo granular. población experimental, establecida por suelos granulares de subrasante de las parroquias rurales del cantón Ambato, las muestras fueron extraídas de tres distintas parroquias rurales, en cada punto llevaron 5 muestras de suelo alterada de aprox. 25 kg cada una, las que serán empleadas por sus propiedades físicas y mecánicas mediante ensayos de campo y laboratorio. Empleó la siguiente metodología; investigación descriptiva correlacional, enfoque cuantitativo, diseño experimental. Arribando resultados con la incorporación de emulsión asfáltica en un porcentaje de 0,1,3,5 y 8 por ciento donde agregó un 3% la emulsión asfáltica en la subrasante donde una vez prevalecido el valor del CBR empezó a disminuir. Teniendo valores iniciales de 20% de CBR en estado natural del suelo 0% aumentando en un 29.50% y a continuación en un 36.50 al ser adicionado el 1% y 3% de emulsión asfáltica, asimismo al incorporar el 5% el CBR descendiendo 24.40% y el 8% de emulsión asfáltica en un 17.60%, finalmente tomaron la conclusión; que el óptimo porcentaje de emulsión asfáltica es un aproximado de 3% en muestra condicho estudio alcanzando el valor del CBR. mostrándose mayor densidad seca en un máximo según el ASTM D 1556 y en el ensayo de Proctor modificado.



b) Alvarez Castelblanco (2020), en su investigación titulada “Utilización de granulo de caucho proveniente de llantas usadas como solución para reforzar los suelos blandos de subrasante en la sabana de Bogotá”, tuvo como objetivo; analizar la adición de caucho pulverizado proveniente de llantas en desuso como solución eficiente para reforzar los suelos blandos de subrasante que se encuentran en la sabana de Bogotá, así mismo el autor ensayó con muestras en porcentajes de 0%, 0,5%, 1%, 2%, 3% y 4%, de fibras de neumáticos reciclados obtenidos de la fábrica Yazd Tire. La metodología empleada fue diseño experimental enfoque cualitativo obteniendo los siguientes resultados; a través de diferentes investigaciones en el mundo sobre el uso de neumáticos reciclados en suelos inapropiados para soportar una estructura vial, pudo evidenciar que un neumático contiene diferentes materiales, que pueden ser aprovechados para el refuerzo de un suelo blando de subrasante, el polvo de caucho es un material que puede ser aprovechado para reforzar un suelo que presente inestabilidad, ya que incrementó algunas propiedades mecánicas del suelo como la resistencia al esfuerzo cortante, la cohesión y el ángulo de fricción de un suelo arcilloso.

Según la teoría de Shakedown, el colapso plástico es posible anticipar el fallo progresivo de una estructura, un grupo de investigadores determinó que la fibra de caucho reciclado se puede utilizar como refuerzo de una subrasante. Obtuvo mejores resultados en el CBR al mezclar el 4% de polvo de caucho con el suelo inadecuado, en cuanto a la estabilización un suelo cuando el CBR de la subrasante se encuentra entre el 1 y 3% concluyó; y pudo establecer las características, comportamientos y espesores de los materiales que se encuentran en los depósitos de la capital colombiana, lo que permitió conocer de manera más detallada en que partes de la ciudad es posible la aplicación del polvo de caucho.

c) Pino Rabanal (2020), en su trabajo de investigación, “Estudio de la permeabilidad las mezclas asfálticas utilizadas en la región del Maule y presentación de una posible mejora”, presentó como objetivo estudiar y mejorar la permeabilidad de una mezcla asfáltica, evitando así los desgastes en la vía originando la acumulación de líquidos producto de la



lluvia, filtraciones o acumulación de aguas. La población de estudio estuvo conformada por los áridos provenientes de la ciudad de Talca y las mezclas asfálticas diseñadas en el laboratorio de la empresa Bitumix. “Los áridos cumplen con lo requerido en el Manual de Carreteras, por lo tanto, son aptos para ser utilizados en el diseño de la mezcla permeable. A partir del análisis de resumen ejecutivo infiere que su investigación sigue un enfoque de metodología experimental ya que se debe a la realización y pruebas de ensayo con el propósito de evaluar la mezcla asfáltica permeable. Aplicó tres dosificaciones distintas de asfalto, de 4%, 4.5% y 5%, Siendo su resultado óptimo de 4,5%, el cual pudo obtener gracias a diferentes ensayos realizados para probar la factibilidad del diseño, así mismo presentando un coeficiente de permeabilidad de 0,1625 cm/seg. Concluyó que la mezcla diseñada es permeable, al ser utilizada como pavimento permitirá el traspaso de agua a través de sus poros”.

- d) Bezih, y otros (2025), en su artículo científico, “*Experimental study of shear strength and CBR improvement of silty clay soil reinforced with waste tires*” realizaron un estudio cuyo objetivo fue evaluar si el neumático desecho granulado mejora las propiedades mecánicas de un suelo limoso-arcilloso, midiendo la resistencia al corte y su capacidad de soporte CBR, el cual preparó varias muestras de laboratorio mezclando el suelo en distintos porcentajes 10%, 20%, 30%, y 40%. De CBR con 2.5%, 5%, 7.5%, 10%, y 12.5%, de granulado de neumático usó (0/3 mm and 0/6 mm). Al añadir granulado mejoró la resistencia del suelo, aumentando su cohesión y el ángulo de fricción en un 40%. En el CBR observaron que el porcentaje de 7,5% fue más efectivo, logrando el incremento del parámetro evaluado, sin embargo las mejoras no fueron indefinidamente, a más granulado puede dejar de aportar beneficios proporcionales y el efecto depende de la granulometría, la compactación y el tipo de suelo finalmente teniendo como conclusión que el granulado de neumático desechado puede ser una alternativa técnica y sostenible para reforzar suelos limosos-arcillosos mejorando corte y CBR, con porcentaje óptimo de 7,5% mencionaron que aunque la dosificación y la



compactación deben ajustarse según suelo y aplicación.

- e) Velasquez, y otros (2024), en su revista científica denominada, “Habilitación de Vías de Tercer Orden con Grava, Emulsión Asfáltica y Grano de Caucho”, tuvo como objetivo diseñar un pavimento a base de materiales granulares, granos de caucho reciclado y emulsión asfáltica, para mejorar la estabilidad de vías rurales en la provincia de Manabí. Llegando a resultados, de un 9% de emulsión y 10% de caucho reciclado siendo óptimos, con una resistencia de 847.1 libras. Su composición con 65% de Asfalto AC 20, 34.30% de agua y 0.70% de emulsificante mejora la estabilidad y durabilidad del pavimento. Además, su implementación cuesta \$78,557.30 por km y es una solución económica, sostenible y ambientalmente amigable para vías rurales.

Analizaron la mezcla de grava, emulsión asfáltica y grano de caucho para la construcción de vías de tercer orden, centrándose en caminos rurales. En su investigación facilito datos sobre la estabilidad y resistencia de mezclas que al incorporar caucho reciclado y emulsión asfáltica. Con este tratamiento lograron alcanzar notables resultados significativos en las propiedades mecánicas, incrementando su CBR, asimismo muestra el impacto que tiene la utilización en respuesta estructural de un pavimento cuya subbase mejoró con emulsión en comparación con una base tradicional utilizando el método empírico- mecanicista.

3.1.2 Nacionales

- a) Según el trabajo de investigación de Surco Bocanegra (2022), el cual titula “Estabilización de suelos con emulsión asfáltica y tereftalato de polietileno con fines en carretera no pavimentada”, tuvo como objetivo, evaluar las propiedades mecánicas del suelo empleando emulsión asfáltica y tereftalato de polietileno como agente estabilizador. Su metodología de investigación fue de tipo descriptiva y de diseño experimental. La población de estudio de esta investigación llevó a cabo en el departamento de Lambayeque, localidad de Huanabal, a una altitud de 62 m.s.n.m. La población analizada consistió en un sector de carretera



de 5 km de longitud. Empleó la metodología diseño transversal, tipo aplicativo, experimental, alcanzando un resultado, en las muestras de suelo de 05 calicatas, a las que efectuó ensayos de humedad, granulometría, límites de Atterberg, proctor estándar y capacidad de soporte (CBR) a cada muestra de suelo en estado natural. Para la estabilización de suelos, mezcló emulsión asfáltica y PET (3%+2%, 3%+4%, 3%+6%, 3%+8%; 6%+2%, 6%+4%, 6%+6%, 6%+8%; 9%+2%, 9%+4%, 9%+6%, 9%+8%; 12%+2%, 12%+4%, 12%+6%, 12%+8%), realizó así 16 combinaciones. Los resultados mostraron que la mejor mezcla de emulsión asfáltica y PET para la muestra de suelo analizada fue entre 6% y 2%, llegó a la conclusión que el uso de estos productos si mejoraron la capacidad portante de los suelos de tipo SM, para ser utilizado como una subrasante mejorada.

- b) Romero (2022), en su investigación, “Estabilización de suelos con aditivos químicos para disminuir la infiltración del agua en la capa granular de un pavimento económico”, presentó como objetivo evaluar el grado en el que uso de agentes estabilizadores disminuye la infiltración del agua en el suelo de la capa granular del pavimento de bajo presupuesto. Su estudio determinó la zona “La Torre” el cual es una cantera ubicada en la provincia de Huaylas, región Ancash, la metodología de la muestra no probabilístico y guiada por su objetivo específico incluyó 11 muestras (9 calicatas y 2 trincheras) en toda el área de la cantera. Asimismo, evaluó los cambios en la infiltración hídrica a través de los ensayos de capilaridad y permeabilidad a materiales tratados con los agentes químicos estabilizadores más empleados en el país, destinados a capas granulares de pavimentos económicos. Como marco normativo aplicó la UNE- EN 1925 para caracterizar la absorción capilar y la ASTM D5084 para cuantificar la conductividad hidráulica mediante permeámetro de pared flexible. Los resultados demostraron que el cemento y el organosilano son los aditivos más eficientes en impermeabilización, reduciendo la absorción capilar en 55% y 79% respectivamente, mientras el aceite sulfonado apenas alcanzó 3%. En permeabilidad, el organosilano presentó el menor valor ($K = 8.30E-08$



cm/s), seguido por el cemento ($K = 1.12E-05$ cm/s) y el aceite sulfonado ($K = 6.15E-06$ cm/s). Esto confirma que el cemento y organosilano mejoran integralmente las propiedades de la capa granular, including su resistencia y durabilidad.

- c) Al igual que la investigación de Cabrera Pasca, y otros (2021), titulado “Diseño y evaluación del afirmado estabilizado con emulsión asfáltica de la vía hacia el Santuario Virgen de Chapi Charcani-Cayma”, propusieron como objetivo realizar el diseño del afirmado mejorado con emulsión asfáltica catiónica de rotura lenta modificada con polímeros de la vía hacia el santuario de Charcani Chapi Chico. Los autores aplicaron la metodología de diseño de estructuras de pavimentos en afirmados en carreteras secundarias y terciarias, sus volúmenes del tránsito son menores de 452 000 ejes equivalentes de 8.2 tn en el carril de diseño durante el periodo de diseño de carretera. El uso de emulsión asfáltica brinda una vía con menor grado de deterioro, una superficie exenta de polvo, además de superar el 100% de CBR, lo cual hace que estas mejoras en las características de la superficie de rodadura demandan menor frecuencia de mantenimiento periódico debido al mejoramiento de la vida útil al incrementar el periodo de diseño de 5 años (afirmado) a 10 años (emulsiones asfálticas). Esta emulsión asfáltica demanda menores costos de las actividades de mantenimiento, durante el periodo de servicio del proyecto, implicando una mejor utilización de los recursos del Estado. Finalmente concluyeron en laboratorio que la mezcla material granular-emulsión dio como resultado: Proctor modificado de 1.87 g/cm³, un CBR al 100% de la MDS de 110%, abrasión de probetas Marshall de 36%, en la compresión obtuvo un valor de 3.37 kg/cm², para el esfuerzo de tracción se obtuvo un valor de 2.04 kg/cm², finalmente realizaron el ensayo de pista de laboratorio obteniéndose una velocidad de deformación de 186.3×10^{-3} antes de terminar los 120 min.
- d) Así mismo el trabajo de investigación realizada por Amaro, y otros (2021), titulado “Subrasante Mejorada Aplicando Caucho Granular en Suelos Cohesivos de la Avenida Punchauca – Carabayllo, 2021”,



plantearon como meta principal, mejorar la estructura de la subrasante de suelos cohesivos mediante la incorporación de caucho granular. La investigación fue de tipo aplicada de nivel aplicativo y con un diseño cuasiexperimental.

El estudio fue desarrollado en la Av. Punchauca incluyeron la excavación de tres calicatas, a cuyas muestras incorporaron caucho granular en dosificaciones de 3%, 6%, 9% y 12% los cuales fueron analizados en el laboratorio con la intención de determinar la dosificación óptima de caucho. En los resultados obtenidos demostraron que el 6% de caucho granular optimiza el CBR en suelos SC, elevando la resistencia de 4.3% a 14.9%. Concluyeron que con la aplicación de caucho granular mejoró la subrasante en suelos cohesivos, cumpliendo por lo establecido MTC Suelos, Geología y Pavimentos.

- e) Pérez Tueros (2021), en su investigación titulado “Estabilización de las propiedades del suelo con emulsión asfáltica catiónica para subrasante en el jirón Eucalipto, Sapallanga – Huancayo”, el autor tuvo como objetivo, evaluar el resultado de la estabilización de las propiedades del suelo con emulsión asfáltica catiónica para la subrasante, el estudio fue realizado en una zona identificado como del Jr. Eucaliptos entre el Jr. Los Lirios y el Jr. Las Azucenas en el departamento de Junín, con una muestra no probabilístico intencional donde utilizó el suelo extraído de una calicata, los resultados determinaron que con la adición de emulsión asfáltica catiónica varía la compactación del suelo incrementando la máxima densidad seca en, 1.85 g/cm³ a 1.90 g/cm³, 1.95 g/cm³ y 1.92 g/cm³, reflejando un incremento de hasta 5.55 %; en cuanto al óptimo contenido de humedad este redujo de 13.44 % a 11.86 %, 9.49 % y 8.69 %, resumiendo en una reducción de hasta 35.35 %; el CBR al 95 % de la MDS presentó un aumento de hasta 361.96 % más pues, pasó de 1.53 % a 3.76 %, 7.08 % y 4.94 %, en todos los casos con la adición de 8 %, 10 % y 12 % de emulsión asfáltica catiónica de rotura media. Asimismo, de acuerdo con el CBR obtenido, finalmente llegó a la conclusión que, con la adición de emulsión asfáltica catiónica mejoró las propiedades del suelo, en cuanto a su consistencia, compactación y capacidad de soporte,



esto con 10 % cumpliendo para subrasante.

- f) Cosar (2023), titulado “Estabilización de suelos arcillosos usando caucho granular de neumático para fines de carretera no pavimentada”, el cual tuvo como objetivo analizar la estabilización de suelos arcillosos con caucho granular (5%,10%, 15% y 20%), trabajó en 3 km de carretera no pavimentada de Túcume-Cachinche (Lambayeque, Perú), mediante 6 calicatas. Fue empleado una metodología de tipo aplicada, un diseño experimental. Los resultados demostraron que el caucho granular no logró estabilizar significativamente el suelo arcilloso. El CBR natural de 5.6% solo aumentó levemente a 6.60% con 5% de caucho, pero disminuyó progresivamente con mayores dosificaciones CBR=3.1% al 10% de caucho, CBR=2.5% al 15% de caucho y CBR=1.5% al 20% de caucho, invalidando su uso para subrasante en vías no pavimentadas.

3.1.3 Locales

- a) Tacca (2024), en su tesis, “Efecto mecánico de suelos arcillosos con adición de polvo de caucho para el mejoramiento de la subrasante en la Av. Santo Domingo - Abancay - Apurímac, 2022”, dicha investigación tuvo como objetivo, evaluar la incorporación de polvo de caucho influye en la resistencia de suelos arcillosos, especialmente en el índice de CBR de la subrasante, con el propósito de encontrar una alternativa que mejore la baja capacidad de soporte, con una población finita, que determina la progresiva km 0+00 al km 0+400 de la Av. Santo Domingo, Abancay – Apurímac, seleccionados 3 puntos de investigación en la subrasante los cuales fueron las calicata C-01, C-02 y C- 03 con el fin de obtener un representación más apropiada. El estudio siguió un enfoque cuantitativo, metodología de tipo aplicada, de nivel explicativo y diseño experimental, el autor usó métodos teóricos y científicos como libros de geotecnia, mecánica de suelos y manuales de ensayo. Tomaron muestras de 3 tipos de zonas distintas, eligiendo la que tiene mayor proporción de arcilla, según el SUCS. En el rango de arcilla de plasticidad media con arena, luego realizaron pruebas con diferentes porcentajes de caucho, 3%, 5%, 7% y 9% en relación con el peso de la muestra. Los resultados mostraron un gran aumento en el CBR, con la proporción más adecuada del 7%



incrementando su resistencia del suelo de 5.2% a 11.6%. En conclusión, esto demostró que el caucho mejora la capacidad de la subrasante, elevando su clasificación de un deficiente $CBR < 6\%$ a mejorar con un $CBR < 10\%$ según por el MTC.

3.2 Marco teórico

3.2.1 Infraestructura vial en el Perú

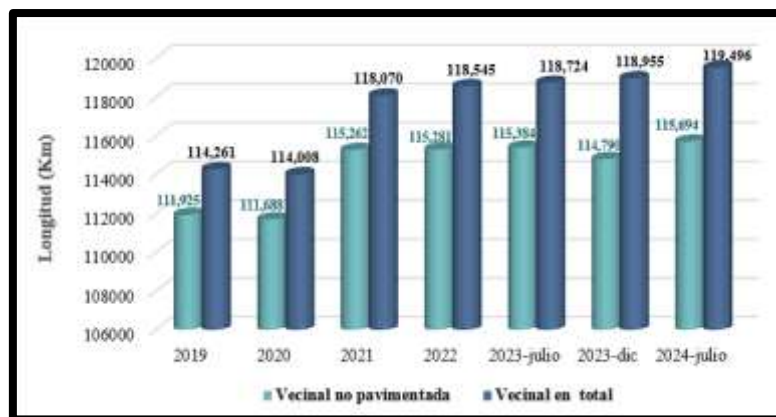
La infraestructura vial, es un conjunto de construcciones que integra una carretera, el cual está compuesta por carreteras, puentes, túneles y estructuras complementarias, los cuales permitirán la conectividad y el desarrollo nacional, estas infraestructuras estarán reguladas por el reglamento nacional de gestión de infraestructura vial (DS N° 034-2008-MTC), el cual establece estándares técnicos para su diseño, construcción, mantenimiento y operación (MTC, 2014)

3.2.1.1 Clasificación de vía según jerarquía

Esta clasificación es establecida por el Sistema Nacional de Carreteras (SINAC), del ministerio de transportes y comunicaciones (MTC).

- **Red vial nacional.** Son carreteras circunscritas al ámbito nacional, cuya función es articular las capitales de los departamentos entre sí (SINAC, 2024).
- **Red vial departamental o regional.** son carreteras circunscritas al ámbito de un gobierno regional. Articula básicamente a la Red vial nacional con la Red vial vecinal o rural. (SINAC, 2024).
- **Red vial vecinal o rural.** son carreteras circunscritas al ámbito local, cuya función es articular las capitales de provincia con capitales de distrito, y con las redes viales nacional y departamental o regional (SINAC, 2024).





NOTA

En la figura se muestra un gráfico en el cual se menciona la relación comparativa en kilómetros entre el total de vías vecinales y vías no pavimentadas a nivel nacional, entre los años 2019 a julio del 2024. FUENTE: MTC, 2024

Figura 1— Vías vecinales a nivel nacional

3.2.1.2 Red vial departamental de Apurímac

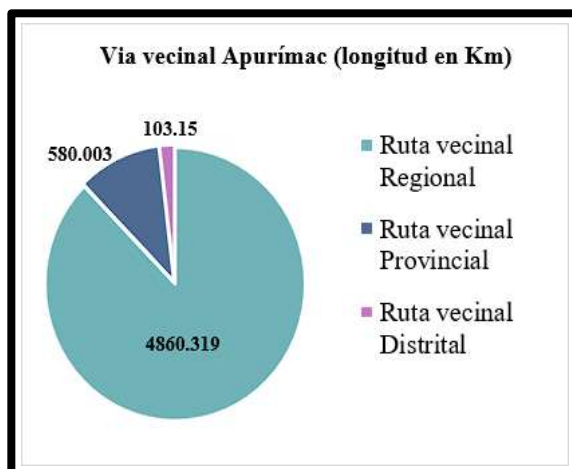
La red vial en Apurímac lo compone principalmente las vías no pavimentadas las cuales conectan provincias y distritos rurales, estas están gestionadas por el ministerio de transporte y comunicaciones (MTC) y por gobiernos locales con la participación del instituto vial provincial (IVP) en la gestión y planificación de las vías provinciales, caminos rurales y vecinales. La SINAC, menciona que las vías vecinales son conectoras distritales y locales, el cual cuenta con una codificación y por la general son de superficie sin pavimentar. Para el 2024 la SINAC, menciona que la región Apurímac cuenta con un total de 686.043 km de vía pavimentada y 6,753.569 km de vías no pavimentadas, entre las cuales:

- 1,276.953 km son rutas nacionales
- 1,302.34 km son rutas departamentales
- 4,860.319 km son rutas vecinales

También menciona un total de 580.003 km de vía vecinal no pavimentada en la provincia de Abancay y Según el plan vial



provincial menciona que el distrito de Abancay cuenta con 103.15 km de vía vecinal sin rehabilitar.



NOTA

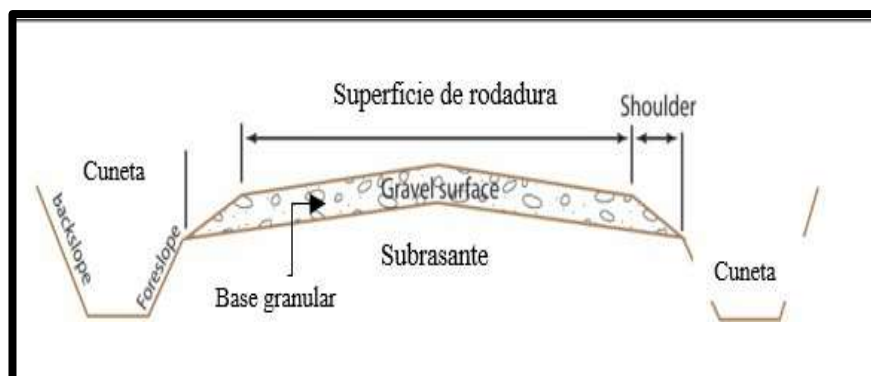
En el gráfico se muestra la distribución de vías vecinales no pavimentadas, con 4,860.319 km a nivel regional, 580.003 km a nivel provincial y 103.15 km en el distrito de Abancay sin rehabilitar, según el Plan vial provincial.

FUENTE: SINAC, 2024

Figura 2 — Vías vecinales a nivel regional

3.2.1.3 Características y tipos de carreteras no pavimentadas

Según el manual de carreteras de mantenimiento o conservación vial del MTC, menciona que por lo general estas vías son de materiales locales debidamente compactadas, son: carreteras de tierra (suelo natural y mejoras con grava seleccionada), caminos de grava (material pétreo natural sin procesar) (MTC, 2018 pág. 598).



NOTA

Se muestra en la figura la sección transversal de un camino no pavimentado

FUENTE: Dawson y otros 2021

Figura 3 — Sección transversal de un camino no pavimentado

3.2.1.4. Patologías frecuentes en vías no pavimentadas

Las vías vecinales por lo general son de superficie de rodadura de afirmado o sin afirmar, por lo cual surgen rápidos deterioros, que son causados por efecto de tráfico vehicular, clima e inadecuado drenaje, polvo MTC (2018).

Tabla 2— Deterioro o fallas en vías no pavimentadas

Código de daño	Deterioros / Fallas	Gravedad
1	Deformación	1: Huellas/hundimientos sensibles al usuario pero < 5cm 2: Huellas/hundimientos entre 5 cm y 10 cm 3: Huellas/hundimientos ≥ 10 cm
2	Erosión	1: Sensible al usuario pero profundidad < 5 cm 2: Profundidad entre 5 cm y 10 cm 3: Profundidad ≥ 10 cm
3	Baches (Huecos)	1: Pueden repararse por conservación rutinaria 2: Se necesita una capa de material adicional 3: Se necesita una reconstrucción
4	Encalaminado	1: Sensible al usuario pero profundidad < 5 cm 2: Profundidad entre 5 cm y 10 cm 3: Profundidad ≥ 10 cm
5 y 6	Lodazal y cruce de agua	1: Transitabilidad baja o intransitabilidad en épocas de lluvia No se definen niveles de gravedad

NOTA

En la tabla se muestra el grado de gravedad de cada tipo de falla o deterioro de calzada del afirmado, según el Manual de carreteras mantenimiento o conservación vial.

FUENTE: MTC, 2018

3.2.1.4 Factores geotécnicos que afectan a vías no pavimentadas

Das (2010), Holtz, y otros (2011) mencionan que son varios los factores que influyen en la estabilidad de un camino, como las propiedades del suelo, lo ambiental, el diseño de la vía y la capacidad de soporte frente a diferentes cargas.



Tabla 3 — Factores que afectan la estabilidad de las vías no pavimentadas

Factores	Descripción
Tipo de suelos	La composición y propiedades del suelo, como granulometría, plasticidad y capacidad de carga son cruciales. Suelos finos como arcillas son más propensos a deformaciones, mientras que suelos granulares ofrecen mayor estabilidad.
Contenido de humedad	La humedad afecta significativamente la resistencia del suelo. Exceso de agua reduce la capacidad de soporte, especialmente en suelos cohesivos, mientras que la falta de agua en suelos no cohesivos puede causar polvo y pérdida de cohesión.
Compactación	Una adecuada compactación aumenta la densidad del suelo, mejorando su resistencia y reduciendo la susceptibilidad a deformaciones. Una compactación insuficiente lleva a una superficie inestable.
Tráfico y carga	El volumen y tipo de tráfico influyen en la degradación de la vía. Cargas pesadas y tráfico intenso aceleran el deterioro, especialmente si el suelo no es adecuado.
Drenaje	Un buen drenaje es esencial para evitar acumulación de agua, que puede debilitar el suelo. Sistemas de drenaje inadecuados causan erosión y reducen la estabilidad.
Clima y condiciones ambientales	Factores como lluvia, temperatura y viento afectan la humedad y erosión del suelo. Condiciones extremas pueden acelerar el deterioro.
Mantenimiento	El mantenimiento regular, como reparación de baches y control de erosión, es crucial para preservar la estabilidad de la vía.
Vegetación	La vegetación puede proteger contra la erosión, pero raíces de árboles grandes pueden alterar la estructura del suelo.
<p>NOTA</p> <p>En la tabla se muestra un resumen de las teorías de Das y Holtz y otros, se menciona los diversos factores que afectan la estabilidad de las vías no pavimentadas.</p> <p>FUENTE: Das, 2010 y Holtz, y otros 2011</p>	

3.2.2 Estabilización de suelos

La estabilización de suelos es un proceso mediante el cual se mejora la capacidad de soporte, durabilidad y resistencia de un suelo natural mediante la modificación de sus propiedades físicas, químicas o mecánicas, logrando que sea apto para su uso en infraestructuras viales. Según Das (2013) y Holtz et al. (2011), la estabilización constituye una técnica clave para incrementar la resistencia al corte, reducir



deformaciones y mejorar el comportamiento volumétrico frente a la humedad, aspectos fundamentales en carreteras no pavimentadas.

Los métodos de estabilización pueden ser mecánicos, físicos o químicos; estos últimos incorporan aditivos como cal, cemento, polímeros o emulsiones, que modifican la estructura interna del suelo y su relación agua-partículas MTC (2014).

3.2.2.1 Los suelos

Los suelos constituyen el material fundamental sobre el cual se construyen las obras viales; su comportamiento depende de su origen, textura, composición y estructura interna. Según Terzaghi y Peck (1996), el suelo es un sistema trifásico formado por partículas sólidas, agua y aire, cuya interacción determina propiedades esenciales como cohesión, fricción interna, compresibilidad, permeabilidad y resistencia al corte. En vías no pavimentadas, los suelos granulares como gravas y arenas suelen emplearse en capas de afirmado por su buena capacidad de soporte y baja compresibilidad, mientras que los suelos finos (limos y arcillas) presentan mayor susceptibilidad a la humedad y requieren estabilización para garantizar el desempeño estructural del afirmado MTC (2018).

a) Clasificación de suelos:

La clasificación de suelos permite identificar la naturaleza y comportamiento del material, facilitando la toma de decisiones en el diseño y estabilización de estructuras viales. Los sistemas más utilizados en ingeniería civil son el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y el sistema de la AASHTO. Según Das (2013), el SUCS clasifica los suelos en dos grandes grupos: suelos gruesos (gravas y arenas) y suelos finos (limos y arcillas), basándose en la granulometría, límites de Atterberg y comportamiento plástico. Por su parte, la AASHTO agrupa los suelos en función de su desempeño como subrasante, utilizando



parámetros como la fracción que pasa el tamiz N° 200, el índice plástico (IP) y los límites líquido y plástico Das (2013).

Tabla 4 — Sistema de clasificación SUCS y AASHTO

Sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS)				
Suelos de grano grueso	Gravas (G)	Partículas mayores a 4.75 mm (retenidas en la malla No. 4).		
	Arenas (S)	Partículas entre 0.075 mm y 4.75 mm (pasan la malla No. 4 y son retenidas en la malla No. 200).		
	Subclasificación	Bien graduado (W)	Curva de distribución de tamaños uniforme.	
		Mal graduado (P)	Curva de distribución de tamaños no uniforme.	
Suelos de grano fino	Limo (M)	Suelos con partículas menores a 0.075 mm (pasan la malla No. 200) y baja plasticidad.con poco o ninguna plasticidad		
	Arcilla (C)	Suelos con partículas menores a 0.075 mm y alta plasticidad.		
	Subclasificación	Baja plasticidad (L)	suelos con baja plasticidad	
		Alta plasticidad (H)	suelos con alta plasticidad	
		Orgánicos (O)	Suelos con materia orgánica. OL: limo orgánico y OH: Arcilla orgánica.	
		Inorgánicos	Suelos sin materia orgánica	
	Basados en el índice de plasticidad (IP) y el límite líquido (LL).			
Símbolos adicionales	Pt	suelos orgánicos altamente compresibles (turba).		
Clasificación según el sistema AASHTO				
Grupos principales		Concepto		
A-1		Gravas y arenas bien graduadas.		
A-2		Suelos limosos o arcillosos con grava y arena.		
A-3		Arenas finas.		
A-4		Limos.		
A-5		Limos con alta plasticidad.		
A-6		Arcillas.		
A-7		Arcillas con alta plasticidad.		
Índice de grupo (IG)		Se calcula para evaluar la calidad del suelo dentro de cada grupo. Un IG bajo indica mejor calidad para construcción.		
<p>NOTA</p> <p>En la tabla se muestra la clasificación SUCS y AASHTO herramientas fundamentales para la clasificación e identificación de los suelos según sus propiedades.</p> <p>FUENTE: Das, 2013</p>				

b) Propiedades de los suelos:

Las propiedades de los suelos determinan su comportamiento ante cargas y variaciones de humedad, siendo fundamentales para el diseño y construcción de caminos no pavimentados. Entre las propiedades más relevantes destacan la granulometría, el índice de plasticidad, el contenido de humedad, la (MDS), el CBR y la permeabilidad Holtz, (2011).



Tabla 5 — Clasificación general de las propiedades del suelo

Propiedades del suelo		Descripción
Propiedades físicas del suelo	Textura	Describe la proporción de partículas de diferentes tamaños (arena, limo y arcilla).
	Estructura	Se refiere a la disposición de las partículas del suelo y los espacios vacíos entre ellas.
	Porosidad	Es la relación entre el volumen de vacíos y el volumen total del suelo.
	Permeabilidad	Capacidad del suelo para permitir el flujo de agua a través de él.
Propiedades mecánicas del suelo	Resistencia al corte	Capacidad del suelo para resistir fuerzas que tienden a deformarlo o romperlo.
	Compresibilidad	Grado en que el suelo se compacta bajo cargas aplicadas.
	Consistencia	Describe la firmeza o dureza del suelo, especialmente en suelos cohesivos como la arcilla.
Propiedades hidráulicas del suelo	Capacidad de retención de agua	Cantidad de agua que el suelo puede almacenar.
	Conductividad hidráulica	Facilidad con la que el agua fluye a través del suelo.
Propiedades químicas del suelo	Composición mineralógica	Tipo de minerales presentes en el suelo.
	pH	Medida de la acidez o alcalinidad del suelo.
	Capacidad de intercambio catiónico (CIC):	Capacidad del suelo para retener y liberar nutrientes.
<p>NOTA En la tabla se puede apreciar de manera resumida las propiedades del suelo, los cuales son fundamentales para el diseño y construcción de obras civiles. FUENTE: Crespo, 2004</p>		

- c) **Análisis granulométrico NTP 339.128.-** Según Holtz et al. (2011), suelos con mayor proporción de partículas gruesas presentan mejor capacidad de soporte, mientras que los suelos finos son más susceptibles a la expansión y pérdida de resistencia al saturarse (INACAL, 2019). A través de la NTP 339.128, con el objetivo de conseguir la distribución de tamaños de partículas, analizando la calidad del suelo, mediante el uso de los tamices, pudiendo ser suelos, agregados entre otros (INACAL, 2019)



Tabla 6 — Clasificación de suelos según tamaños de partículas

Tipo de material		Tamaño de partículas
Grava		75mm – 4.75mm
Arena		Arena gruesa: 4.75mm – 2.00mm
		Arena media: 2.00mm- 0.425mm
		Arena fina: 0.425mm – 0.075mm
Material fino	Limo	0.075mm – 0.005mm
	Arcilla	Menor a 0.005mm

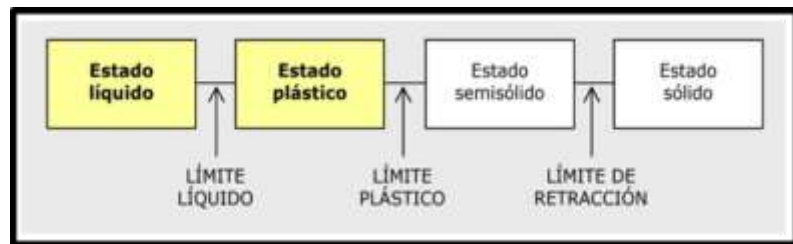
NOTA

En la tabla se muestra la clasificación cuantitativa de la distribución de tamaño de partículas de los suelos dado por el instituto nacional de calidad, NTP 339.128

FUENTE: INACAL, 2019

- d) **Contenido de humedad, NTP 339.127.-** Según INACAL (2019), NTP 339.127, esta propiedad permite evaluar el estado del suelo y su influencia en la compactación, permeabilidad y resistencia. La humedad afecta directamente la estructura interna del suelo: a niveles bajos, el material es rígido y poco trabajable, mientras que, a niveles elevados, se vuelve más compresible, pierde cohesión y disminuye su resistencia al corte Das (2013).
- e) **Límites de Atterberg, NTP 339.129.-** Según la NTP 339.129, los límites de Atterberg permiten evaluar la consistencia y la susceptibilidad del suelo frente a variaciones de humedad, siendo un parámetro clave para identificar su comportamiento plástico. En términos de comportamiento geotécnico, valores elevados se asocian con mayor plasticidad y, por ende, mayor probabilidad de deformaciones y pérdida de desempeño ante condiciones de saturación, lo cual resulta crítico en suelos finos empleados como subrasante Das (2013)



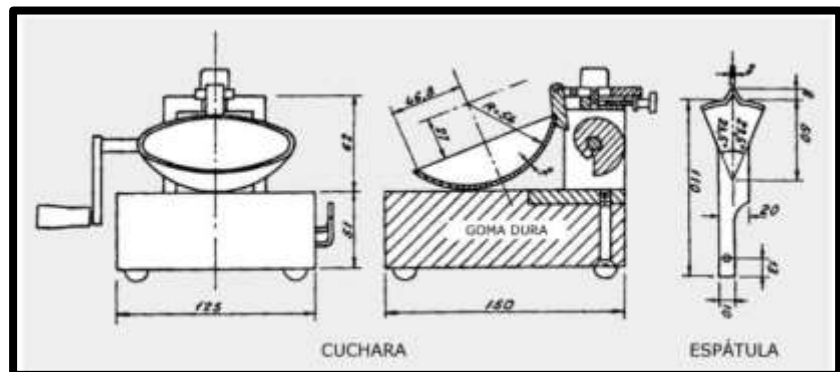


FUENTE: Bañón, y otros 2000

Figura 4 — Límites de Atterberg

- **Límite líquido**

De acuerdo con Bañón y Beviá (2000) y conforme al procedimiento establecido en la NTP 339.129, el límite líquido es un parámetro que permite caracterizar la consistencia de los suelos finos y su sensibilidad ante variaciones de humedad, al representar la frontera superior de plasticidad. Este indicador es relevante porque ayuda a identificar la tendencia del suelo a perder rigidez y aumentar su deformabilidad cuando incrementa el contenido de agua, información clave para evaluar su comportamiento en condiciones húmedas y su desempeño como material de subrasante.



FUENTE: Bañón, y otros 2000

Figura 5 — Cuchara de Casagrande

- **Límite plástico**

Según Holtz, y otros (2011) y conforme al procedimiento de la NTP 339.129, el límite plástico es un parámetro que permite



identificar el umbral de humedad a partir del cual un suelo fino adquiere comportamiento plástico, reflejando su cohesión y trabajabilidad. En términos de desempeño geotécnico, valores bajos se asocian con menor plasticidad y mayor tendencia a agrietarse o desintegrarse durante la manipulación, mientras que valores altos evidencian mayor cohesión y propensión a deformaciones plásticas cuando el suelo incrementa su contenido de agua, lo que resulta relevante para evaluar su comportamiento en subrasantes.

- f) **Máxima densidad seca.** - Das (2013), menciona que alcanzar una MDS elevada implica una estructura interna del suelo más cerrada, menor cantidad de vacíos y mayor resistencia a la deformación bajo carga. En vías no pavimentadas, una MDS adecuada mejora la estabilidad del afirmado y reduce la aparición de ahuellamientos y baches. En esta investigación, la MDS es un indicador clave para evaluar cómo el (NRG) modifica la compactación del suelo, pudiendo aumentar o disminuir la densidad según su porcentaje y su interacción con las partículas minerales.

- g) **Porcentaje de expansión.** De acuerdo con Holtz, Kovacs y Sheahan (2011), la expansión depende de la estructura mineralógica del suelo y su cohesión, y puede provocar deformaciones no deseadas tras periodos prolongados de humedad. En el presente estudio, el porcentaje de expansión permite analizar cómo la incorporación de NRG y (EC) modifica el comportamiento volumétrico del material, disminuyendo la susceptibilidad a la humedad y mejorando la estabilidad dimensional del afirmado.

- h) **Permeabilidad.** Según la Ley de Darcy (1856), la permeabilidad depende del tamaño de partículas, la porosidad,



el grado de saturación y la compactación del suelo. Suelos granulares tienden a tener alta permeabilidad, mientras que los finos presentan permeabilidad baja, pero con mayor susceptibilidad a cambios volumétricos.

En caminos afirmados, una alta permeabilidad favorece la infiltración, debilitando la estructura interna, reduciendo el módulo de soporte y acelerando el deterioro por erosión interna. En esta investigación, la permeabilidad es un parámetro esencial para determinar el efecto impermeabilizante de la emulsión catiónica (EC), así como el comportamiento del suelo-NRG ante el flujo de agua.

3.2.2.3. Tipos de estabilizaciones

La estabilización de suelos comprende un conjunto de técnicas orientadas a mejorar las propiedades físicas, estructurales e hidráulicas del suelo, con el fin de incrementar su resistencia, durabilidad y capacidad de soporte frente a cargas y variaciones ambientales. De acuerdo con Romero (2022) y Das (2010), los métodos de estabilización se clasifican en física, mecánica y química, cada uno de los cuales actúa sobre el suelo mediante mecanismos específicos que modifican su estructura interna y comportamiento. La selección del tipo de estabilización depende de la naturaleza del suelo, las condiciones de humedad y los objetivos del proyecto. En el presente estudio, esta clasificación sustenta la elección de neumático reciclado granular (NRG) y emulsión catiónica (EC) como aditivos no tradicionales para la estabilización e impermeabilización del afirmado de la vía AP-650.

a) Estabilización física

La estabilización física comprende procedimientos que modifican las propiedades del suelo mediante la mezcla, sustitución o combinación de materiales, sin alterar



químicamente su estructura. Según Romero (2022), este tipo de estabilización se basa en ajustar la granulometría del suelo mediante la incorporación de suelos o agregados con diferentes tamaños de partículas, de modo que se obtenga una mezcla más densa, estable y resistente. También incluye técnicas como el uso de geotextiles, geomallas y geosintéticos, los cuales actúan como elementos de refuerzo que mejoran la distribución de cargas y reducen deformaciones.

En vías no pavimentadas, la estabilización física permite corregir deficiencias como exceso de finos, baja capacidad de soporte o falta de uniformidad granulométrica. Este tipo de estabilización aporta mejoras en la densidad seca máxima, disminuye la permeabilidad, y contribuye a aumentar el CBR.

b) Estabilización mecánica

Según Das (2010), la compactación es fundamental para el desempeño de un suelo destinado a capas de afirmado, ya que controla parámetros como la máxima densidad seca, la humedad óptima y la resistencia al corte.

Este método no modifica químicamente el suelo, sino que optimiza su estructura interna al acomodar las partículas sólidas bajo esfuerzos dinámicos o estáticos. En vías no pavimentadas, una compactación adecuada incrementa el CBR, reduce la susceptibilidad al agua, y controla deformaciones como ahuellamientos y asentamientos.

c) Estabilización química

La estabilización química consiste en modificar las propiedades del suelo mediante la incorporación de agentes reactivos o aditivos que generan un cambio físico - químico en la estructura del material estos estabilizantes interactúan con las partículas minerales para mejorar la cohesión, reducir la plasticidad, disminuir la permeabilidad y aumentar la



resistencia a cargas repetidas Romero Villajuan (2022).

Los estabilizantes químicos se dividen en dos grandes grupos:

- **Tradicional (cementantes):** Incluyen cal, cemento, escoria siderúrgica, asfalto y mezclas ceniza-cemento. Estos materiales están regulados mediante normas técnicas que establecen criterios de dosificación, procedimientos de mezclado y parámetros de control de calidad. Su acción se basa en procesos como: Floculación y aglomeración de partículas finas, Cementación mediante reacciones puzolánicas, Impermeabilización mediante recubrimiento asfáltico, Romero Villajuan (2022).

- **No tradicionales:** Incluyen polímeros, enzimas, lignosulfonatos, cloruros y estabilizantes sintéticos. Estos aditivos no poseen normativas uniformes de aplicación y su desempeño suele evaluarse experimentalmente, estos agentes actúan modificando la microestructura del suelo, sellando poros, incrementando la adherencia interna y reduciendo la infiltración de agua Romero Villajuan (2022).
Dentro de esta categoría se encuentran:
 - El NRG, de tipo no tradicional, mejora la flexibilidad, reduce la densidad y puede incrementar el CBR al actuar como refuerzo dentro de la matriz granular.
 - La EC, considerada un estabilizante químico-asfáltico, recubre las partículas del suelo, disminuye la permeabilidad y aumenta la cohesión, proporcionando una capa más estable y resistente al flujo de agua.



Tabla 7 — Clasificación de aditivos no-tradicionales

Absorbente del agua	Derivados del petróleo	No derivados del petróleo	Electroquímicos	Polímeros sintéticos	Aditivos de arcilla
Cloruro de calcio	Emulsión catiónica	Grasa de animales	Enzimas	Acetato polivinico	Bentonita
Cloruro de sodio	Líquidos asfálticos	Lignosulfatos	Productos iónicos	Vinil acrílico	Montmorillonita
Cloruro de Mg	Emulsiones de asfalto modificado	Melaza azúcar de beterraga	Aceite sulfonatos		

NOTA

En la tabla se muestra los diversos aditivos no tradicionales, según la dirección de estudios especializados.

FUENTE: MTC, 2022

3.2.2.2 Principios de la estabilización del suelo

Según el Manual de Carreteras, sección suelos y pavimentos, este método busca reforzar las condiciones estructurales del suelo, perfeccionando la resistencia mecánica frente a cargas y esfuerzos. Para ello emplea estabilizantes (cloruro de sodio, cemento, la cal, emulsiones asfálticas), estos integrados mediante procedimientos mecánicos. Según el MTC (2014) pág. 92 deben cumplir criterios técnicos para mejorar la capacidad portante del afirmado.

- Material apto para la capa de la subrasante cuando el suelo tenga un CBR \geq a 6%, en caso de no cumplir aplicar técnicas de mejora o reemplazar el material.
- Para prevenir la contaminación de las capas del pavimento causada por la infiltración de humedad a través de suelos arcillosos o limosos de la subrasante, la solución técnica recomendada consiste en colocar una capa de material selecto de 10 cm de espesor protegida con geotextil.
- Para definir el tipo de estabilizaciones, es muy esencial identificar el tipo de suelo. En esta predomina el SM o SC.

a) Estabilización de vías no pavimentadas

Para la estabilización de caminos no pavimentados, los materiales de la subrasante, del afirmado, deben cumplir con los valores del CBR de diseño, si no lo cumplen, éstos deben realizar técnicas de estabilización según tipo de suelo como mezclas granulométricas mecánico, tipos de aditivo físicos y químicos con el fin de mejorar su resistencia y durabilidad. MTC (2008) pág. 155. Para la capa superficial de afirmado, este material variara según la región, provenientes de canteras de cerro o de rio, (piedra, arena y finas, como arcillas) de tamaño adecuado, los cuales cohesionan estos agregados y mejoran la estabilidad de la capa.

Tabla 8 — Factores geotécnicos que inciden la estabilización del suelo

Factores geotécnicos				
Características	Tipo de suelo	Contenido de humedad	Capacidad de soporte (CBR)	Permeabilidad
Descripción	El tipo de suelo (arcilla, limo, arena, grava) influye en su capacidad de soporte y respuesta a la estabilización.	La cantidad de agua en el suelo afecta su consistencia y capacidad de compactación.	Mide la resistencia del suelo a la penetración bajo cargas.	La capacidad del suelo para permitir el flujo de agua a través de él.
Importancia	Los suelos arcillosos, por ejemplo, requieren técnicas específicas debido a su alta plasticidad y expansión.	Un contenido de humedad óptimo es crucial para lograr una compactación adecuada y maximizar la resistencia del suelo.	Un CBR bajo indica la necesidad de estabilización para mejorar la capacidad de soporte del suelo.	Suelos con baja permeabilidad son más propensos a la erosión y al debilitamiento por acumulación de agua.
Características	Compactación	Plasticidad	Granulometría	Presencia de materia orgánica



Descripción	Proceso de aumentar la densidad del suelo mediante la aplicación de energía mecánica.	Medida de la capacidad del suelo para deformarse sin romperse.	Distribución de los tamaños de partículas en el suelo.	La materia orgánica reduce la resistencia del suelo y aumenta su compresibilidad.
Importancia	Una compactación adecuada mejora la resistencia y reduce el asentamiento del suelo.	Los suelos con alta plasticidad (como las arcillas) requieren técnicas de estabilización para reducir su expansión y contracción.	Una granulometría bien gradada mejora la estabilidad y resistencia del suelo.	Los suelos con alto contenido orgánico deben ser tratados o reemplazados antes de la estabilización.

NOTA

Estos factores permiten seleccionar las técnicas adecuadas de diseño y construcción, garantizando la resistencia, estabilidad y durabilidad sobre o con el suelo frente a las condiciones de carga y ambientales.

FUENTE: Das, 2013

b) Factores geotécnicos en la estabilización

Según Das (2013) y Holtz et al. (2011), estos factores determinan la interacción entre el suelo y los agentes estabilizantes, así como el tipo de tratamiento requerido. Entre los factores más relevantes destacan:

Tabla 9 — Especificaciones de tipo de estabilizadores y parámetros

SUELO ESTABILIZADO CON	PARÁMETROS
Cemento	1. Resistencia a compresión simple = 1.8 Mpa mínimo (MTC E 1103) 2. Humedecimiento-secado (MTC E 1104) -Para suelos A-1; A-2-4; A-2-5; A3 =14% de Pérdida Máxima -Para suelos A-2-6; A-2-7; A-4; A5 =10% de Pérdida Máxima -Para suelos A-6; A-7 =7% de Pérdida Máxima
Emulsión asfáltica	1. Estabilidad Marshall = 230 kg mínimo (MTC E 504) 2. Pérdida de estabilidad después de saturado = 50% máximo 3. Porcentaje de recubrimiento y trabajabilidad de la mezcla debe estar entre 50 y 100%
Cal	1. CBR* =100% mínimo (MTC E 115, MTC E 132) 2. Expansión ≤ 0.5%
Sales	1. CBR* = 100% mínimo, CBR no saturado (MTC E 115, MTC E 132)
Productos químicos (aceites sulfonados, ionizadores, polímeros, enzimas, sistemas, etc.)	1. CBR* = 100% mínimo (MTC E 115, MTC E 132) 2. Expansión ≤ 0.5%

[*] CBR corresponde a la penetración de 0.1 "



NOTA:

La tabla detalla los estabilizantes recomendados según las condiciones geográficas

FUENTE: MTC, 2014

Tabla 10 — Tipos de estabilizadores y su aplicación según región

ZONA	MATERIALES O SUELOS PREDOMINANTES	ESTABILIZADOR DE SUELOS APLICABLE
COSTA (Altitud: hasta 500 msnm)	Suelos granulares, de nula a baja plasticidad (Clasificación AASHTO: A-1, A-2, A-3, A-4, A-5)	-Sales -Cemento Portland, Ceniza Volcánica, Puzolana -Emulsión asfáltica -Productos químicos (aceites sulfonados, ionizadores, polímeros, enzimas, sistemas, etc.)
SIERRA (Altitud: entre 500 y 4800 msnm)	Suelos granulares, de nula a plasticidad media (Clasificación AASHTO: A-1, A-2, A-3, A-4, A-5)	-Cemento Portland, Ceniza Volcánica, Puzolana -Emulsión asfáltica -Productos químicos (aceites sulfonados, ionizadores, polímeros, enzimas, sistemas, etc.)
CEJA DE SELVA Y SELVA ALTA (Altitud: entre 400 y 1000 msnm)	Suelos granulares, de nula a plasticidad alta (Clasificación AASHTO: A-1, A-2, A-3, A-4, A-5, A-6, A-7)	-Cemento Portland, Ceniza Volcánica, Puzolana -Emulsión asfáltica -Cal -Productos químicos (aceites sulfonados, ionizadores, polímeros, enzimas, sistemas, etc.)
SELVA BAJA (Altitud: menor a 400 msnm)	Suelos limo-arcillosos, arcillas, arcillas arenosas y arenas predominantemente finas (Clasificación AASHTO A-2-4, A-3, A-6, A-7)	-Cemento Portland, Ceniza Volcánica, Puzolana -Emulsión asfáltica -Cal -Productos químicos (aceites sulfonados, ionizadores, polímeros, enzimas, sistemas, etc.)

FUENTE: MTC, 2014

En la presente investigación, se planteó como solución alternativa la aplicación de estabilizantes no tradicionales para mejorar el comportamiento del afirmado de una vía vecinal que se encontraba muy expuesta al deterioro vehicular y factores climáticos. A lo largo del tiempo las carreteras no pavimentadas han presentado fallas muy frecuentes como erosión, ahuellamientos, baches, encalaminados, lodazales, cruces de agua, desprendimientos, etc. Esto a su vez generan mayores costos de mantenimiento. Ante esta problemática se propone una alternativa de estabilización aumentando su resistencia y



durabilidad. Se evaluará la combinación de neumático reciclado granular y emulsión catiónica como posibles estabilizadores en la capa de afirmado. Aunque su uso no está estandarizado en la normativa peruana esta combinación representa una opción viable no solo por su desempeño técnico sino sus beneficios ambientales.

De acuerdo con el documento, "*Soluciones básicas en carreteras no pavimentadas*" MTC (2014), menciona que el uso de emulsiones bituminosas como estabilizantes mejora la serviciabilidad de caminos no pavimentados, prolongando su vida útil, por lo que resulta recomendable su aplicación para proyectos viales.

3.2.5.3 Evaluación del CBR en suelos estabilizados

Un autor relevante en este campo es Das (2013), quien en su libro "*Principios de Ingeniería Geotécnica*" aborda los métodos de estabilización de suelos y su impacto en propiedades como el CBR. En su trabajo "*Soil Stabilization for Unpaved Roads*", Rogers (2003), analiza la estabilización con aditivos como el cemento, cal o polímeros mencionado un aumento considerable del CBR, ensayo clave para determinar la capacidad de soporte de la estructura y resistencia al corte bajo condiciones controladas, dicho desarrollo mejora la resistencia del camino disminuye su erosión y deformación. Tomando en cuenta la importancia de la selección adecuado y sus propiedades del suelo, como su textura, plasticidad y humedad.

3.2.5.4 Estabilización integrada con NRG y EC

Según Ghazanfari, y otros, (2012), en su artículo "*Estabilización de suelos blandos mediante virutas de neumáticos reciclados*", menciona que, usando neumáticos reciclados como estabilizador de suelos blandos, es eficiente y sostenible ya que mejora no solo las propiedades geotécnicas del suelo, al mismo tiempo



contribuye a la gestión de residuos y reduce el impacto ambiental. Su uso es recomendado en proyectos de infraestructura como carreteras, terraplenes y cimientos en suelos problemáticos, promoviendo así soluciones sostenibles.

Dr. Andrew Dawson y su equipo investigaron sobre, *Rendimiento de bases tratadas con emulsión en pavimentos*, alienta al empleo de emulsiones catiónicas, Además resalta que estas emulsiones influyen a la resistencia y la estabilidad del suelo, enfatizando que es una solución alternativa variable y sostenible para la estabilización de suelo, aplicable en la ingeniería geotécnica y construcción (Dawson, 2008).

3.2.3 Impermeabilización de suelos

3.2.3.1 El afirmado como medio poroso

Se puede mencionar que el camino es un material sólido, el cual tiene espacios vacíos de diferentes tamaños y formas en su interior, estos no necesariamente estarán conectados entre sí. Cuando estos poros están en contacto con el agua, estos pueden ocupar todo o cierto porcentaje del volumen total, por lo que recibe el nombre de suelos saturados y suelos no saturados o parcialmente saturados.

las carreteras están formadas por capas limitadas de material granular compactado que contienen poros, permitiendo que el agua fluya a través de ellas. La estabilización de estas capas con materiales cementantes o asfálticos representa una solución para mejorar su capacidad de carga, otorgando al mismo tiempo la ventaja de reducir significativamente su permeabilidad (Romero Villajuan, 2022).

Flujo del agua como medio poroso FLORES, (2000). Estos se agrupan de dos tipos: el flujo laminar, donde las moléculas de agua siguen trayectorias paralelas y ordenadas, y el flujo turbulento, caracterizado por movimientos caóticos en múltiples direcciones. La transición entre un tipo de flujo y otro está determinada por la velocidad del agua: a bajas velocidades el flujo es laminar, y se vuelve turbulento al aumentar la velocidad. Cabe destacar que



cuando un flujo turbulento reduce su velocidad, no recupera inmediatamente las características del flujo laminar inicial. Hay una velocidad llamada "velocidad crítica" donde el flujo siempre será laminar, y otra velocidad, que es 6.5 veces la velocidad crítica, donde el flujo siempre será turbulento.

3.2.6.2 Infiltración del agua en vías afirmadas

La infiltración del agua en vías afirmadas constituye uno de los principales factores de deterioro estructural en caminos no pavimentados, especialmente en zonas de alta pluviosidad como Abancay. Esta infiltración responde tanto a características propias del suelo como a factores externos por lo que alteran su comportamiento. Posteriormente los factores de la infiltración en vías afirmadas:

a) Factores intrínsecos

- **Alta permeabilidad:** Suelos con clasificación GM o GP-GM, que presentan una estructura granular suelta con intersticios amplios, permiten rápido paso de agua. Su coeficiente de permeabilidad (k) puede superar los 1×10^{-3} cm/s, facilitando la entrada del agua hacia las capas inferiores.
- **Baja cohesión:** Suelos con índice plástico (IP) menor al 12% tienden a tener baja cohesión entre partículas, lo que provoca su rápida fragmentación cuando se saturan. Esto reduce la capacidad del suelo para resistir cargas y provoca deformaciones.
- **Compactación inadecuada:** Cuando el grado de compactación es menor al 95% del Proctor Modificado, el suelo presenta una alta porosidad que contiene vacíos excesivos lo que permite una rápida infiltración. Una compactación deficiente también disminuye la resistencia estructural del afirmado (MTC, 2013).

b) Factores extrínsecos

- **Lluvias intensas,** en zonas como Abancay, con



precipitaciones anuales superiores a los 800 mm, el agua superficial penetra con facilidad si no hay medidas de impermeabilización o drenaje. Estas lluvias incrementan el contenido de humedad hasta alcanzar el grado de saturación del suelo.

- **Falta de drenaje eficiente:** Cunetas obstruidas, bloqueadas, inexistentes o mal dimensionadas impiden la evacuación del agua de escorrentía. Esto causa encharcamientos y percolación directa hacia el afirmado, y así incrementando su humedad y reduciendo su soporte. (MTC, 2013).

3.2.6.3 Influencia de factores climáticos en la vía AP-650

Tabla 11 — Efecto de infiltración en vía AP-650

Efecto	Consecuencia	Ejemplo en la vía vecinal AP-650
Formación de baches	Desprendimiento de material granular.	Baches de hasta 20 cm de profundidad, grado 3 (severo), en 70 % del tramo.
Erosión interna	Lavado de finos (arcillas/limos).	Erosión de grado 3 por escurrimiento no canalizado.
Hundimientos diferenciales	Deformación plástica bajo carga vehicular.	Hundimientos localizados por tránsito pesado no controlado.
Pérdida de soporte	Reducción del módulo estructural del afirmado.	Zona con pérdida de material, grado 2 (moderado), afectando la circulación.
Deterioro prematuro	Reducción de la vida útil del afirmado.	Deterioro progresivo del 70 % del tramo; fallas acumuladas.
Encalaminados	Ondulaciones en superficie por deformación y falta de mantenimiento.	Presencia en varios sectores, grado 3 (severo).
<p>NOTA</p> <p>En la vía AP-650, se identificaron efectos relacionados a estas condiciones como factores climáticos, como la alta pluviosidad y el escaso drenaje influyen significativamente en el deterioro de vías afirmadas.</p> <p>FUENTE: MTC, 2013</p>		



3.2.6.4 Criterios técnicos para el análisis de permeabilidad en suelos

a) Parámetros técnicos

- **Ley de Darcy**

Para Das (2011), la permeabilidad se diferencia de la infiltración, ya que depende del grado de saturación del suelo. La permeabilidad será mayor cuando el suelo esté saturado, porque todos los espacios vacíos dentro del suelo están llenos de agua, lo que permite que el agua adicional fluya con mayor facilidad y se mide a través de la permeabilidad del agua que es (k).

El movimiento de los flujos a través de los medios porosos se analiza con la ley de Darcy quien descubrió experimentalmente en el 1856, para tal hecho investigo las características del flujo de agua a través de filtros de material terreo. Utilizando determinados dispositivos de diseño, encontrando así la velocidad para gastos o caudales pequeños:

$$Q = K \cdot i \cdot A \dots (1)$$

$$i = \frac{\Delta h}{L} \dots (2)$$

Donde:

- Q : Caudal o gasto (cm^3/seg)
- A : sesión transversal del filtro (cm^2)
- k : Coeficiente de permeabilidad (cm/s)
- i : Gradiente hidráulico
- v : Velocidad de descarga (cm/s)

Si se considera la ecuación de continuidad



$$Q = V \cdot A \dots\dots\dots (3)$$

Donde:

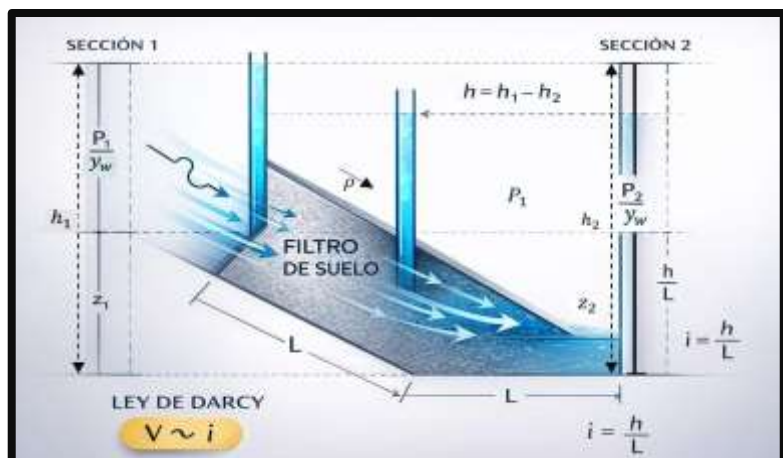
- Q= Caudal (cm³/s)
- V= Velocidad (cm/s)
- A= Área transversal (cm²)

Es posible relacionarlos de forma tal que: La ecuación numero 4 es conocida como la **Ley de Darcy**.

$$V = K \cdot i \dots\dots\dots (4)$$

- **Gradiente hidráulico**

La circulación del agua dentro de un medio poroso se la describe a través de la línea de filtración. Se denomina línea de filtración a la curva descrita por el escurrimiento a través de un material permeable. El agua que circula en el suelo sigue trayectorias que se desvían erráticamente de dichas líneas, pero muy poco. Cuando las líneas de filtración son rectas y paralelas se dice que la filtración es lineal Angelone (2006).



FUENTE: Angelone, 2006

Figura 6 — Dirección del flujo del agua



- **Coefficiente de permeabilidad**

Angelone (2006) indica que el coeficiente de permeabilidad es definido de la siguiente manera. Uno de los datos utilizados por Darcy es el valor de la velocidad v , esta es la carga que se define como la cantidad de agua que circula en la unidad de tiempo a través de una superficie unitaria perpendicular a las líneas de filtración.

En arenas firmes saturadas y en otros suelos de granos finos, también saturados, donde la circulación del agua no afecta la estructura del material, la velocidad v puede ser determinada casi exactamente por:

$$v = i_p K / \eta \text{ (cm/seg)}$$

Donde:

- η : viscosidad del agua, en KN seg / cm²
- K : constante de permeabilidad (empírica), en cm²
- i_p : gradiente de presiones, en KN/cm³

La viscosidad del agua disminuye con la temperatura, K es constante para un material permeable dado, con porosidad dada y además es independiente de las propiedades físicas del líquido que filtra por el material. Si se reemplaza el valor de i_p por su equivalente i_w se tiene:

$$v = i_w \cdot \gamma_w \cdot \frac{K}{\eta}$$

Como, además, dentro de ese rango de temperaturas η varía entre límites poco extensos, de la ecuación anterior como.

$$v = k \cdot i$$

Donde:

$$k = \gamma_w \cdot \frac{K}{\eta} \quad [\text{cm /seg}]$$



k es el coeficiente de permeabilidad, que se expresa como una función de la constante de permeabilidad del material, la viscosidad y el peso específico del fluido circulante. Planteado así, el valor de k, expresado en cm/seg, es considerado como la velocidad del agua a través de un suelo cuando está sujeta a un gradiente hidráulico unitario.

Tabla 12 — Valores del coeficiente de permeabilidad “k” en (cm/s)

	100	10	1	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹
Drenaje	Bueno						Pobre			Prácticamente impermeable		
Tipo de suelo	Grava limpia	Arenas limpias y mezclas limpias de arena y grava			Arenas muy finas, limos orgánicos e inorgánicos, mezclas de arena, limo y arcilla, morenas glaciares, depósitos de arcilla estratificada			Suelos "impermeables", es decir, arcillas homogéneas situadas por debajo de la zona de descomposición				
						Suelos "impermeables", modificados por la vegetación o la descomposición. ³						
Determinación directa de k	Ensayo directo del suelo "in situ" por ensayos de bombeo. Se requiere mucha experiencia, pero bien realizados son bastante exactos.											
	Permeámetro de carga hidráulica constante. No se requiere mayor experiencia.											
Determinación indirecta de k	Permeámetro de carga hidráulica decreciente. No se requiere mayor experiencia y se obtienen buenos resultados			Permeámetro de carga hidráulica decreciente. Resultados dudosos. Se requiere mucha experiencia.			Permeámetro de carga hidráulica decreciente. Resultados de regular a bueno. Se requiere mucha experiencia.					
	Por cálculo, partiendo de la curva granulométrica. Sólo aplicable en el caso de arenas y gravas limpias sin cohesión.									Cálculos basados en los ensayos de consolidación. Resultados buenos. Se necesita mucha experiencia		

FUENTE: Das, 2011

b) Factores que afectan la permeabilidad

Varios factores influyen en la permeabilidad de un suelo, a continuación, se muestra en la tabla:

Tabla 13 — Factores que influyen en la permeabilidad por tipo y grado del suelo

FACTORES	DESCRIPCIÓN	TIPOS DE SUELOS	GRADO DE POROSIDAD
Granulometría	Suelos con partículas más grandes, como arena y grava, presentan > permeabilidad que suelos finos como arcillas.	Arena, Grava, Arcilla	Alto (arena y grava), Bajo (arcilla)
Porosidad y estructura	Una mayor porosidad y una estructura bien desarrollada facilitan el paso del agua.	Todos los suelos	Alto (si tiene estructura bien desarrollada)
Contenido de materia orgánica	Altos niveles de materia orgánica pueden obstruir los poros, reduciendo la permeabilidad.	Suelos orgánicos, Arcilla	Bajo (en suelos con mucha materia orgánica)
Compactación	Suelos más compactados tienen < permeabilidad debido a la reducción de espacios porosos.	Arena, Grava, Arcilla	Bajo (suelos compactados)

NOTA

Se muestra la influencia de la granulometría y la porosidad en la permeabilidad del suelo, Adaptado de tipos de permeámetro.

FUENTE: INGEOTECNICA, 2019

c) Clasificación de la permeabilidad según el tipo de suelo

La permeabilidad de los suelos se clasifica según su capacidad para permitir el flujo del agua. (Wikipedia, 2025). Por ejemplo, la tabla de permeabilidad intrínseca presenta valores de conductividad hidráulica para diferentes tipos de suelos:

Tabla 14 — Rangos típicos del coeficiente de permeabilidad (κ) en distintos tipos de suelo

Tipo de Suelo	Coficiente de Permeabilidad (κ)
Arena o grava no consolidada	$\kappa > 10^{-2}$ cm/s
Arena fina, cieno, loess, loam	$\kappa \approx 10^{-5}$ a 10^{-6} cm/s
Arcilla no consolidada y materia orgánica	$\kappa < 10^{-9}$ cm/s

NOTA

El valor del coeficiente κ varía según la textura y consolidación de suelo.

FUENTE: Wikipedia, 2025





NOTA

Elaboración propia basada en información recopilada de diversas fuentes técnicas sobre la clasificación de la permeabilidad del suelo.

FUENTE: Estudios geotécnicos, Wikipedia, 2025

Figura 7 — Rango de la permeabilidad según el tipo de suelo

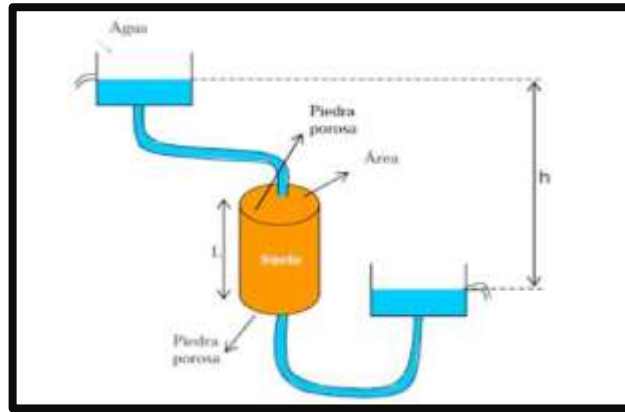
d) Método de medición de la permeabilidad

Para el trabajo de investigación el procedimiento para determinar la conductividad hidráulica se tomó el método directo de la permeabilidad de carga constante, esto para medir el paso el agua a través del suelo, de un material incorporado con NRG y EC. Este método fue elegido por las características presentes en el suelo.

- **Ensayo con permeámetro de carga constante**

Es utilizado principalmente para suelos granulares, este método determina el flujo de agua a través de una muestra saturada, manteniendo constante el nivel de agua en un tubo alimentador.





FUENTE: Extraído de la web, La librería del Ingeniero, 2015.

Figura 8 — Permeabilidad de carga constante

- La fórmula para calcular el coeficiente de permeabilidad (k) es:

$$Q = k \cdot i \cdot A$$

Aplicando la Ley de Darcy:

$$\frac{Vol}{t} = K \cdot \frac{h}{L} \cdot A$$

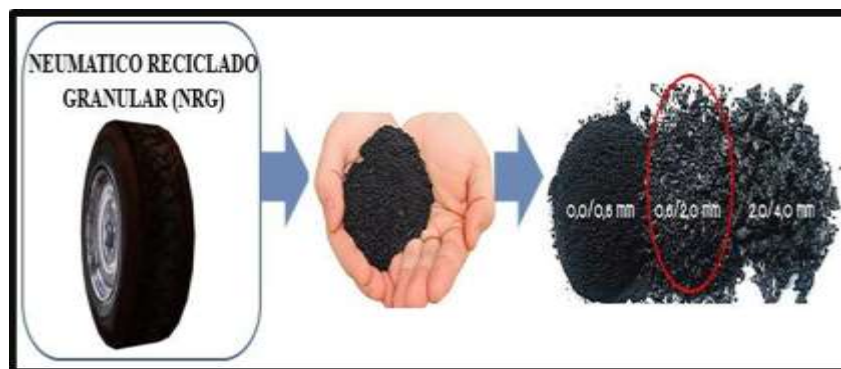
$$K = \frac{Vol \cdot L}{t \cdot h \cdot A}$$

3.2.4 Materiales alternativos como potencial innovador

3.2.4.1 Neumático reciclado granular (NRG)

El NRG, también conocido como “*Crumb rubber*”, se obtiene a partir del NFU, mediante un proceso de trituración mecánica. Kolendo, y otros (2024). En específico el NRG, obtenido del triturado NFU. Presentan granulometrías que permite su aplicación, Este material, al ser apto para estabilizar y en algunos para impermeabilizar.





NOTA

Imagen referencial del material base empleado en la producción del NRG.

FUENTE: SIGNUS, 2018

Figura 9 — Diferentes granulometrías de caucho reciclado procedentes de NFU

Según el presente artículo Mads (2016), propone que el uso de llantas recicladas en la construcción vial en Colombia como parte de una estrategia sostenible. EPA (2006), en su guía "Guía sobre aplicaciones de reciclaje y gestión de las llantas de desecho en EE.UU. y México", evidencia que, al aplicar los agregados provenientes con neumáticos mejora la estabilidad estructural y reduce los asentamientos alargando su vida útil. En años recientes este enfoque ha evolucionado con "Crumb rubber" (CR) por su capacidad de mejorar la elasticidad del suelo, impermeabilización, resistencia de cargas repetidas, promoviendo la reutilización de residuos CDC/ATSDR, (2024) y (Recycling Today, 2024).

El NRG empleado en esta investigación fue obtenido mediante triturado mecánico de neumáticos en desuso, presentando con una textura granular homogénea de color negro, pasante por el tamiz #10 (2.00mm). Fue aplicado como aditivo estabilizante en diferentes porcentajes (2%, 5%, 8%) en la capa de afirmado, con el objetivo de evaluar su influencia en la resistencia y comportamiento del suelo. A continuación, se muestra su estado físico previo a su aplicación:





NOTA

Estado físico del neumático reciclado granular (NRG) utilizado en la investigación, evidenciando su presentación homogénea, de color negro y textura granular.

FUENTE: Elaboración propia.

Figura 10 — NRG, textura homogénea como aditivo estabilizante

a) Propiedades físico-químicas del neumático NFU

Tabla 15 — Propiedades físico-químicas del NFU

Propiedad	Descripción
Composición base	Entre 50% y 60% del neumático se conforma del caucho (natural o sintético), con presenciade residuos metálicos.
Forma y tamaño	Material plano, de forma irregular; tamaños entre 2 mm y 350 mm según el tamiz utilizado.
Densidad	Densidad individual: 1.15 – 1.45 t/m ³ ; densidad no compactada: 0.40 – 0.60 t/m ³ .
Rango granulométrico del caucho	Tamaño de partículas: 2.5 mm a 20 mm.
Propiedades térmicas	Auto-inflamación a 285°C; se vuelve sólido duro a -195°C y frágil entre 0°C y 10°C.
Composición química	Presencia de Al (0.04%), Si (0.16%), K (0.05%), Ti (1.18%), Co (0.01%), Zn (1.62%), P (0.10%), Fe (1.48%), y entre otros.



NOTA

Se presenta propiedades físico químicas pueden variar según en función del origen y tipo de procesamiento de NFU.

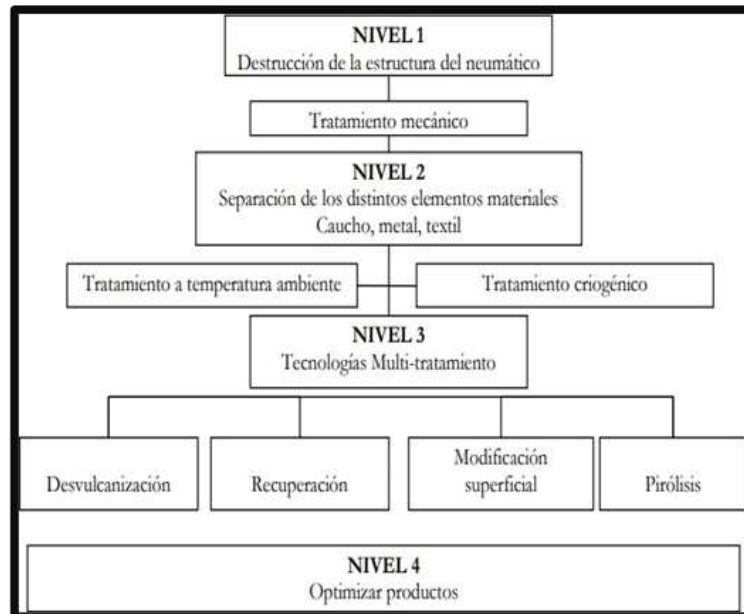
FUENTE: Cédex, 2022, OMV, 2016 y Basudam, y otros 2000

b) Métodos de reciclaje y obtención de neumático granular

• **Métodos de reciclaje**

- Recauchutado: es un proceso mediante el cual se vuelve a utilizar el neumático gastado cambiándole la banda de rodadura.
- Tratamiento mecánico: aquí los neumáticos serán comprimidos y cortados en elementos irregulares.
- Tecnologías de reducción de tamaño: se distingue entre el realizado a temperatura ambiente, criogénico y húmedo.
- Tecnología de regeneración: desvulcanización, recuperación del caucho (reclaiming) modificación superficial, modificación biológica.
- Otra tecnología: Pirolisis – Termólisis Sanchez (2012).

Los neumáticos fuera de uso NFU, pueden someterse a diversos procesos de tratamiento, que incluyen enfoques y técnicas. A continuación, se presenta.



FUENTE: ETRA , 2003

Figura 11 — Niveles de tratamiento de neumático fuera de uso

- **Obtención de neumático granular**



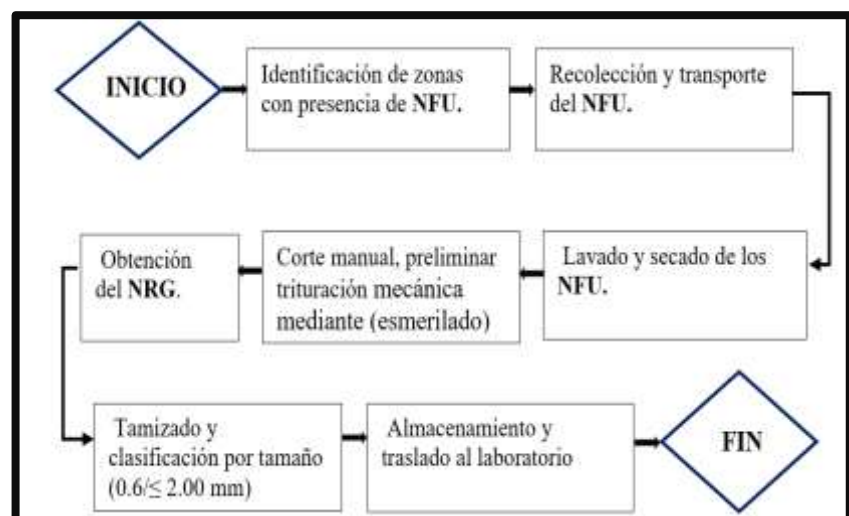
NOTA

La imagen ha sido adaptada para representar la producción de material granular a partir de NFU en el enfoque de tratamiento mecánico aplicado en esta investigación, adaptado de SIGNUS, (2018).

FUENTE: SIGNUS, 2018

Figura 12 — Producción de material granular a partir deNFU

En la presente investigación, se utilizó un proceso de tratamiento mecánico y reducción de tamaño a temperatura ambiente para obtener el neumático reciclado granular (NRG), este método consistió en llevar los NFU a una recauchutadora, donde fueron sometidos a un esmerilado que los cortó en tiras. Posteriormente estas tiras fueron trituradas y granuladas hasta alcanzar el tamaño de 2.00 mm para finalmente aplicarlas en la estabilización del afirmado. A continuación, se muestra el esquema general del proceso:



NOTA

Este procedimiento fue desarrollado experimentalmente en la presente investigación, desde el tratamiento inicial del neumático hasta la obtención del material granular.

FUENTE: Zhao, Y; LI, M; Wang, Q, 2020

Figura 13 — Flujograma del proceso de obtención NRG

a) Aplicación de NRG en la estabilización vial

Cipirian, y otros (2023). Esta investigación estudia la viabilidad de emplear granulo de caucho reciclado GCR en la restauración y mantenimiento de vías en Colombia. Los resultados muestran que, con la adición de GCR en mezclas asfálticas mejora su vida útil, ya que proporciona una opción para el aprovechamiento de



NFU, mejorando así su capacidad de soporte en condiciones de flujo de carga y climas diversos.

Tabla 16 — Aplicación de suelo-caucho

Aplicación	Descripción	Referencia	Ventajas	Desventajas
Suelo-caucho	Suelo arcilloso altamente compresible	AHINAV,2015 - India	Mayor resistencia a la penetración. Disminución del material en botaderos e Iniciativa a nuevas aplicaciones del material o nuevo material. Mas económico.	Porcentajes limitados en rangos de 1 - 16%
	Suelo arcilloso	ARAM, s.f.- Iraq		
	Grava y ceniza voladora arena arcillosa	Prasad y Prasad, 2009 – India Swarma y Paleru, 2015 – India		
<p>NOTA</p> <p>La tabla resume una aplicación del suelo-caucho en suelo arcilloso, considerando ventajas, desventajas según información recolectada de estudios previos.</p> <p>FUENTE: Gutiérrez, y otros 2020</p>				

Se visualiza en la tabla anterior como es que el caucho reciclado influye positivamente al aplicarlos en suelos naturales, y como ésta puede llegar a ser un estabilizador del suelo tomando en cuenta sus propiedades mecánicas siendo una de éstas la resistencia a la penetración, o incluso puede ser combinada junto a otros estabilizadores y/o aditivos de manera que cumplan los parámetros necesarios para su empleabilidad como subrasante, como agente modificador de las características mecánicas del suelo, Tejela (2013).

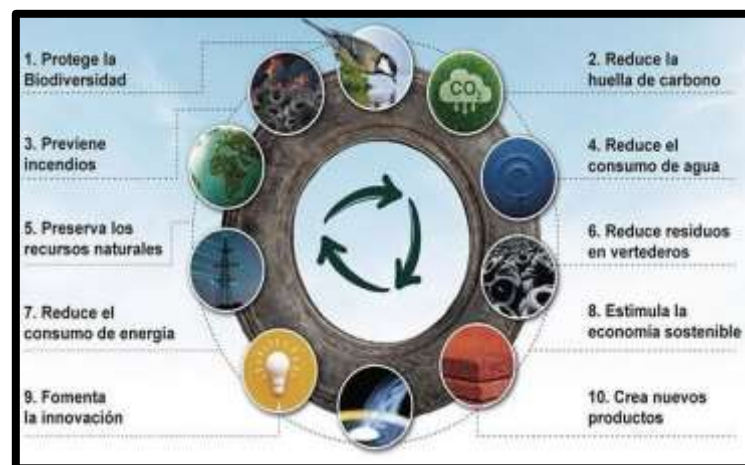
b) Beneficios ambientales del uso de neumáticos

Como sostiene Fernandez, y otros (2022). El de los NR presenta varias ventajas y desventajas. Por un lado, reduce la



cantidad de residuos y el uso de recursos naturales, lo cual es bueno para el medio ambiente Sanchez (2012). Su disminución de residuos sólidos y la conservación de recursos naturales, lo que contribuye a la sostenibilidad ambiental. También son económicos y mejoran la calidad de los suelos en la construcción, Rodríguez (2017). Además, si no se manejan bien, pueden liberar químicos dañinos.

Aunque existen algunos desafíos en su procesamiento, los beneficios ambientales y económicos superan las desventajas. Espinoza (2023) A continuación, se aprecia los siguientes beneficios.



FUENTE: TNU, 2024

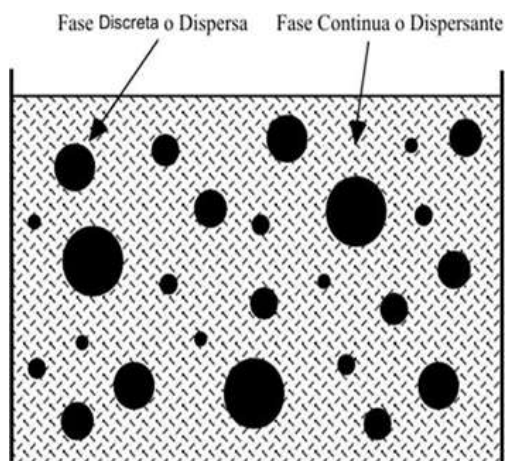
Figura 14 — Beneficios ambientales del reciclaje de neumáticos

3.2.4.2 Emulsión catiónica (EC)

La emulsión catiónica se encuentra en una dispersión coloidal en el cual el betún (asfalto) se encuentra disperso en agua, los cuales se encuentran estabilizadas mediante una emulsión con una carga positiva. MTC (2014).

El uso de la emulsión catiónica disminuye el consumo energético, y contribuye en la reducción de GEI (Gases de Efecto Invernadero) en la construcción y mantenimiento de pavimentos MTC (2013).





FUENTE: Rodríguez, y otros 2001

Figura 15 — Diagrama esquemático de una emulsión

a) Propiedades físico-químicas de la emulsión

Tabla 17 — Propiedades físico-químicas de la emulsión catiónica

Propiedades	Descripción
Carga superficial	Las partículas de asfalto tienen carga positiva debido a los tensioactivos catiónicos, lo que favorece su adhesión a materiales cargados negativamente, como áridos y suelos
Estabilidad	Depende del tipo de tensioactivo, el pH (generalmente ácido, entre 2 y 5) y la temperatura de almacenamiento.
Viscosidad	Varía según la concentración de asfalto y el tipo de emulsión. Las emulsiones de rotura lenta suelen ser menos viscosas
Tamaño de partícula	Las partículas de asfalto en la emulsión suelen tener un diámetro entre 1 y 10 micrómetros, lo que influye en la estabilidad y aplicabilidad.
Adhesividad	La carga positiva mejora la adhesión a materiales granulares y suelos, lo que es crucial para la estabilización
Resistencia al agua	Una vez rota la emulsión, el asfalto forma una película resistente al agua, lo que mejora la durabilidad de la carretera

NOTA
En la siguiente tabla se observa las propiedades fisicoquímicas de la emulsión catiónica, el cual son clave para su efectividad en la estabilización, de carreteras afirmadas, esto según el manual del asfalto.

FUENTE: ASPHALT INSTITUTE, 2007

b) Composición y estructura de la emulsión catiónica

La composición de las emulsiones asfálticas según Rodríguez, y otros (2001), mencionan que los elementos principales que la componen son: asfalto, agua y un agente emulsionante. Básicamente en algunos casos, trabaja con ciertos aditivos adicionales como agentes estabilizantes de revestimiento, que potencian la adherencia y regulan la ruptura de la emulsión.

- **Asfalto:** El asfalto presenta cualidades destacables: flexibilidad, impermeabilidad, durabilidad y adhesión, junto con una notable resistencia a ácidos, sales y álcalis.
- **Agua:** El agua utilizada en la producción de emulsiones asfálticas debe ser calidad superior, libre de minerales u otros elementos que puedan afectar la emulsión Rodríguez, y otros (2001).
- **Agentes emulsionantes:** Los agentes emulsionantes son sustancias que se añaden a una mezcla para formar una dispersión uniforme y estable. Para ello, es necesario aplicar un método de agitación o mezclado correcto que permita alcanzar las propiedades buscadas Rodríguez, y otros (2001).

• Estructura de la emulsión asfáltica

Tabla 18 — Estructura de la emulsión asfáltica

Estructura de una emulsión asfáltica	
Fase Dispersa (asfalto)	Partículas de asfalto cargadas eléctricamente (positiva o negativamente, según el tipo de emulsión) y dispersas en el agua, con un tamaño de 1 y 10 micrómetros
Fase Continua (agua)	El agua es la fase continua en la que se dispersan las partículas de asfalto, actúa como medio de transporte para las partículas de asfalto durante la aplicación y el pH del agua se ajusta para favorecer la estabilidad de la emulsión
Agente emulsificante	Es un compuesto químico que se adsorbe en la superficie de las gotas de asfalto, estabilizando la emulsión, Reduce la tensión superficial entre el asfalto y el agua y Proporciona una carga eléctrica a las partículas de asfalto, evitando que se aglomeren.



Interfase	Es la zona de contacto entre las gotas de asfalto y el agua, el agente emulsificante se adsorbe en esta interfaz, formando una película protectora alrededor de las gotas de asfalto y la calidad de esta interfaz determina la estabilidad de la emulsión.
<p>NOTA</p> <p>En la tabla se puede apreciar la estructura de una emulsión asfáltica, el cual garantiza la estabilización, viscosidad y efectividad de la emulsión en los diversos usos.</p> <p>FUENTE: ASPHALT INSTITUTE, 2007</p>	

c) Clasificación según carga eléctrica y velocidad de ruptura

Según lo argumentado por Rodríguez, y otros (2001), menciona que las emulsiones asfálticas pueden ser clasificadas de acuerdo con el emulgente usado. En este caso podemos hablar de tres tipos, aniónicas, catiónicas y no iónicas.

Tabla 19 — Categorías principales de una emulsión asfáltica

Clasificación de la emulsión - categorías principales				
Tipo	Definición	Carga iónica	Tiempo de rotura	Aplicación
Aniónicas	Es un ligante asfáltico donde las partículas de betún están dispersas en agua y estabilizadas con un agente emulsificante de carga negativa (-). Su aplicación es específica, se adhiere mejor a áridos con carga (+) (ej.: piedra caliza). Jamet (2002, p. 32)	(-)	Rápida (R) (< 30 min)	* mezcla en frío * riegos de impregnación * tratamientos superficiales
			Media (M) 1-6 horas	
			Lenta (S) Horas a días	
Catiónicas	Es un ligante asfáltico en el que las partículas de betún (asfalto) están dispersas en agua, estabilizadas por un agente emulsificante de carga positiva. Sus propiedades las hacen ideal para la estabilización de suelos y aplicaciones viales. se adhiere mejor a áridos con carga (-) (ej.: sílice, arcillas). García (1999, p. 43)	(+)	Rápida (R) (< 30 min)	* estabilización de suelo * mezcla en frío * riegos de impregnación * tratamientos superficiales
			Media (M) 1-6 horas	
			Lenta (S) Horas a días	
No iónicas	Es un ligante asfáltico donde las partículas de betún están dispersas en agua y estabilizadas con agentes emulsificantes sin carga eléctrica (no iónicos). Su comportamiento neutro	Neutra	Lenta (LS) Horas a días	* estabilización de suelo específicos * mezcla en frío con áridos problemáticos



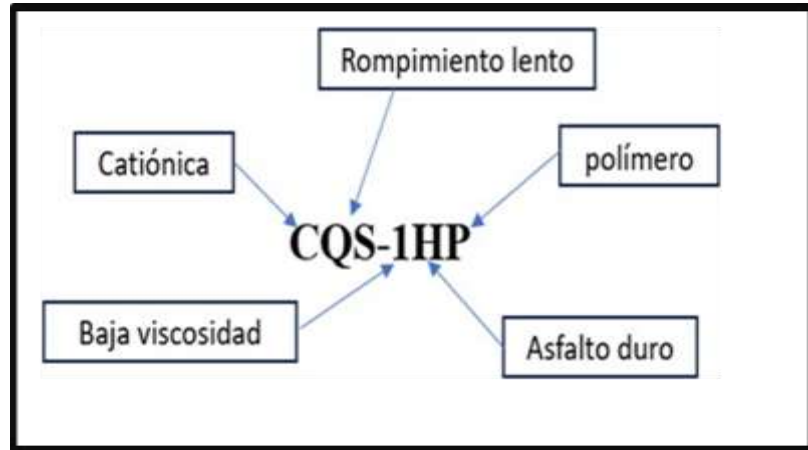
	las hace ideales para aplicaciones donde la reactividad química debe minimizarse. (Guevara, 2008)		Muy lenta (VL) Días	* riegos de imprimación en condiciones difíciles
<p>NOTA</p> <p>En la tabla se muestran la clasificación de las emulsiones como catiónicas, aniónicas, o no iónicas.</p> <p>FUENTE: Rodríguez, y otros 2001</p>				

En la tabla N° 19, se resumen, las principales aplicaciones de la emulsión catiónica de rotura lenta CQS, implementadas en el sector vial. Se observa que CQS es versátil en tratamientos de riego superficial como los de sellos de niebla, en la producción de lechadas asfálticas, y especialmente en procesos de estabilización y reciclado tanto en planta como en sitio. La selección de **CQS** responde a su comportamiento de rotura lenta, que favorece una mejor interacción con suelos de tipo granular y mejora la adherencia con aditivos como el neumático reciclado granular **NRG**.

d) Emulsión catiónica utilizada en la investigación

Para esta investigación se utilizó la emulsión asfáltica, catalogada como **CQS-1HP**, fabricada por BITUPER S.A.C., esta emulsión es de naturaleza catiónica, presenta una rotura lenta el cual ha sido modificada con polímeros y cumple con las normas del NTP 321.141, ASTM D 2397 y MTC EG2013. Su principal ventaja es la excelente trabajabilidad que ofrece, gracias al tiempo extendido que tarda el asfalto en coalescer el cual permite una mezcla homogénea con los agregados. Estas emulsiones están diseñadas para una transformación progresiva y proporcionando una mayor durabilidad en su aplicación final (CORPORC ASFALTO & EMULSIONES, 2019) (Anexo D).





FUENTE: Recopilado del Anexo D.

Figura 16 — Estructura de la emulsión catiónica utilizada

- **Características físico-químicas**

- **Carga eléctrica:** catiónica (carga positiva)
- **Composición:** Asfalto y agua
- **Color:** Marrón oscuro
- **Aspecto:** Líquido viscoso 25°C
- **Gravedad específica:** 20 °C: 0.95-1.00

- **Características técnicas de CQS-1HP**

En la tabla siguiente se muestra las especificaciones mínimas y máximas que debe cumplir la emulsión asfáltica a usar, así como los valores de los ensayos, en nuestro caso se especificó no realizaremos estos ensayos puesto que el producto fue adquirido a una empresa especializada en el rubro. Se mostrará la ficha técnica del producto en el (Anexo D).

A continuación, se presenta la EC de tipo **CQS-1HP** utilizada en esta investigación, como apoyo visual del material aditivo ya descrito en la sección anterior.



Tabla 20 — Especificaciones para emulsiones asfálticas

ESPECIFICACIONES NTP 321.141 ,ASTM D 2397		
Ensayos	Valores	Especificaciones máx. y mín.
Viscosidad Saybolt Furol a 25 °C, s	22	20-100
Carga de Partículas	Positivo	Positivo
Contenido de Agua (en volumen), %	39.5 %	40 % máx.
Destilación		
-Residuo Asfáltico, %	60.5%	60 % mín.
-Contenido de disolvente por destilación %	0.0 %	0.0 % máx.
Sedimentación, 7 días, %	4.0 %	5.0 % máx.
Tamizado (Retenido en T-20), %	0.05 %	0.1 % máx.
Estabilidad almacenamiento 24 h , %	0.6 %	1.0 % máx.
Residuo por Evaporación a 163 °C		
Penetration (25°C, 100 mg, 5 s), 0.1mm.	52	50-90
Punto de Ablandamiento (A Y B), °C	58	55 mín
Ductilidad, 25 °C, 5 cm/min, cm.	17	>=10
Recuperación elástica (25°C, Torsión), %	18	> 12

NOTA

La tabla presenta los parámetros técnicos de emulsiones asfálticas según especificaciones del MTC

FUENTE: NTP 321.141 Y ASTM D 2397.



NOTA

Emulsión catiónica tipo CQS-1HP, empleada en esta investigación como aditivo impermeabilizante aplicado sobre la capa de afirmado.

Figura 17 — EC utilizada en la investigación

3.2.5 Importancia del uso del NRG y EC en la impermeabilización vial

Su objetivo es reducir la infiltración de agua en las capas estructurales, evitando la pérdida de finos, la saturación del afirmado y el deterioro prematuro del camino. Diversos estudios respaldan el uso de neumático reciclado granular (NRG) y emulsión catiónica (EC) como alternativas sostenibles y eficientes para mejorar el comportamiento hídrico del suelo.

Según Calderón (2024), el NRG actúa como un material hidrofóbico dentro de la matriz del suelo, disminuyendo la capilaridad y reduciendo la susceptibilidad del afirmado ante la humedad. Sus partículas de caucho funcionan como barreras físicas que interrumpen la continuidad de los poros, generando una microestructura más resistente al ingreso y movimiento del agua. Este comportamiento favorece el mantenimiento de la resistencia mecánica en condiciones de saturación y evita la disgregación del afirmado.

Por su parte, la (EC) cumple una doble función: estabiliza e impermeabiliza. De acuerdo con Chinome (2022), la EC recubre las partículas granulares con una película asfáltica continua que sella los vacíos entre los agregados, reduciendo significativamente la permeabilidad del material. Este recubrimiento mejora la cohesión interna, protege al suelo de la infiltración directa y aumenta la resistencia tras periodos de inmersión.

▪ Efectos del uso del NRG y la EC en vías afirmadas expuestas a la presencia de agua

Según Liang, y otros (2016), el NRG mejora el comportamiento estructural del suelo ante la infiltración debido a que sus partículas elásticas disminuyen la formación de fisuras, reducen el movimiento del agua dentro de la estructura granular y limitan la erosión interna. Asimismo, estudios de suelos tratados con NRG evidencian menores tasas de pérdida de material cuando son sometidos a flujos de agua continua.

Por otra parte, la EC contribuye directamente a la impermeabilización. Zambrano et al. (2020) encontraron que su aplicación en mezclas granulares reduce la permeabilidad y mejora el CBR después de inmersión, manteniendo la integridad del material incluso en condiciones críticas de humedad. La película asfáltica producida por la EC disminuye la absorción de agua y actúa como barrera contra la percolación.

Cuando ambos estabilizantes se combinan, se logra un efecto sinérgico:

- El NRG reduce la capilaridad interna,
- La EC sella la superficie y los contactos entre partículas,
- La estructura resultante presenta menor permeabilidad,
- La resistencia mecánica del afirmado se conserva durante la saturación,
- Se reduce la aparición de baches, erosión y deformaciones durante la época de lluvias.

Estas ventajas hacen que la combinación de NRG y EC sea especialmente adecuada para vías rurales ubicadas en zonas con precipitaciones elevadas, como la vía AP-650 de Abancay, donde la infiltración representa uno de los principales factores de deterioro.



3.3 Marco conceptual

- a) **AASHTO:** Organización que establece normas y técnicas de directrices que en sus siglas son Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes (American Association of State Highway and Transportation Officials).” MTC (2013).
- b) **ASTM:** Su denominación en inglés es, (American Society for Testing Materials Asociación Americana para el Ensayo de Materiales), entidad que establece procedimientos para el ensayo de materiales MTC (2013).
- c) **MTC:** Organismo estatal que dirige las políticas con la infraestructura vial, denominado Ministerio de Transportes y Comunicaciones MTC (2018).
- d) **CBR:** Prueba que mide la resistencia de un suelo para evaluar su calidad en capas de carretera Vallejo, y otros (2019).
- e) **Calicata:** Excavación superficial en un terreno para estudiar las capas del suelo y recoger muestras MTC (2013).
- f) **Asfalto:** Actúa como aglutinante, también por sus materiales de transigencia, como impermeabilidad, durabilidad y de adhesión, además presenta alta resistencia en los compuestos como ácidos, sales y álcalis Rodríguez, y otros (2001).
- g) **Afirmado:** El afirmado es la capa compactada de material selecto (gravas, arenas y finos), siendo la capa superficial de la vía no pavimentada, soportará directamente las tensiones del tráfico y las condiciones climáticas MTC (2018).
- h) **Neumático fuera de uso:** Los neumáticos desechados no son peligrosos de inmediato, pero su eliminación inapropiada puede contaminar gravemente Rodríguez, (2017).
- i) **Neumático granular:** Proceso en el que los NEU desechados se trituran en fragmentos más pequeños para su reciclaje, dependiendo del tamaño final Rodríguez (2017).



- j) **Reciclaje:** Proceso que convierte residuos en nuevos productos o los reutiliza como materia prima, ayudando a conservar recursos naturales. Boada (2023).
- k) **Emulsión catiónica:** Suspensión de partículas de asfalto en agua, usada en pavimentación por su carga positiva Rodríguez, y otros (2001).
- l) **Compactación:** Es un trabajo manual o mecánico en el cual se disminuyen los espacios vacíos del suelo al ser sometido a fuerzas externas, esto con el fin de incrementar su densidad, resistencia y estabilidad de la estructura de la vía MTC (2018).
- m) **Límite líquido:** Contenido de agua del suelo entre el estado plástico y el líquido de un suelo MTC (2018).
- n) **Límite plástico:** Es el comportamiento de un suelo cuando está bajo un % de humedad el cual puede ser moldeado en rollitos de 3 mm de diámetro sin que este llegue a fracturarse MTC (2018).
- o) **Índice de plasticidad:** Facilita la identificación de acuerdo con el tipo de suelo, esta revela la extensión del rango de humedad en que conserva su constancia plástica MTC (2014).
- p) **Máxima densidad seca:** Valor determinado en laboratorio que indica la mayor densidad que un suelo puede alcanzar al compactarse MTC (2016).
- q) **Gráfica de gradación:** Representación gráfica con el fin de que se haga una distribución de tamaños del suelo. Se obtiene llevando en abscisas los logaritmos de las aberturas de los tamices y en las ordenadas los porcentajes que pasan o sus complementos a 100, que se calculan los retenidos acumulados MTC (2018).



- r) **Permeabilidad del suelo:** Está directamente relacionado con los espacios vacíos de un suelo, el cual deja pasar el agua a través de sus poros bajo una gradiente de presión, su medición se da cuantitativamente por el coeficiente de permeabilidad (k) cm/s o m/s MTC (2014).

- s) **Estabilización de suelos:** “Mejora de las propiedades del suelo mediante métodos mecánicos o químicos para aumentar su capacidad de soporte.” MTC (2013)



CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA

4.1 Tipo y nivel de investigación

4.1.1 Tipo de investigación

De acuerdo con Hernández, y otros (2018), la investigación aplicada se orienta a generar conocimientos con un fin práctico, dirigidos a resolver problemas específicos mediante la adaptación o implementación de técnicas, métodos o procedimientos científicos en contextos reales.

La presente investigación fue de tipo aplicada, ya que buscó solucionar una problemática específica: el deterioro y la alta permeabilidad de la capa de afirmado de la vía vecinal AP-650. Para ello, se propuso evaluar el uso del neumático reciclado granular (NRG) y la emulsión catiónica (EC) como estabilizantes e impermeabilizantes, con el propósito de mejorar las propiedades mecánicas e hidráulicas del suelo. Su aplicación no se limita a un análisis teórico, sino que tiene como finalidad obtener resultados prácticos que permitan formular una alternativa técnica viable y replicable en vías no pavimentadas de la región.

4.1.2 Nivel de investigación

De acuerdo con Hernández, y otros (2018) la investigación explicativa tiene como finalidad identificar las causas de un fenómeno y determinar de qué manera y por qué se producen ciertos efectos, permitiendo comprender las relaciones causales entre variables.

La presente investigación fue de nivel explicativo ya que busca determinar y explicar la influencia causal de los estabilizantes NRG y EC (variables independientes) sobre las propiedades mecánicas e hidráulicas del afirmado (variables dependientes). Es decir, se pretende comprender cómo y por qué las distintas dosificaciones modifican la densidad seca máxima, el porcentaje




de expansión, el CBR y la permeabilidad del suelo. Este nivel permite no solo describir los cambios, sino fundamentar las razones técnicas producidas, generando un conocimiento aplicable al diseño de una mezcla óptima para vías no pavimentadas.

4.2 Diseño de la investigación

De acuerdo con Hernández, y otros (2018) el diseño cuasiexperimental se caracteriza por la manipulación deliberada de la variable independiente, pero sin asignación aleatoria de los grupos o unidades experimentales, debido a limitaciones naturales o condiciones inherentes al contexto.

La presente investigación presentó un diseño cuasiexperimental porque se manipulan las variables independientes (porcentajes de NRG y EC) aplicadas al material de afirmado, pero las muestras no se seleccionaron al azar. Las cuatro calicatas realizadas en el tramo de estudio fueron elegidas mediante un muestreo intencional, siguiendo criterios técnicos establecidos por el MTC para la exploración de caminos, considerando zonas críticas, cambios estratigráficos y representatividad del material. Posteriormente, el material obtenido se distribuyó en grupos experimentales tratados con diferentes combinaciones de NRG y EC, y un grupo control sin aditivos. La comparación entre estos grupos permite evaluar de manera causal el efecto de los estabilizantes sobre el comportamiento mecánico e hidráulico del suelo, cumpliendo así las características propias de un diseño cuasiexperimental.

Esquema de diseño

Grupo control (GC)	Grupos experimentales (GE)
GC : O1 	(Sin tratamiento)
GE1: O1 X1 (% NRG + EC)	→ O2
GE2: O1 X2 (% NRG + EC)	→ O2
GE3: O1 X3 (% NRG + EC)	→ O2

Donde:

- **O1** = Observación inicial (muestras de afirmado natural).
- **X1, X2, X3** = Tratamientos experimentales correspondientes a las



distintas dosificaciones de NRG + EC.

- **O2** = Medición final de las variables dependientes (MDS, % expansión, CBR, permeabilidad).

4.3 Descripción ética de la investigación

Toro, y otros (2023), mencionan en su artículo de investigación acerca de los desafíos éticos que los investigadores enfrentan en Latinoamérica, manifiesta que la ética es parte de la rama de la filosofía el cual estudia el comportamiento humano con el fin de diferenciar

entre lo bueno y lo malo, lo correcto de lo incorrecto. La ética en la investigación asegura que el avance científico respete principios como la dignidad humana, la privacidad, el

bienestar animal y la protección ambiental. En este contexto, los comités de ética son esenciales para garantizar que las investigaciones cumplan con las normativas y los estándares bioéticos y de bioseguridad.

Desde el ámbito nacional, el Código de Ética del CONCYTEC (2020) señala que toda investigación debe desarrollarse garantizando la honestidad, la transparencia, el uso responsable de datos, y el respeto al medio ambiente, considerando especialmente que la manipulación de residuos o materiales puede generar impactos sobre la salud y los ecosistemas. Asimismo, la Ley Universitaria N.º 30220 exige que los trabajos de investigación adoptados en universidades peruanas se realicen bajo estrictos estándares éticos, promoviendo la protección de las comunidades y la sostenibilidad ambiental como principios centrales del quehacer científico.

A nivel local, la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac (UNAMBA) cuenta con su propio Código de Ética Institucional, que establece que toda investigación debe ejecutarse con responsabilidad social, respeto por los participantes, veracidad en el manejo de información, uso adecuado de fuentes y protección del entorno natural UNAMBA (2020). La universidad enfatiza que los estudiantes deben asegurar que sus investigaciones contribuyan positivamente al desarrollo de la región y no pongan en riesgo a las comunidades ni al patrimonio ambiental.

En el contexto de la presente investigación, estos principios éticos se aplicaron rigurosamente. La recolección de muestras del afirmado se realizó sin afectar la

transitabilidad de la vía ni la seguridad de los pobladores. Asimismo, los materiales empleados, especialmente el neumático reciclado granular (NRG), favorecen el principio de sostenibilidad y economía circular, al reutilizar un residuo sólido de alto impacto ambiental. Los procedimientos de laboratorio se ejecutaron siguiendo normas técnicas nacionales (MTC, INACAL), asegurando la integridad de los datos y la validez científica de los resultados. No se manipularon organismos vivos ni se puso en riesgo la salud o integridad de personas, y se mantuvo estricta transparencia en la presentación de resultados. Finalmente, desde la perspectiva personal, el desarrollo de esta investigación se sustenta en el compromiso de actuar con rigurosidad científica, honestidad académica y con pleno respeto hacia la comunidad de Abancay, buscando contribuir con una alternativa técnica sostenible que mejore la calidad de vida de la población. Consideramos que toda investigación debe desarrollarse equilibrando el avance científico con la responsabilidad social y el respeto al medio ambiente, principios que han guiado cada etapa de este trabajo.

4.4 Población y muestra

4.4.1 Población

Según Hernandez, y otros (2015). “La población de investigación está conformada por “el conjunto total de elementos que comparten características comunes y que cumplen los criterios establecidos para un estudio científico”.

La población estuvo constituida exclusivamente por la vía vecinal AP-650 en toda su longitud, ubicada en el distrito de Abancay, región Apurímac. Esta vía se encuentra a nivel de afirmado y presenta deterioro estructural significativo, problemas de drenaje, afectación durante la temporada de lluvias y tránsito vehicular constante, características que la convirtieron en la unidad de análisis adecuada para evaluar la influencia del neumático reciclado granular (NRG) y la emulsión catiónica (EC) en su estabilización e impermeabilización.

a) Criterios de inclusión

Los criterios de inclusión consideraron que la vía correspondiera formalmente a una vía vecinal registrada en el **PVPP** Abancay, que se encontrara en toda su longitud operativa y a nivel de afirmado, es decir, no pavimentada ni tratada superficialmente. Asimismo, se seleccionaron sectores que presentaban deterioro estructural observable, como baches,



ahuellamientos, erosión y pérdida de agregados, y cuyo material era susceptible a infiltración y humedad, condición necesaria para el análisis de la impermeabilización. Además, se requirió que la vía fuera accesible para la ejecución de exploraciones y el levantamiento de información geotécnica. Estos criterios permitieron garantizar condiciones adecuadas para el desarrollo de la investigación.

b) Criterios de exclusión

Durante el proceso de selección no se identificaron sectores que cumplieran con los criterios de exclusión establecido. Los criterios de exclusión establecieron la eliminación de aquellos sectores donde existían intervenciones recientes, como rellenos, reposiciones o cortes, debido a que alteraban las condiciones naturales del afirmado e interferían en la evaluación representativa del material. Asimismo, se excluyeron zonas en las que factores externos impedían la exploración segura, tales como deslizamientos, derrumbes o restricciones de acceso, limitando el desarrollo adecuado de las actividades de campo. De igual forma, se descartaron tramos cuyas características materiales no correspondían al afirmado original, debido a la presencia de mezclas con residuos, material ajeno o contaminado, que podían distorsionar los resultados del análisis.

4.4.2 Muestra

Según Hernandez, y otros (2015), “La muestra es un subconjunto de la población, seleccionado de forma sistemática o intencional, con el propósito de obtener conclusiones representativas de toda la población”.

La muestra constituida por el material de afirmado ubicado en la progresiva seleccionada dentro del tramo comprendido entre el km 0+000 y el km 1+050 de la vía AP-650, donde se identificaron las condiciones críticas de saturación, mayor deterioro estructural y presencia de infiltración. Esta progresiva concentra las características necesarias para analizar la influencia del neumático reciclado granular (NRG) y la emulsión catiónica (EC) sobre las propiedades del suelo, constituyendo así la unidad muestral del estudio.



Para la caracterización del material perteneciente a esta progresiva, se ejecutaron cuatro calicatas como parte del procedimiento técnico de muestreo, siguiendo el Manual de Carreteras del MTC (2014).

Es importante precisar que:

Cuantificación de la muestra

La muestra es una progresiva específica, pero la cantidad de material extraído se determinó mediante calicatas para permitir la experimentación en laboratorio.

Cuantificación por objetivos específicos

Tabla 21 — Cuantificación de la Muestra por objetivos

Ensayo	Objetivo específico	Ensayos realizados	% del total
Máxima densidad seca	OE1	108	25%
Porcentaje de expansión	OE2	108	25%
CBR	OE3	108	25%
Permeabilidad	OE4	108	25%
NOTA			
La tabla presenta la cuantificación de la muestra a evaluar por objetivos específicos			

4.4.2 Muestreo

Según Hernández, y otros (2015) el muestreo es el proceso mediante el cual el investigador selecciona una porción de la población que será objeto de observación, análisis o experimentación, siguiendo criterios metodológicos previamente establecidos. Su finalidad es obtener información representativa que permita inferir resultados sobre el fenómeno estudiado.

En esta investigación se empleó un muestreo no probabilístico de tipo intencional, debido a que la selección de la muestra no podía realizarse al azar, sino basada en criterios geotécnicos y de deterioro propios de la vía AP-650. La progresiva seleccionada fue elegida porque presentaba las condiciones críticas necesarias para el estudio: deterioro estructural severo, infiltración evidente durante la temporada de lluvias, material de afirmado original y accesibilidad para las exploraciones. Estas características eran indispensables para evaluar la influencia del neumático reciclado granular (NRG) y la

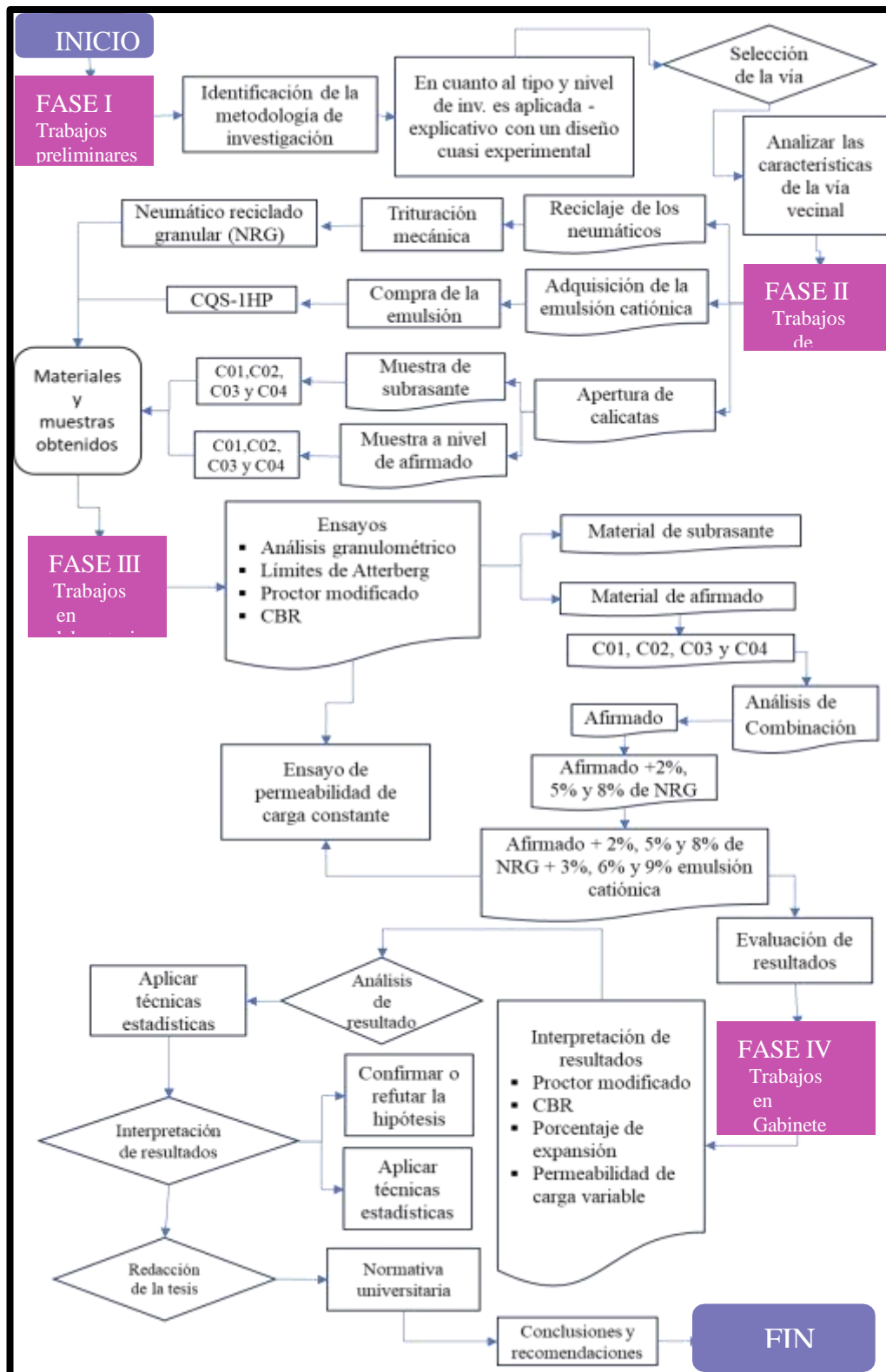


emulsión catiónica (EC). Por ello, el muestreo intencional permitió asegurar que la muestra fuera representativa de la problemática real y adecuada para el análisis experimental.

4.5 Procedimiento

El procedimiento seguido para el desarrollo de la presente investigación fue organizado y sistematizado mediante un flujograma, con el propósito de ofrecer una visión clara, secuencial y estructurada de todas las actividades ejecutadas durante el proceso investigativo.

El procedimiento de la investigación se desarrolló en cuatro fases. En la Fase I – Trabajos preliminares, se revisó información técnica, se definieron el problema, los objetivos y las variables, y se seleccionó la progresiva muestral. En la Fase II – Trabajos de campo, se ejecutaron las cuatro calicatas según el MTC y se recolectaron las muestras del afirmado, registrando las condiciones de deterioro y humedad de la vía AP-650. En la Fase III – Trabajos de laboratorio, se prepararon las muestras y se realizaron los ensayos de máxima densidad seca, porcentaje de expansión, CBR y permeabilidad para las nueve combinaciones experimentales de NRG y EC. Finalmente, en la Fase IV – Trabajos en gabinete, se procesaron los datos, se compararon resultados, se elaboraron tablas y gráficos y se efectuó la interpretación final junto con la contrastación de hipótesis y la formulación de conclusiones.



NOTA

En el flujograma muestra el procedimiento para la elaboración del presente trabajo de investigación, organizado por fases según las actividades principales realizadas.

Figura 18 — Flujograma del procedimiento de investigación



4.6 Técnica e instrumentos

4.6.1 Técnicas

Según, Hernández, y otros (2018), las técnicas de investigación constituyen los procedimientos sistemáticos utilizados para recolectar, procesar y analizar datos con el fin de obtener información válida y confiable. En investigaciones de enfoque cuantitativo, como la presente, se emplean técnicas estandarizadas y verificables entre ellas la observación estructurada y las pruebas experimentales de laboratorio que permiten medir de manera objetiva las variables estudiadas.

En esta investigación se empleó la técnica de observación directa porque permitió registrar in situ el estado real del afirmado de la vía AP-650, documentando de manera objetiva el deterioro estructural, la presencia de humedad, problemas de drenaje, zonas críticas y fallas superficiales. Esta técnica fue aplicada de forma sistemática durante el trabajo de campo. La observación directa fue fundamental para seleccionar la progresiva muestral y para verificar las condiciones iniciales del suelo antes de la extracción de muestras, asegurando que el material representara fielmente la problemática que se busca resolver mediante la aplicación de NRG y EC.

4.6.2 Instrumentos

Los instrumentos empleados en esta investigación fueron las escalas evaluativas y las pruebas validadas. La recolección de datos de laboratorio fue fundamental para evaluar el impacto del NRG y EC en la estabilización e impermeabilización de la capa de afirmado. Para ello, se emplearon fichas de observación, estos instrumentos permiten garantizar adecuadamente la fiabilidad de los resultados de la capa de afirmado.

Los formatos empleados para la recolección de datos incluyeron los siguientes protocolos de ensayos de materiales en laboratorio:

- Ficha para ensayo de granulometría.
- Ficha para ensayo de límites de Atterberg (LL, LP, IP).
- Ficha para ensayo de contenido de humedad.
- Ficha para ensayo proctor modificado.



- Ficha para ensayo CBR (California Bearing Ratio)
- Ficha para ensayo de permeabilidad de carga constante
- Ficha para diseño y preparación de mezcla con (NRG y EC).

a) Validación

Según Maldonado, y otros (2007), la validación de un instrumento de medición es un proceso esencial en la investigación científica que garantiza la precisión y relevancia de los datos recolectados.), la validación de una escala tipo Likert conlleva un análisis preciso de los ítems que la componen, asegurando que cada componente evidencie la actitud o variable que se desea medir. Este proceso incluye la aplicación de escala a una muestra de expertos, quienes evalúan la pertinencia y claridad de los ítems, y la realización de pruebas estadísticas para evaluar la validez y confiabilidad del instrumento. La validación no solo establece que el instrumento mide lo que pretende medir, sino que también garantiza que los resultados obtenidos sean consistentes y aplicables al contexto de estudio.

b) Juicio de expertos

El juicio de expertos es un proceso de revisión rigurosamente crítica de un instrumento de metodología a la valoración, realizada por profesionales con experiencia en el campo disciplinar y en el contenido específico de la metodología de investigación. Este procedimiento busca verificar la coherencia, relevancia y validez de los ítems, aportando confiabilidad y solidez al instrumento antes de su aplicación. Hernandez, y otros (2024).

En el marco de la presente investigación, se contó con la participación de 5 expertos, quienes realizaron la validación de los instrumentos a través de la calificación de los ítems, los cuales fueron: La escala de valoración es de 1 deficiente, 2 Regular, 3 Buena, 4 Muy buena y 5 Excelente, de esta manera asegurando su pertinencia y coherencia antes de la aplicación.



Tabla 22 — Juicio de expertos sobre la aplicación del tratamiento con NRG y EC

Experto	Categoría profesional	Especialización	Índice de aprobación
Mg. Angel Maldonado Mendevil	Magister	Gestión integral de cuencas hidrográficas	4/5
Ph D. Abbon Alex Vasquez Ramirez	Ph. D	Especialista en Ingeniería civil	4/5
Mg. Ruben Gamarra Mota	Magister	Ingeniería de proyectos de Inversión	5/5
Mg. Cesar Augusto Quilca Vergara	Magister	Recursos hídricos y Medio Ambiente	5/5
Mg. Ing. Rosbel A. Quispe Merino	Magister	Hidráulica y Ambiental	5/5
<p>NOTA</p> <p>La tabla presenta los resultados del juicio de expertos en relación con la validación de los instrumentos de medición utilizados en esta investigación.</p> <p>*La escala de valoración es de 1 muy en desacuerdo a 5, totalmente de acuerdo.</p>			

En el marco de los métodos cuantitativos, para evaluar el nivel de concordancia entre jueces, se utilizó el coeficiente de **V de Aiken**, herramienta que permite calcular la pertinencia, representatividad de cada ítem, constituye un intervalo de 0 a 1, por ende, mayor validez de contenido. L, y otros (1985).

- **El coeficiente de V de Aiken**, constituye un índice de validez de contenido que permite cuantificar la relevancia de cada ítem de un instrumento en concordancia con la evaluación por un grupo de expertos, se obtuvo una validez de contenido de instrumento. El valor oscila entre 0 y 1, siendo 1 el umbral de la máxima concordancia del ítem, dentro del ámbito evaluado. Hernández, Juárez, L., G; Tobón, S, (2018).

De acuerdo con los criterios de interpretación aceptados, los niveles de validez se clasifican como:

Tabla 23 — Valores promedio, coeficiente V de Aiken e intervalo de confianza

Valor promedio de la calificación	V	IC 95% V
3.14	0.713	0.499-0.861
3.43	0.810	0.601-0.924
3.57	0.857	0.653-0.950
3.71	0.903	0.709-0.973
3.86	0.953	0.775-0.992
4.00	1.000	0.845-1.000

NOTA

La tabla muestra la relación entre el valor promedio de la calificación otorgada por los expertos y el coeficiente V de Aiken, incluyendo el intervalo de confianza al 95 % para cada ítem evaluado.

FUENTE: Elaboración propia con base en (L, y otros, 1985)

1. Datos:

- Número de expertos (n) = 5
- Valor mínimo (lo) =1
- Número de niveles (s) =5

2. Fórmula del V de Aiken:

$$V = \frac{\sum r}{n \cdot (s - 1)}$$

Donde:

- **r** = Es la diferencia entre la puntuación del experto y el valor min de la escala (lo) entonces $r = x - lo$
- **lo** = Valor más bajo posible de la escala
- \sum = Sumatoria de todos los expertos
- **n** = Numero de expertos
- **s** = puntos de la escala



- **Entonces los puntajes por los expertos:**

- Experto 1= 4 ➔ 4-1=3
- Experto 2= 4 ➔ 4-1=3
- Experto 3= 5 ➔ 5-1=4
- Experto 4= 5 ➔ 5-1=4
- Experto 5= 5 ➔ 5-1=4

- Se procede a sumar los valores de (r):

$$3+3+4+4+4=18$$

- **Aplicando a la fórmula:**

$$V = \frac{\sum r}{n \cdot (s-1)} = \frac{18}{5.4} = \frac{18}{20} = 0.90$$

La validación del contenido de instrumento se realizó mediante el juicio de expertos aplicando el coeficiente de V de Aiken, el resultado obtenido está dentro del rango con un valor de **0.90 “excelente validez de contenido”**, lo que esta evidencia una alta consistencia, para evaluar la confiabilidad, la aplicación aporta evidencia sólida de la validez y fiabilidad del instrumento confirmando su pertinencia para el estudio.

Para poder garantizar la idoneidad de los instrumentos empleados en la evaluación técnica, se realizó una validación por juicio de expertos, quienes fueron especialistas en materiales viales y ensayos, evaluaron la estructura, redacción y criterios establecidos por las normativas, emitiendo su conformidad. Lo cual permitió confirmar que los instrumentos utilizados en los ensayos de laboratorio cumplían con los requisitos normativos y metodológicos. De manera complementaria, se aplicó una encuesta testimonial del Centro Educativo Inicial I.E.I “San Francisco Solano”, encontrada debajo de la vía, con el objetivo de sustentar el impacto social del estudio. asegurando su aplicabilidad y de esta manera alcanzar con los objetivos planteados en la investigación.



4.7 Análisis estadístico

4.7.1 Análisis estadístico descriptivo

Según Hernandez y otros, (2014), la estadística descriptiva cumple un rol fundamental en el proceso de investigación, ya que permite presentar, organizar y resumir los datos recolectados de manera clara y comprensible. En esta investigación, la estadística descriptiva se utilizó para describir el comportamiento de las variables técnicas evaluadas, tales como la máxima densidad seca (MDS), porcentaje de expansión, índice CBR y coeficiente de permeabilidad (k), mediante medidas de tendencia central y dispersión.

Entre los parámetros estadísticos básicos empleados se consideraron la media aritmética, la varianza y la desviación estándar, las cuales permitieron analizar el valor promedio de los resultados y la variabilidad de los datos obtenidos para cada combinación de tratamiento. La media aritmética representa el valor central alrededor del cual se distribuyen los datos, mientras que las medidas de dispersión permiten evaluar la estabilidad y consistencia de los resultados experimentales

4.7.2 Análisis estadístico inferencial

La estadística inferencial se empleó con la finalidad de realizar inferencias sobre la población a partir de los resultados obtenidos en la muestra experimental, permitiendo contrastar las hipótesis planteadas en la investigación y determinar si las diferencias observadas entre los tratamientos son estadísticamente significativas.

4.7.2.1 Criterios para la selección de la prueba estadística

a) Tipo de objetivos: La investigación corresponde a un nivel explicativo, debido a que los objetivos están orientados a determinar la influencia del (NRG) y la (EC) en las propiedades mecánicas e hidráulicas del afirmado, en ese sentido, se recurrió al uso de estadística inferencial para evaluar la existencia de efectos significativos entre las variables.

b) Tipos de variables: En esta investigación considera variables independientes y dependientes. Las variables independientes son de



tipo experimental o de tratamiento, representadas por los porcentajes de (NRG) y (EC), los cuales definen los distintos niveles de intervención dentro del diseño del estudio. Las variables dependientes son de tipo cuantitativo continuo, correspondientes a parámetros medidos en escala continua, tales como la máxima densidad seca (MDS), porcentaje de expansión, índice CBR y permeabilidad “k”.

c) **Cantidad de datos:** Se considera un tamaño de muestra < 50 observaciones por variable, correspondiente a los resultados experimentales obtenidos en laboratorio. Dicho tamaño de muestra estuvo condicionado por la repetición de ensayos bajo condiciones controladas, característica propia de los estudios experimentales de laboratorio, lo cual orientó la selección de las pruebas estadísticas empleadas.

d) **Prueba de normalidad**

Previo a la selección de las pruebas estadísticas inferenciales, se evaluó el supuesto de normalidad de los datos mediante las pruebas de Kolmogorov–Smirnov con corrección de Lilliefors y Shapiro–Wilk, siendo esta última la más adecuada para muestras pequeñas ($gl = 11$), conforme a lo recomendado por ARIAS, y otros (2023).

Las hipótesis planteadas para la prueba de normalidad fueron:

- **Hipótesis nula H_0 :** Los datos presentan una distribución normal.
- **Hipótesis alternativa H_1 :** Los datos no presentan una distribución normal.
- Nivel de significancia: $\alpha = 0.05$
- Regla de decisión.
 - Si $p\text{-valor} \geq 0.05$, se acepta H_0 (los datos son normales).
 - Si $p\text{-valor} < 0.05$, se rechaza H_0 (los datos no son normales).



NOTA

Para la estadística, el análisis de la Varianza, del acrónimo ANOVA, es una colección de modelos estadísticos y sus procedimientos asociados, en el cual la varianza es la clave para encontrar diferencias entre grupos (Montgomery, y otros, 1996)

FUENTE: Nolberto y Ponce, 2017

Figura 19 — Esquema de criterios de una distribución normal

4.7.2.2 Análisis de varianza (ANOVA)

Según Fisher (1925) en su trabajo de investigación menciona que el análisis de varianza (ANOVA) es una herramienta estadística el cual es ampliamente utilizado para comparar las medias de tres o más grupos independientes, con el objetivo de hallar si existe alguna diferencia significativa entre las medias de los grupos y si existe alguna diferencia conocer a los grupos diferentes entre sí.

Según Montgomery, y otros (1996) y Devore (2016), también mencionan que ANOVA es una herramienta adecuada para cuando se desea comparar las medias de múltiples grupos, bajo el supuesto de normalidad y homogeneidad de varianzas de los datos.

a) Análisis de varianza de dos factores

El análisis de varianza (ANOVA) de dos factores es una técnica estadística que se utiliza cuando se desea analizar la influencia simultánea de dos variables independientes factores, sobre una variable dependiente, resultado. Además, permite examinar si



existe interacción entre los factores evaluados. Devore (2016). Permitirá determinar si las diferencias observadas en los resultados experimentales eran estadísticamente significativas. (Montgomery, 2019). Para cada variable, se formuló la hipótesis estadística:

Se consideró un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. Si el valor-p (p- valor) obtenido fue inferior a 0.05, se rechazó la hipótesis nula, concluyendo que el factor evaluado influía significativamente en la propiedad analizada.

4.7.2.3 Prueba no paramétrica de Friedman

De acuerdo con Siegel, y otros (1988), la prueba de Friedman es un método no paramétrico utilizado para comparar tres o más tratamientos relacionados cuando una variable cuantitativa no cumple el supuesto de normalidad. Esta prueba se basa en la asignación de rangos dentro de cada bloque y permite evaluar si existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos analizados. El estadístico de Friedman se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$X_F^2 = \frac{12}{nk(k+1)} \sum_{j=1}^k R_j^2 - 3n(k+1)$$

Donde:

- n = Número de bloques.
- k = Número de tratamientos comparados.
- R_j = Suma de rangos del tratamiento j

Donde **n** representa el número de bloques, **k** el número de tratamientos comparados y R_j la suma de rangos correspondiente a cada tratamiento.



CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1 Análisis de resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos mediante los ensayos de laboratorio, con el propósito de evaluar las propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas del suelo de afirmado tratado con aditivos NRG y EC, así como del suelo natural de la subrasante como referencia comparativa. Esta caracterización permitió determinar la viabilidad del uso de neumático reciclado granular NRG y emulsión catiónica EC para mejorar las condiciones de estabilización e impermeabilización en la vía AP-650, Abancay.

5.1.1 Caracterización del afirmado natural

5.1.1.1 Propiedades y características físicas del afirmado

Se realizó el análisis granulométrico, el cual permitió determinar qué cantidad de material pasaba a través de diversos tamices, La curva granulométrica resultante muestra cómo varían los tamaños de las partículas del afirmado, lo que permitió conocer la distribución del tamaño de las partículas y sus características, según Norma **N.T.P. 399.128**. Complementando este análisis, se utilizó el Ábaco de Casagrande para determinar el comportamiento plástico del suelo, lo cual es fundamental para clasificarlo según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), según norma **N.T.P. 399.13**.

Como complemento se caracterizó el comportamiento plástico del suelo, mediante el Abaco de Casagrande y (SUCS) bajo la Norma **N.T.P. 399.13**. Si bien el análisis de la subrasante el cual se incluye como referencia, el enfoque del estudio está centrado en el mejoramiento del afirmado.

A continuación, se presentan el cuadro con los siguientes resultados del análisis granulométrico y clasificación correspondiente.



Tabla 24 — Resultados de la caracterización granulométrica y clasificación del afirmado

Calicata	Progresiva (km)	Granulometría (% que pasa)														Contenido de humedad (%)	Límite de consistencia (N° 40)		Clasificación de suelos	
		2"	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	1/4"	N°4	N°10	N°20	N°40	N°60	N°100	N°200		L.L	L.P	SUCS	AASHTO
C-01	00+240	100	90.23	81.93	75.92	64.98	56.45	56.45	38.92	24.07	16.88	16.89	0	0	0	4.08	19.42%	16.60%	GP GM	A-1-a
C-02	00+480	100	100	100	100	90.36	78.07	78.07	59.65	40.66	32.35	0	0	0	0	3.19	26.50%	24.29%	GM	A-1-b
C-03	00+750	100	100	100	100	96.72	82.49	82.49	67.60	49.12	32.71	0	0	14.97	10.28	5.21	17.86%	16.26%	GP GM	A-1-a
C-04	01+000	100	100	100	100	94.13	88.84	88.84	72.73	52.91	37.19	29.22	25.27	22.18	18.77	4.43	27.29%	22.66%	GM	A-1-b

NOTA
En la siguiente tabla se muestra la caracterización granulométrica del afirmado, correspondiente al presente estudio de investigación

Tabla 25 — Características físicas y mecánicas del afirmado

Calicata	Características físicas y mecánicas del afirmado								
	Muestra	COH %	MDS (gr/cm ³)	% de expansión	CBR		PERMEABILIDAD		
					95%	100%	Tiempo	K (cm/seg)	Not. Exp.
C-01	Afirmado	4.08	2.26	0.829	33.90	41.65	100.00	0.00137	1.38 E-03
C-02		3.19	2.31	1.025	46.10	53.87	113.20	0.00111	1.12 E-03
C-03		5.21	2.21	0.872	41.80	48.53	189.00	0.00076	7.61 E-04
C-04		4.43	2.27	0.959	43.3	50.10	142.00	0.00104	1.05 E-03

5.1.2 Resultados para el objetivo específico 01

5.1.2.1 Resultados del ensayo de máxima densidad seca

El cuadro presenta los resultados de los ensayos de densidad seca y humedad obtenidos de diferentes muestras de suelo extraídas de las calicatas C-01, C-02, C-03, y C-04. Se muestra la densidad seca (g/cm^3) el porcentaje de humedad (CH), la máxima densidad seca (MDS), y el óptimo contenido de humedad (OCH) para cada muestra. Los valores corresponden a la evaluación de cuatro muestras por calicata.

Tabla 26 — Resultados de la MDS y OCH en las calicatas

Calicatas	N° de muestras	DS (gr/cm^3)	%Humedad (ch)	MDS (gr/cm^3)	Optimo contenido de humedad %
C-01	1	2.04	2.95	2.25	4.08
	2	2.19	3.48	2.25	4.08
	3	2.26	4.08	2.25	4.08
	4	2.15	5.68	2.25	4.08
C-02	1	2.13	1.73	2.31	3.19
	2	2.26	2.2	2.31	3.19
	3	2.31	3.19	2.31	3.19
	4	2.24	4.64	2.31	3.19
C-03	1	2.00	2.68	2.21	5.21
	2	2.17	4.13	2.21	5.21
	3	2.21	5.21	2.21	5.21
	4	2.18	6.38	2.21	5.21
C-04	1	2.10	2.40	2.26	4.43
	2	2.20	3.18	2.26	4.43
	3	2.27	4.43	2.26	4.43
	4	2.09	4.85	2.26	4.43

NOTA

De la Tabla 26, muestra que (MDS) y el (OCH) difieren entre calicatas: C-01 se obtuvo $\text{MDS} = 2.25 \text{ gr}/\text{cm}^3$ con $\text{OCH} = 4.08\%$, registrándose densidades secas de $2.04\text{--}2.26 \text{ gr}/\text{cm}^3$ y humedades de $2.95\text{--}5.68\%$; C-02 se alcanzó la mayor compactibilidad con $\text{MDS} = 2.31 \text{ gr}/\text{cm}^3$ y $\text{OCH} = 3.19\%$, con densidades de $2.13\text{--}2.31 \text{ gr}/\text{cm}^3$ y humedades de $1.73\text{--}4.64\%$; C-03, presentó la menor $\text{MDS} = 2.21 \text{ gr}/\text{cm}^3$ y el mayor $\text{OCH} = 5.21\%$, con una densidad de $2.00\text{--}2.21 \text{ gr}/\text{cm}^3$ y humedades de $2.68\text{--}6.38\%$; y C-04 se obtuvo $\text{MDS} = 2.26 \text{ gr}/\text{cm}^3$ con $\text{OCH} = 4.43\%$, con densidades de $2.09\text{--}2.27 \text{ gr}/\text{cm}^3$ y humedades de $2.40\text{--}4.85\%$, observándose en todos los casos que la densidad máxima medida coincide o se aproxima al OCH (4.08% , 3.19% , 5.21% y 4.43%).

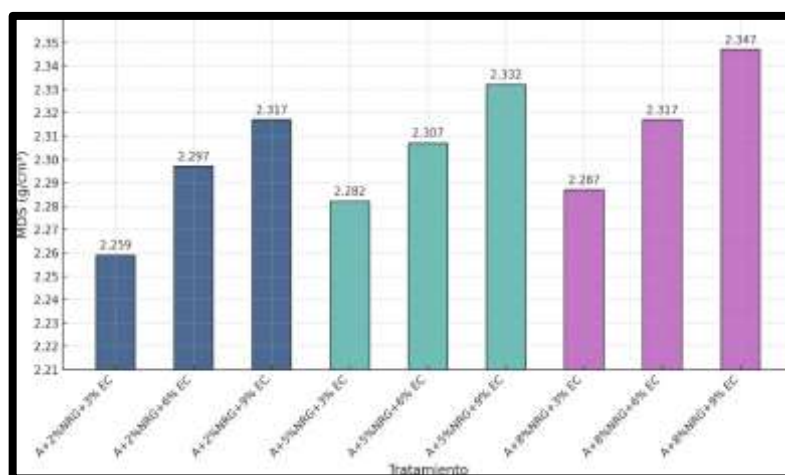
a) Calicata C-01

Tabla 27 — Comportamiento del NRG y EC en la MDS, C-01

Resumen del ensayo Proctor modificado - MDS y COA						
Calicata 01	Emulsión catiónica					
NRG	3%	COA	6%	COA	9%	COA
2%	2.26	4.59	2.30	5.09	2.32	5.59
5%	2.28	4.60	2.31	5.10	2.33	5.60
8%	2.29	4.61	2.32	5.11	2.35	5.61

NOTA

La Tabla 27, evidencia que al incrementar la emulsión catiónica (EC) de 3% a 6% y 9% se elevó la MDS y también el COA para todos los porcentajes de NRG: con NRG 2% la MDS paso de 2.26 a 2.30 y 2.32 gr/cm³, mientras el COA aumenta de 4.59% a 5.09% y 5.59%; con NRG 5% la MDS subió de 2.28 a 2.31 y 2.33 gr/cm³ y el COA de 4.60% a 5.10% y 5.60%; y con NRG 8% la MDS incrementa de 2.29 a 2.32 y 2.35 gr/cm³ con COA de 4.61%, 5.11% y 5.61%, destacando que el mayor valor observado corresponde a NRG 8% + EC 9% con MDS = 2.35 gr/cm³ y COA = 5.61%.



NOTA

El gráfico de la MDS (g/cm³) en C-01 muestra un incremento general de la compactación al aumentar la EC y el NRG evidenciando que el mejor desempeño corresponde al tratamiento NRG 8% + EC 9% (2.347 g/cm³), mientras el menor valor se presenta en NRG 2% + EC 3% (2.259 g/cm³).

Figura 20 — Resultados de los valores de la MDS, C-01



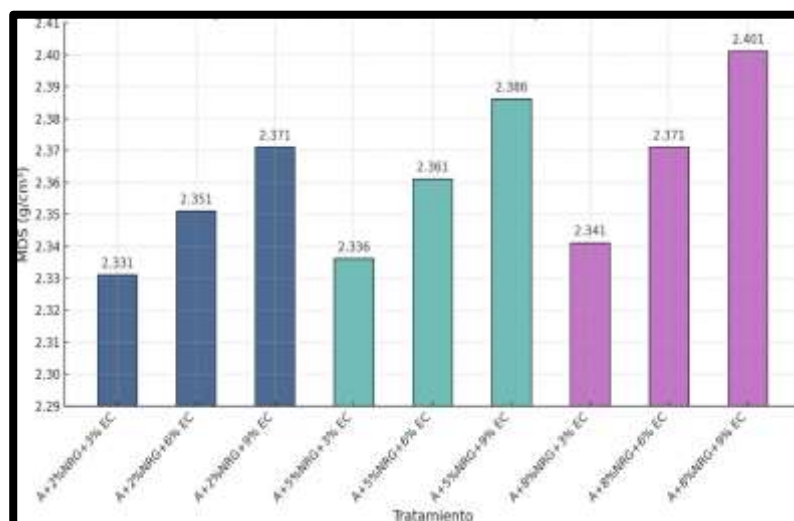
b) Calicata C-02

Tabla 28 — Comportamiento del NRG y EC en la MDS, C-02

Resumen del ensayo proctor modificado - MDS y OCH						
Calicata 02	Emulsión catiónica EC					
	NRG	3%	COA	6%	COA	9%
2%	2.33	3.70	2.35	4.20	2.37	4.70
5%	2.34	3.71	2.36	4.21	2.39	4.71
8%	2.34	3.72	2.37	4.22	2.40	4.72

NOTA

La Tabla 28, evidencia un aumento progresivo de la MDS y del COA al incrementar la EC de 3% a 6% y 9% en todos los contenidos de NRG: con NRG 2% la MDS sube de 2.33 a 2.35 y 2.37 gr/cm³, mientras el COA pasa de 3.70% a 4.20% y 4.70%; con NRG 5% la MDS aumenta de 2.34 a 2.36 y 2.39 gr/cm³ y el COA de 3.71% a 4.21% y 4.71%; y con NRG 8% la MDS va de 2.34 a 2.37 y 2.40gr/cm³ con COA de 3.72%, 4.22% y 4.72%, destacando el mayor valor con NRG 8% + EC 9% que alcanza MDS = 2.40 gr/cm³ y COA = 4.72% combinaciones.



NOTA

En la gráfica de la MDS (g/cm³) de la C-02, se evidencia que el mejor desempeño corresponde al tratamiento NRG 8% + EC 9% (2.401 g/cm³), mientras el menor valor se presenta en NRG 2% + EC 3% (2.331 g/cm³).

Figura 21 — Resultados de los valores de la MDS, C-02



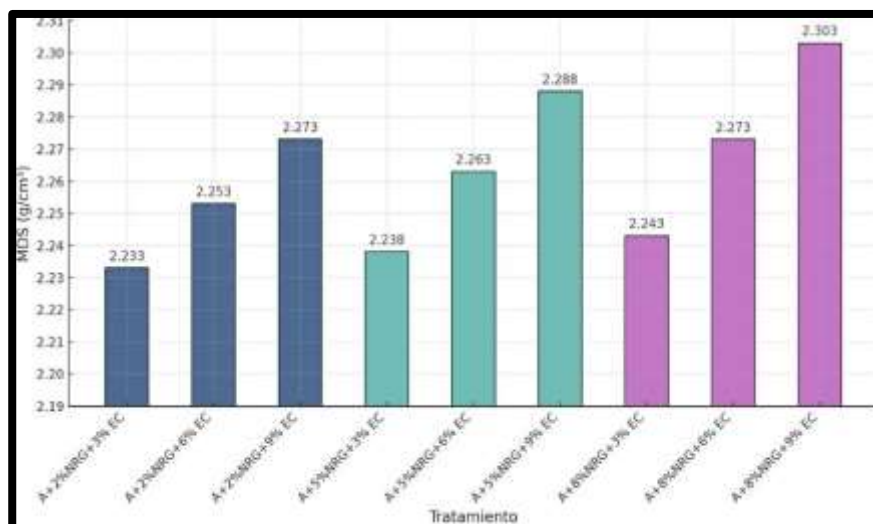
c) Calicata C-03

Tabla 29 — Comportamiento del NRG y EC en la MDS, C-03

Resumen del ensayo proctor modificado - MDS y OCH						
Calicata 03	Emulsión catiónica					
NRG	3%	COA	6%	COA	9%	COA
2%	2.23	5.72	2.25	6.22	2.27	6.72
5%	2.24	5.73	2.26	6.23	2.29	6.73
8%	2.24	5.73	2.27	6.23	2.30	6.73

NOTA

La Tabla 29, muestra que al incrementar la emulsión catiónica (EC) de 3% a 6% y 9% se incrementan tanto la MDS como el COA en todos los niveles de NRG: con NRG 2% la MDS pasa de 2.23 a 2.25 y 2.27 gr/cm³, mientras el COA aumenta de 5.72% a 6.22% y 6.72%; con NRG 5% la MDS sube de 2.24 a 2.26 y 2.29 gr/cm³ y el COA de 5.73% a 6.23% y 6.73%; y con NRG 8% la MDS se eleva de 2.24 a 2.27 y 2.30 gr/cm³ con COA de 5.73%, 6.23% y 6.73%, destacando el mayor valor registrado con NRG 8% + EC 9% que alcanza MDS = 2.30 gr/cm³ y COA = 6.73%.



NOTA

En la figura de la MDS (g/cm³) en C-03 se confirma que el mayor valor corresponde al tratamiento NRG 8% + EC 9% (2.303 g/cm³) y el menor a NRG 2% + EC 3% (2.233 g/cm³).

Figura 22 — Resultados de los valores de la MDS, C-03



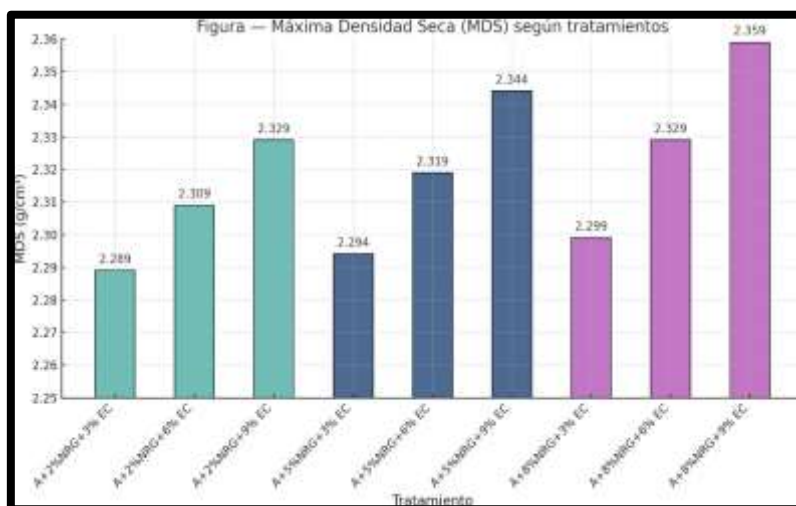
d) Calicata C-04

Tabla 30 — Comportamiento del NRG y EC en la MDS, C-04

Resumen del ensayo proctor modificado - MDS y COA						
Calicata 04	Emulsión catiónica					
NRG	3%	COA	6%	COA	9%	COA
2%	2.29	4.94	2.31	5.44	2.33	5.94
5%	2.29	4.95	2.32	5.45	2.34	5.95
8%	2.30	4.95	2.33	5.45	2.36	5.95

NOTA

La Tabla 30, muestra que al incrementar la emulsión catiónica (EC) de 3% a 6% y 9% se incrementan la MDS y el COA en todos los porcentajes de NRG: con NRG 2% la MDS pasa de 2.29 a 2.31 y 2.33 gr/cm³ y el COA de 4.94% a 5.44% y 5.94%; con NRG 5% la MDS aumento de 2.29 a 2.32 y 2.34 gr/cm³ y el COA de 4.95% a 5.45% y 5.95%; y con NRG 8% la MDS subió de 2.30 a 2.33 y el mayor valor con 2.36 gr/cm³, mientras el COA se mantuvo en 4.95%, 5.45% y 5.95%, destacando que la combinación de mejor desempeño corresponde a NRG 8% + EC 9% (MDS = 2.36 gr/cm³; COA = 5.95%).



NOTA

El gráfico de la MDS (g/cm³) en C-04 se confirmó que el mejor desempeño corresponde al tratamiento NRG 8% + EC 9% (2.359 g/cm³), mientras el menor valor se presenta en NRG 2% + EC 3% (2.289 g/cm³).

Figura 23 — Resultados de los valores de la MDS, C-04



5.1.3 Resultados para el objetivo específico 02

5.1.3.1 Porcentaje de expansión

El cuadro presenta los resultados del porcentaje de expansión en las muestras de suelo de las calicatas, considerando diferentes concentraciones de neumático reciclado granular (NRG) y emulsión catiónica (EC). Se muestra la expansión del suelo a diferentes porcentajes de NRG (2%, 5%, y 8%) y EC (3%, 6%, y 9%), junto con los valores de expansión del afirmado en cada calicata. Clave para evaluar el impacto de estos materiales en la estabilización del suelo.

Tabla 31 — Resumen del % de expansión del afirmado para combinaciones de NRG y EC

Resumen del porcentaje de expansión					
Calicata	Afirmado	NRG	Emulsión catiónica (EC)		
			3%	6%	9%
C-01	0.829	2%	0.79	0.63	0.44
		5%	0.65	0.46	0.59
		8%	0.87	0.94	0.92
C-02	1.025	2%	0.87	0.79	0.57
		5%	0.65	0.79	0.81
		8%	0.94	0.83	0.96
C-03	0.872	2%	0.65	0.52	0.50
		5%	0.89	0.92	0.83
		8%	0.94	0.87	0.96
C-04	0.959	2%	0.87	0.74	0.92
		5%	0.98	1.00	1.09
		8%	0.83	0.89	0.98

NOTA

La Tabla 31, muestra que el afirmado sin tratamiento presento expansiones de 0.829 (C-01), 1.025 (C-02), 0.872 (C-03) y 0.959 (C-04), mientras que con NRG+EC los valores varían entre 0.44 y 1.09: el menor % de expansión se obtuvo en C-01 con NRG 2% + EC 9%= 0.44 (también baja en NRG 2% de 0.79→0.63→0.44), y en C-03 con NRG 2% disminuyo de 0.65→0.52→0.50; en cambio, con NRG 8% predominaron expansiones altas como 0.87–0.94–0.92 (C-01), 0.94–0.83–0.96 (C-02), 0.94–0.87–0.96 (C-03) y 0.83–0.89–0.98 (C-04), y el mayor valor se registró en C-04 con NRG 5% + EC 9% =1.09 (0.98–1.00–1.09).



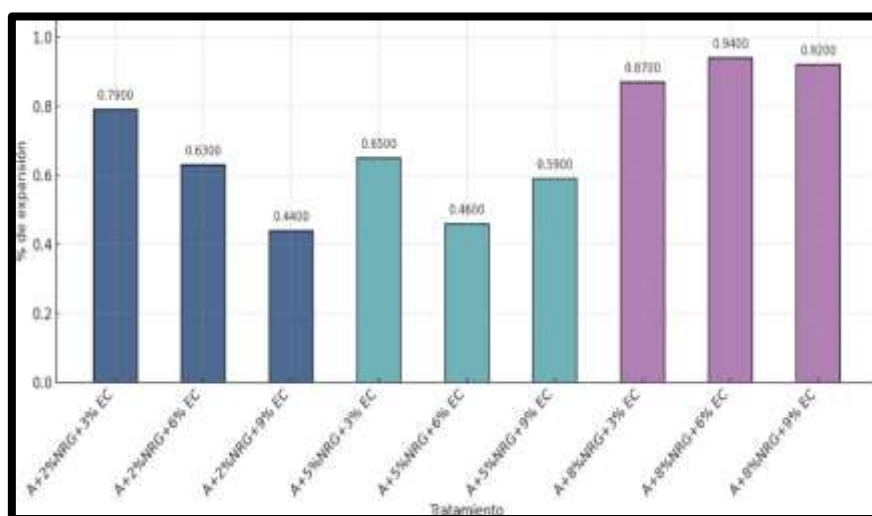
a) Calicata C-01

Tabla 32 — Resultado del porcentaje de expansión, C-01

Resumen del porcentaje de expansión			
Calicata 01	Emulsión catiónica		
NRG	3%	6%	9%
2%	0.79	0.63	0.44
5%	0.65	0.46	0.59
8%	0.87	0.94	0.92

NOTA

La Tabla 32, muestra que con NRG 2% la expansión disminuyo de 0.79 (EC 3%) a 0.63 (EC 6%) y alcanzo el mínimo con 0.44 (EC 9%); con NRG 5% bajo de 0.65 a 0.46 pero sube a 0.59 al llegar a EC 9%; y con NRG 8% se registró los valores más altos con 0.87, 0.94 y 0.92, siendo el mínimo 0.44 (NRG 2% + EC 9%) y el máximo 0.94 (NRG 8% + EC 6%).



NOTA

El gráfico del % de expansión en C-01 confirma que con NRG 2% la expansión se redujo al aumentar la EC, pasando de 0.7900 (EC 3%) a 0.6300 (EC 6%) y alcanzando el mínimo con 0.4400 (EC 9%); con NRG 5% baja de 0.6500 a 0.4600 pero volvió a subir a 0.5900 con EC 9%; mientras que con NRG 8% se obtuvieron los valores más altos con 0.8700, 0.9400 y 0.9200, siendo el mínimo 0.4400 (NRG 2% + EC 9%) y el máximo 0.9400 (NRG 8% + EC 6%).

Figura 24 — Resultados del porcentaje de expansión, C-01



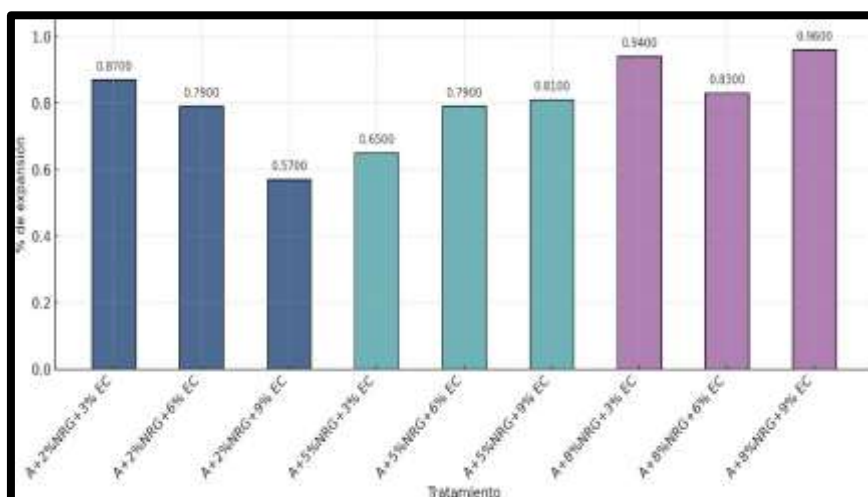
b) Calicata C-02

Tabla 33 — Resultado de los valores del % de expansión, C-02

Resumen del porcentaje de expansión			
Calicata C-02	Emulsión catiónica		
NRG	3%	6%	9%
2%	0.87	0.79	0.57
5%	0.65	0.79	0.81
8%	0.94	0.83	0.96

NOTA

La Tabla 33, muestra que con NRG 2% la expansión disminuye al incrementar la EC, pasando de 0.87 (EC 3%) a 0.79 (EC 6%) y 0.57 (EC 9%); con NRG 5% ocurrió un comportamiento inverso, aumentando de 0.65 a 0.79 y 0.81; y con NRG 8% se registraron valores altos con 0.94, 0.83 y 0.96, siendo el mínimo 0.57 (NRG 2% + EC 9%) y el máximo 0.96 (NRG 8% + EC 9%).



NOTA

El gráfico del % de expansión en C-02 muestra que con NRG 2% la expansión se redujo al aumentar la EC, bajando de 0.8700 (EC 3%) a 0.7900 (EC 6%) y llegando al mínimo con 0.5700 (EC 9%); con NRG 5% la expansión incremento de 0.6500 a 0.7900 y 0.8100; y con NRG 8% se mantienen los valores más altos con 0.9400, 0.8300 y el máximo de 0.9600, confirmando como mínimo 0.5700 (NRG 2% + EC 9%) y como máximo 0.9600 (NRG 8% + EC 9%).

Figura 25 — Resultados del porcentaje de expansión, C-02



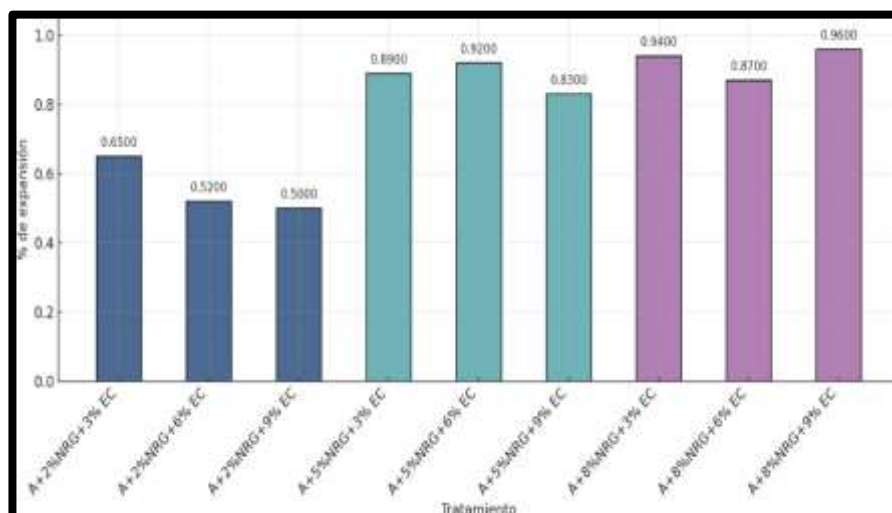
c) Calicata C-03

Tabla 34 — Resultado de los valores del % de expansión, C-03

Resumen del porcentaje de expansión			
Calicata C-03	Emulsión catiónica		
NRG	3%	6%	9%
2%	0.65	0.52	0.50
5%	0.89	0.92	0.83
8%	0.94	0.87	0.96

NOTA

La Tabla 34, evidencia que con NRG 2% la expansión disminuye al aumentar la EC, pasando de 0.65 (EC 3%) a 0.52 (EC 6%) y 0.50 (EC 9%), registrándose el mínimo del conjunto (0.50); con NRG 5% la expansión subió de 0.89 a 0.92 y luego bajo a 0.83 con EC 9%; y con NRG 8% se mantuvieron valores altos de 0.94, 0.87 y se alcanzó el máximo con 0.96(EC 9%), por lo que el rango en C-03 va de 0.50 a 0.96.



NOTA

El gráfico del % de expansión en C-03 confirma que con NRG 2% la expansión disminuyó al aumentar la EC, bajando de 0.6500 (EC 3%) a 0.5200 (EC 6%) y alcanzando el mínimo con 0.5000 (EC 9%); con NRG 5% se observa un aumento de 0.8900 a 0.9200 y luego una reducción a 0.8300 con EC 9%; y con NRG 8% se mantuvieron los valores más altos con 0.9400, 0.8700 y el máximo de 0.9600 (EC 9%), por lo que el rango total en la calicata va de 0.5000 a 0.9600.

Figura 26 — Resultados del porcentaje de expansión, C- 03



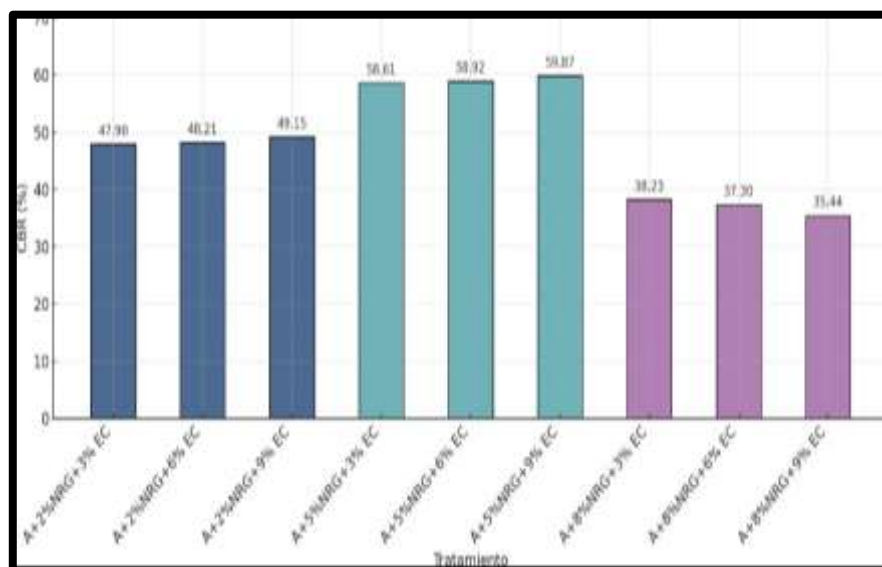
d) Calicata C-04

Tabla 35 — Resultado de los valores del % de expansión, C-04

Resumen del porcentaje de expansión			
Calicata C-04	Emulsión catiónica		
NRG	3%	6%	9%
2%	0.87	0.74	0.92
5%	0.98	1.00	1.09
8%	0.83	0.89	0.98

NOTA

La Tabla 35, muestra que con NRG 2% la expansión disminuyo de 0.87 (EC 3%) a 0.74 (EC 6%) pero volvió a aumentar a 0.92 (EC 9%); con NRG 5% se observó el mayor incremento, pasando de 0.98 a 1.00 y alcanzando el máximo con 1.09 (EC 9%); mientras que con NRG 8% la expansión aumento de 0.83 a 0.89 y 0.98, registrándose en C-04 un rango de 0.74 a 1.09, donde el mínimo es 0.74 (NRG 2% + EC 6%) y el máximo 1.09 (NRG 5% + EC 9%).



NOTA

El gráfico de CBR (%), se evidencia que el mejor desempeño corresponde al tratamiento NRG 5% + EC 9% (59.87%) y el menor a NRG 8% + EC 9% (35.44%).

Figura 27 — Resultados del porcentaje de expansión C- 04



5.1.4 Resultados para el objetivo específico 03

5.1.4.1 Relación de soporte de California CBR

El cuadro presenta los resultados del índice CBR en las muestras del afirmado sin estabilizar de las calicatas, evaluando diferentes porcentajes del neumático reciclado granular (NRG) y emulsión catiónica (EC). Se muestra cómo varían los valores del índice CBR con concentraciones de NRG (2%, 5%, y 8%) y EC (3%, 6%, y 9%), junto con los resultados obtenidos para el afirmado en cada calicata.

Tabla 36 — Resumen del CBR del afirmado en diferentes combinaciones de NRG y EC

Resumen del CBR 100%					
Calicata	Afirmado	NRG	Emulsión catiónica (EC)		
			3%	6%	9%
C-01	41.65	2%	47.9	48.21	49.15
		5%	58.61	58.92	59.87
		8%	38.23	37.3	35.44
C-02	53.87	2%	63.05	65.59	62.41
		5%	50.72	52.93	51.67
		8%	47.9	49.15	44.15
C-03	48.53	2%	55.76	56.08	57.66
		5%	46.65	42.28	40.1
		8%	29.58	28.97	29.28
C-04	50.10	2%	56.08	59.24	57.34
		5%	50.1	53.24	49.47
		8%	48.53	50.41	47.59

NOTA

La tabla 36, indica que el CBR del afirmado sin tratamiento es 41.65 (C-01), 53.87 (C-02), 48.53 (C-03) y 50.10 (C-04), mientras que con NRG+EC el CBR oscila entre 28.97 y 65.59: el máximo global se registró en C-02 con NRG 2%+ EC 6% = 65.59 (63.05–65.59–62.41) y el mínimo global en C-03 con NRG 8% + EC 6% = 28.97 (29.58–28.97–29.28); por calicata, en C-01 el mayor CBR ocurre con NRG 5% (58.61–58.92–59.87) y con NRG 8% disminuyo (38.23–37.30–35.44), en C-03 con NRG 2% mejoro (55.76–56.08–57.66) pero con NRG 5% cae (46.65–42.28–40.10), y en C-04 con NRG 2% se mantiene alto (56.08–59.24–57.34) frente a NRG 5% (50.10–53.24–49.47) y NRG 8% (48.53–50.41–47.59).



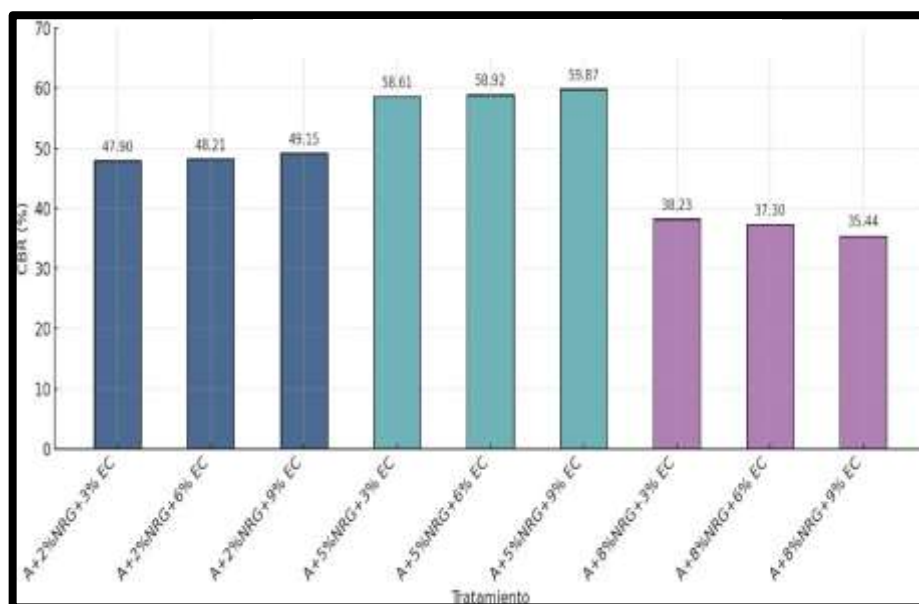
a) Calicata C-01

Tabla 37 — Resultado de los valores del CBR, C-01

Resumen del CBR			
Calicata C-01	Emulsión catiónica		
NRG	3%	6%	9%
2%	47.9	48.21	49.15
5%	58.61	58.92	59.87
8%	38.23	37.3	35.44

NOTA

y
La Tabla 37, evidencia que con NRG 2% el CBR subió de 47.9 a 48.21 y 49.15 al aumentar la EC (3%–6%–9%); con NRG 5% se alcanzaron valores de 58.61–58.92–59.87 (máximo 59.87 con EC 9%); y con NRG 8% el CBR disminuyó de 38.23 a 37.30 y 35.44 (mínimo 35.44 con EC 9%), con un rango total de 35.44 a 59.87.



NOTA

El gráfico de CBR (%) en C-01 confirma que con NRG 2% el CBR aumenta de 47.90 a 48.21 y 49.15 al subir la EC (3%–6%–9%); con NRG 5% se observaron los valores más altos con 58.61, 58.92 y el máximo de 59.87 (EC 9%); mientras que con NRG 8% el CBR disminuyó de 38.23 a 37.30 y alcanzó el mínimo con 35.44 (EC 9%), quedando un rango total de 35.44 a 59.87.

Figura 28 — Resultados de los valores del CBR, C-01



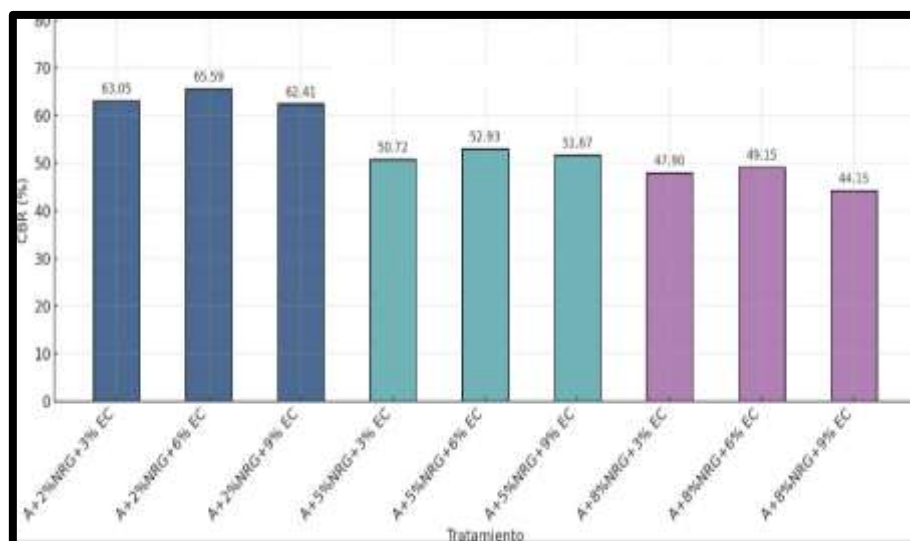
b) Calicata C-02

Tabla 38 — Resultado de los valores del CBR, C-02

Resumen del CBR			
Calicata C- 02	Emulsión catiónica		
NRG	3%	6%	9%
2%	63.05	65.59	62.41
5%	50.72	52.93	51.67
8%	47.9	49.15	44.15

NOTA

La Tabla 38, muestra que con NRG 2% se obtuvieron los valores más altos de CBR, aumentando de 63.05 (EC 3%) a 65.59 (EC 6%) y luego disminuyo a 62.41 (EC 9%), registrándose el máximo en 65.59 (NRG 2% + EC 6%); con NRG 5% el CBR varía ligeramente de 50.72 a 52.93 y 51.67; y con NRG 8% se presentaron los valores más bajos, pasando de 47.90 a 49.15 y alcanzando el mínimo con 44.15 (EC 9%), con un rango total en C-02 de 44.15 a 65.59.



NOTA

El gráfico de CBR(%) en C-02 evidencia que con NRG 2% se alcanzaron los valores más altos, incrementando de 63.05(EC 3%) a 65.59(EC 6%) bajando a 62.41(EC 9%), donde el máximo es 65.59; con NRG 5% el CBR varía ligeramente entre 50.72, 52.93 y 51.67; y con NRG 8% se observan los valores, pasando de 47.90 a 49.15 y descendiendo al mínimo de 44.15(EC 9%), con rango total de 44.15 a 65.59.

Figura 29 — Resultados de los valores del índice CBR, C-02



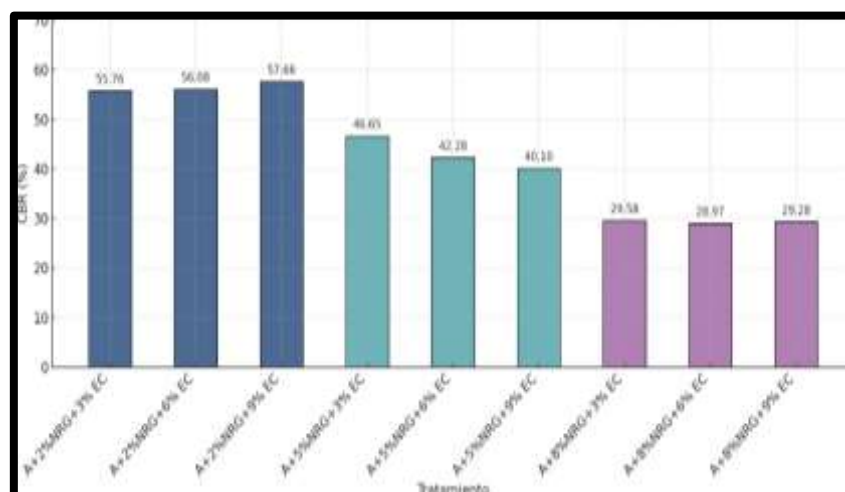
c) Calicata C-03

Tabla 39 — Resultado de los valores del índice CBR, C-03

Resumen del CBR			
Calicata C- 03	Emulsión catiónica		
NRG	3%	6%	9%
2%	55.76	56.08	57.66
5%	46.65	42.28	40.1
8%	29.58	28.97	29.28

NOTA

La Tabla 39, muestra que con NRG 2% el CBR aumento al incrementar la EC, pasando de 55.76 (EC 3%) a 56.08 (EC 6%) y alcanzando el máximo con 57.66 (EC 9%); en cambio, con NRG 5% el CBR disminuye conforme aumenta la EC, bajando de 46.65 a 42.28 y 40.10; y con NRG 8% se presentaron los valores más bajos con 29.58, el mínimo de 28.97 (EC 6%) y 29.28, por lo que el rango total en C-03 va de 28.97 a 57.66.



NOTA

El gráfico de CBR (%) en C-03 confirma que con NRG 2% el CBR aumenta al incrementar la EC, pasando de 55.76 (EC 3%) y alcanzando el máximo con 57.66 (EC 9%); con NRG 5% el CBR disminuye de 46.65 a 42.28 y 40.10 conforme sube la EC; con NRG 8% se registran los valores más < con 29.58, el mínimo de 28.97 (EC 6%) y 29.28, estableciendo un rango total de 28.97 a 57.66.

Figura 30 — Resultados del índice CBR, C-03



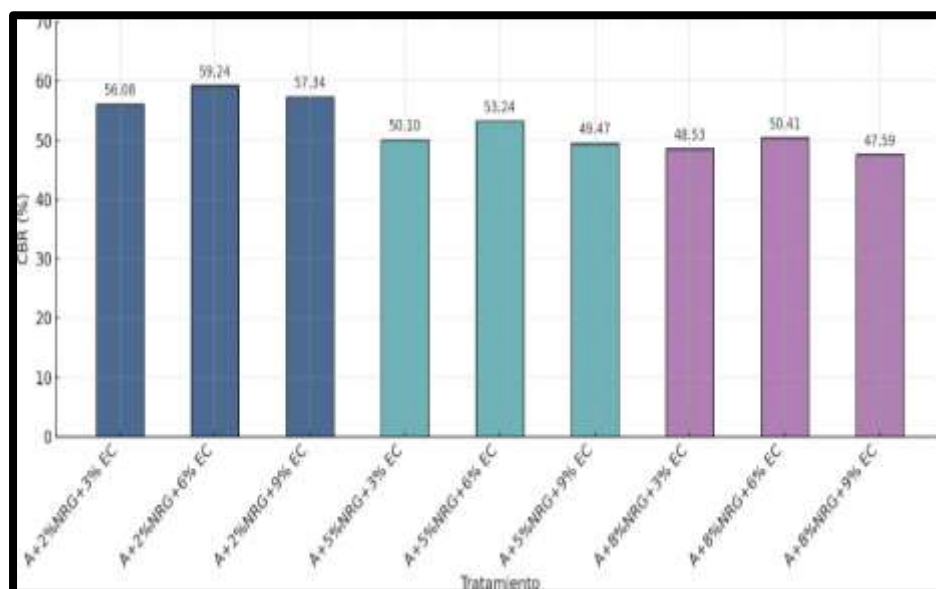
d) Calicata C-04

Tabla 40 — Resultado de los valores del índice CBR, C-04

Resumen del CBR			
Calicata C- 04	Emulsión catiónica		
NRG	3%	6%	9%
2%	56.08	59.24	57.34
5%	50.1	53.24	49.47
8%	48.53	50.41	47.59

NOTA

La Tabla 40, evidencia que con NRG 2% se obtienen los valores más altos de CBR, aumentando de 56.08 (EC 3%) a 59.24 (EC 6%) y luego disminuyendo a 57.34 (EC 9%), registrándose el máximo en 59.24 (NRG 2% + EC 6%); con NRG 5% el CBR varía de 50.10 a 53.24 y baja a 49.47; y con NRG 8% se mantiene en valores menores de 48.53, 50.41 y 47.59, siendo el mínimo 47.59 (NRG 8% + EC 9%), con un rango total en C-04 de 47.59 a 59.24.



NOTA

El gráfico de CBR (%) en C-04 confirma que con NRG 2% se registran los valores más altos, subiendo de 56.08 (EC 3%) a 59.24 (EC 6%) y luego bajando a 57.34 (EC 9%), donde el máximo es 59.24; con NRG 5% el CBR varía de 50.10 a 53.24 y desciende a 49.47; y con NRG 8% se observan valores menores de 48.53, 50.41 y el mínimo de 47.59 (EC 9%), estableciendo un rango total de 47.59 a 59.24.

Figura 31 — Resultados de los valores del índice CBR, C-04

Tabla 41 — Resumen comparativo de los valores de Proctor y CBR de la C-01

CALICATA	MATERIAL	PROCTOR				CBR %				
		%CH.	DS (gr/cm3)			CBR %	DS (gr/cm3)	C.B.R.		
C-01	Afirmado	2.95	2.04	DSM	COA	16.46	2.01	95%	100%	
		3.48	2.19	2.26	4.08	23.76	2.08	33.9	41.65	
		4.08	2.26			41.65	2.14			
		5.68	2.15							
	Afirmado + aditivos (5%NRG+9%EC)	3.38	2.13	DSM	COA	26.51	2.05	C.B.R.		
		4.62	2.22	2.33	5.60	37.61	2.12	95%	100%	
		5.60	2.33			59.87	2.15	48.31	59.87	
		6.20	2.14							

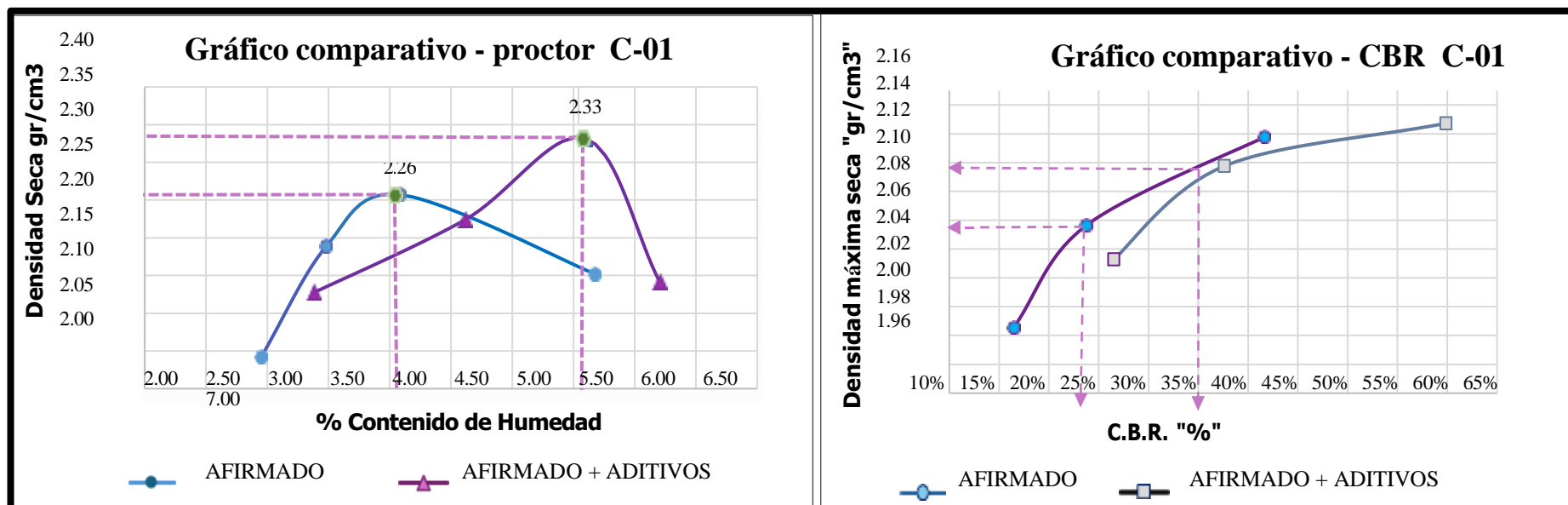


Figura 32— Gráfico comparativo de los valores de proctor y CBR de la C-01



Tabla 42 — Resumen comparativo de los valores de Proctor y CBR de la C-02

CALICATA	MATERIAL	PROCTOR				CBR %				
		%CH.	DS (gr/cm3)			CBR %	DS (gr/cm3)	C.B.R.		
C-02	Afirmado	1.73	2.13	DSM	COA	21.02	2.00	95%	100%	
		2.20	2.26	2.31	3.19	34.82	2.12	46.10	53.87	
		3.19	2.31			53.87	2.19			
		4.64	2.24							
	Afirmado + aditivos (2%NRG+6%EC)	2.76	2.22	DSM	COA	31.74	2.01	C.B.R.		
		3.63	2.30	2.35	4.20	43.21	2.14	95%	100%	
		4.20	2.35			65.59	2.21	52.29	65.59	
		4.71	2.25							

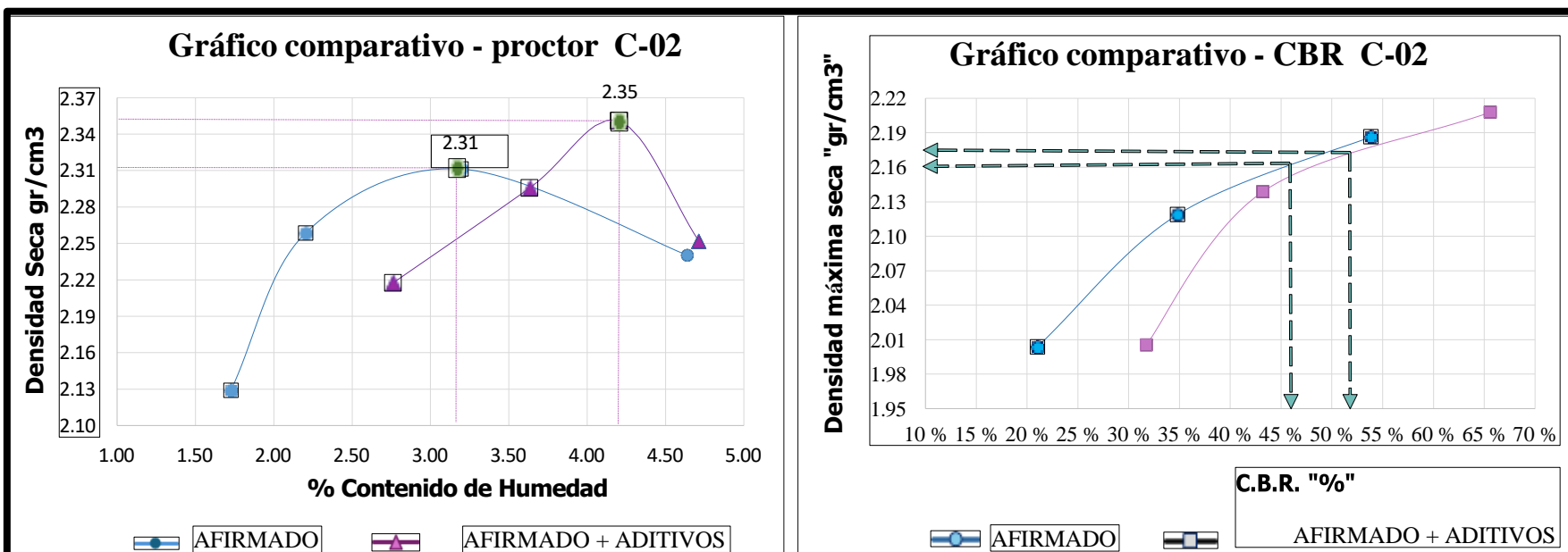


Figura 33 — Gráfico comparativo de los valores de Proctor y CBR de la C-02

Tabla 43 — Resumen comparativo de los valores de proctor y CBR de la C-03

CALICATA	MATERIAL	PROCTOR				CBR %			
		%CH.	DS (gr/cm3)			CBR %	DS (gr/cm3)	C.B.R.	
C-03	Afirmado	2.68	2.00	DSM	COA	19.49	1.87	95%	100%
		4.13	2.17	2.21	5.21	33.59	1.99	41.80	48.53
		5.21	2.21			48.53	2.07		
		6.38	2.18						
	Afirmado + aditivos (2%NRG+9%EC)	4.23	2.04	DSM	COA	20.71	1.99	C.B.R.	
		5.84	2.18	2.27	6.72	31.43	2.08	95%	100%
		6.72	2.27			57.66	2.14	48.01	57.66
		7.38	2.21						

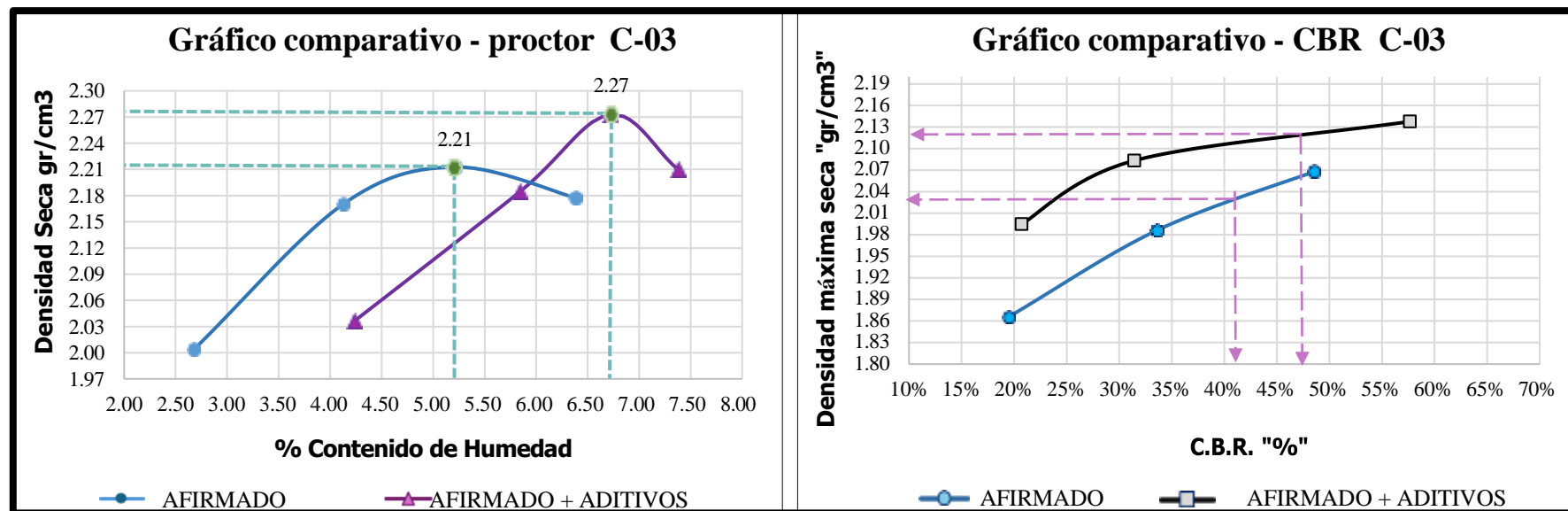


Figura 34 — Gráfico comparativo de los valores de Proctor y CBR de la C-03



Tabla 44 — Resumen comparativo de los valores de Proctor y CBR de la C-04

CALICATA	MATERIAL	PROCTOR				CBR %				
		%CH.	DS (gr/cm3)			CBR %	DS (gr/cm3)	C.B.R.		
C-04	Afirmado	2.40	2.10	DSM	COA	20.71	2.08	95%	100%	
		3.18	2.19	2.27	4.43	32.97	2.11	43.30	50.10	
		4.43	2.27			50.10	2.14			
		4.85	2.09							
	Afirmado + aditivos (2%NRG+6%EC)	3.60	2.12	DSM	COA	26.21	2.00	C.B.R.		
		4.46	2.22	2.31	5.44	41.96	2.12	95%	100%	
		5.44	2.31			59.24	2.17	48.53	59.24	
		6.41	2.20							

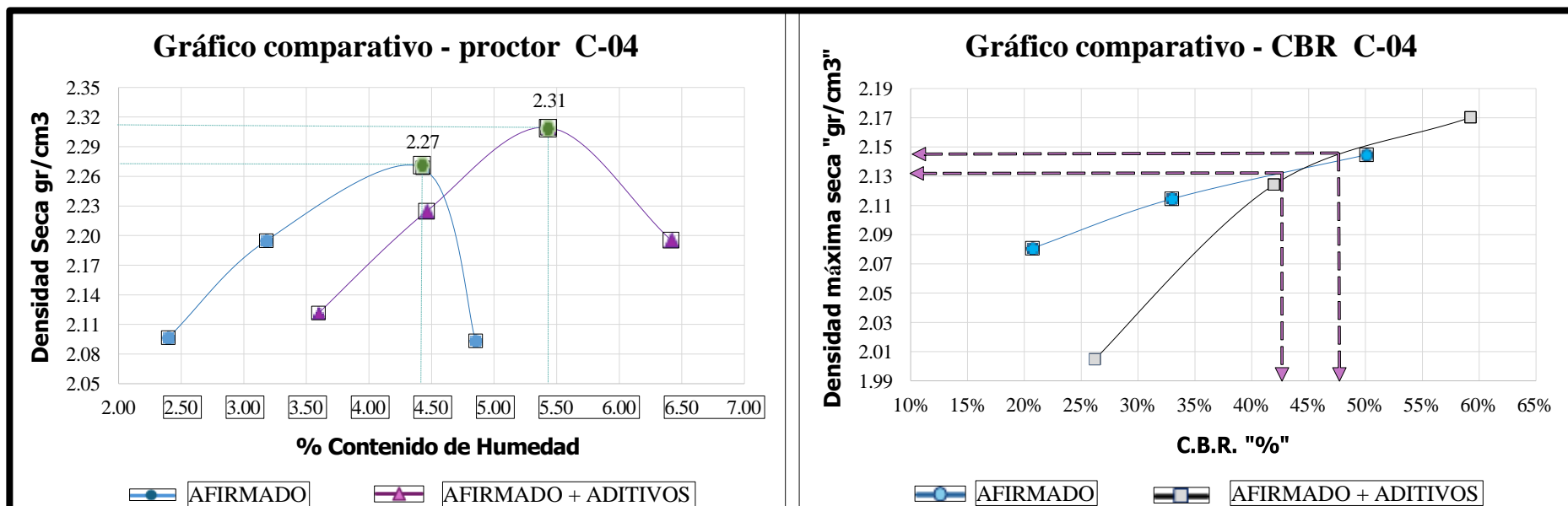


Figura 35 — Gráfico comparativo de los valores de Proctor y CBR de la C-04

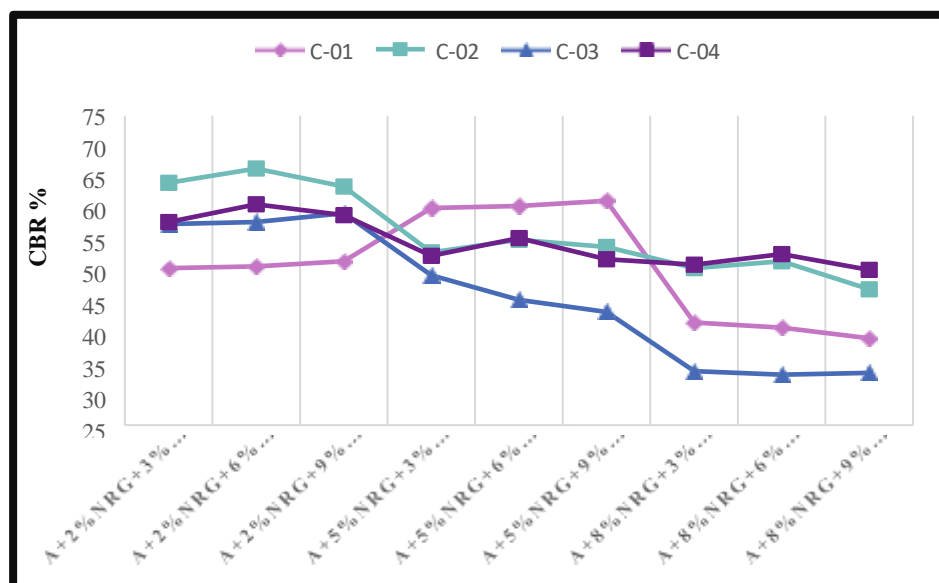
5.1.5 Comparación de los porcentajes de los CBR entre calicatas

Tabla 45 — Evaluación de los valores de CBR en calicatas

Resultados de los valores del CBR									
Calicata	NRG	Emulsión catiónica			Calicata	NRG	Emulsión catiónica		
		3%	6%	9%			3%	6%	9%
C-01	2%	47.9	48.21	49.15	C-02	2%	63.05	65.59	62.41
	5%	58.61	58.92	59.87		5%	50.72	52.93	51.67
	8%	38.23	37.3	35.44		8%	47.9	49.15	44.15
C-03	2%	55.76	56.08	57.66	C-04	2%	56.08	59.24	57.34
	5%	46.65	42.28	40.1		5%	50.1	53.24	49.47
	8%	29.58	28.97	29.28		8%	48.53	50.41	47.59

NOTA

La Tabla 45, resume el comportamiento del CBR por calicata según combinaciones de NRG (2%, 5% y 8%) y EC (3%, 6% y 9%), observándose que el máximo global corresponde a C-02 con NRG 2%, con valores de 63.05 (EC 3%), 65.59 (EC 6%) y 62.41 (EC 9%), mientras que el mínimo global se presentó en C-03 con NRG 8%, con 29.58 (EC 3%), 28.97 (EC 6%) y 29.28 (EC 9%); en C-01 el mejor desempeño ocurrió con NRG 5% (58.61–58.92–59.87) frente a NRG 2% (47.90–48.21–49.15) y NRG 8% (38.23–37.30–35.44); en C-03 el mayor CBR se mantuvo con NRG 2% (55.76–56.08–57.66) y disminuyó con NRG 5% (46.65–42.28–40.10); y en C-04 el mayor valor se obtuvo con NRG 2% + EC 6% = 59.24 (con 56.08–59.24–57.34), mientras que con NRG 5% se tuvo 50.10–53.24–49.47 y con NRG 8% 48.53–50.41–47.59, confirmando un rango general de 28.97 a 65.59 en todas las calicatas.



NOTA

El gráfico comparativo de CBR (%) por tratamientos evidencia diferencias claras entre calicatas y dosificaciones: para NRG 2% el CBR se mantuvo alto en todas las calicatas, destacando C-02 con 63.05–65.59–62.41 (EC 3%–6%–9%) y valores también elevados en C-03 (55.76–56.08–57.66) y C-04 (56.08–59.24–57.34), mientras C-01 es menor (47.90–48.21–49.15); para NRG 5% se observó el mejor desempeño de C-01 con 58.61–58.92–59.87, frente a C-02 con 50.72–52.93– 51.67, C-03 con descenso marcado 46.65–42.28–40.10, y C-04 con 50.10–53.24–49.47; y para NRG 8% el CBR tiende a reducirse, especialmente en C-03 con los menores valores 29.58–28.97–29.28, mientras C-01 baja a 38.23–37.30–35.44, C- 02 se mantuvo moderado 47.90–49.15–44.15 y C-04 cercano a 48.53–50.41– 47.59, confirmando un rango global aproximado de 28.97 a 65.59 y el máximo en C-02 (NRG 2% + EC 6% = 65.59).

Figura 36 — Gráfico comparativo del índice CBR, C1, C2, C3 y C4

Tabla 46 — Resumen del CBR de las cuatro calicatas

Resumen del Índice de CBR de las 4 calicatas			
Calicata	Afirmado	Afirmado + % NRG + % EC	
C-01	41.65	A+5%NRG+9% EC	59.87
C-02	53.87	A+2%NRG+6% EC	65.59
C-03	48.53	A+2%NRG+9% EC	57.66
C-04	50.10	A+2%NRG+6% EC	59.24

NOTA

La Tabla 46, resume que el CBR del afirmado sin tratar es 41.65 (C-01), 53.87 (C-02), 48.53 (C-03) y 50.10 (C-04), y que al aplicar las combinaciones óptimas el CBR aumenta a 59.87 en C-01 con A+5%NRG+9% EC (incremento de 18.22), a 65.59 en C-02 con A+2%NRG+6% EC (incremento de 11.72), a 57.66 en C-03 con A+2%NRG+9% EC (incremento de 9.13), y a 59.24 en C-04 con A+2%NRG+6% EC (incremento de 9.14), destacando como >CBR final el de C-02 (65.59) y como mayor mejora absoluta la de C-01 (+18.22).



5.1.6 Resultados para el objetivo específico 04

5.1.6.1 Coeficiente de permeabilidad

Se expone los valores obtenidos del coeficiente de permeabilidad en las muestras del afirmado, considerando distintos porcentajes de NRG Y EC. Se registran las variaciones de la capacidad de permeabilidad del suelo al incorporar NRG (2%, 5%, y 8%) y EC (3%, 6%, y 9%), junto con los datos correspondiente del afirmado de cada calicata.

Tabla 47 — Resumen de los valores de la permeabilidad en diferentes combinaciones de NRG y EC

Resumen del índice CBR					
Calicata	Afirmado	NRG	Emulsión catiónica (EC)		
			3%	6%	9%
C-01	1.38 E-03	2%	1.12 E-03	2.45 E-03	3.44 E-03
		5%	3.58 E-03	2.20 E-03	1.57 E-03
		8%	8.48 E-04	4.41 E-03	4.79 E-03
C-02	1.12 E-03	2%	7.10 E-04	3.01 E-03	5.68 E-04
		5%	1.94 E-04	9.96 E-03	6.07 E-04
		8%	7.6 E-04	6.31 E-03	8.7 E-03
C-03	7.61 E-04	2%	6.80 E-04	1.69 E-03	4.98 E-03
		5%	6.01 E-04	7.57 E-03	4.94 E-03
		8%	2.42 E-04	4.05 E-03	6.31 E-03
C-04	1.05 E-03	2%	4.83 E-04	1.9 E-03	4.2 E-03
		5%	2.61 E-04	2.34 E-03	5.11 E-03
		8%	5.0 E-04	5.92 E-03	6.61 E-03

NOTA

La Tabla 47, resume la variación de la permeabilidad del afirmado (en orden de magnitud E-04 a E-03) para combinaciones de NRG (2%, 5%, 8%) y EC (3%, 6%, 9%) en las cuatro calicatas, observándose un rango global entre 1.94 E-04 y 9.96 E-03: en C-01 los valores son 1.12E-03– 2.45E-03–3.44E-03 con NRG 2%, 3.58E-03–2.20E-03–1.57E-03 con NRG 5% y 8.48E-04–4.41E-03–4.79E-03 con NRG 8%; en C-02 se registran 7.10E-04–3.01E-03–5.68E-04 con NRG 2%, 1.94E-04–9.96E-03–6.07E-04 con NRG 5% (incluye el máximo



global $9.96E-03$ en NRG 5% + EC 6%) y $7.6E-04$ – $6.31E-03$ – $8.7E-03$ con NRG 8%; en C-03 se obtienen $6.80E-04$ – $1.69E-03$ – $4.98E-03$ con NRG 2%, $6.01E-04$ – $7.57E-03$ – $4.94E-03$ con NRG 5% y $2.42E-04$ – $4.05E-03$ – $6.31E-03$ con NRG 8%; y en C-04 se presentan $4.83E-04$ – $1.9E-03$ – $4.2E-03$ con NRG 2%, $2.61E-04$ – $2.34E-03$ – $5.11E-03$ con NRG 5% y $5.0E-04$ – $5.92E-03$ – $6.61E-03$ con NRG 8%, destacando como mínimo global $1.94E-04$ (C-02, NRG 5% + EC 3%) y como máximo global $9.96E-03$ (C-02, NRG 5% + EC 6%).

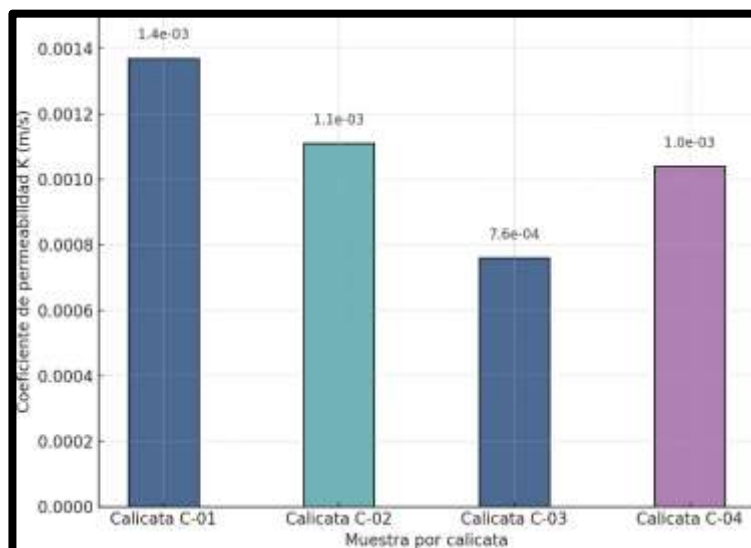
Tabla 48 — Resumen de la permeabilidad del afirmado sin aditivo

Resumen de calicatas para la permeabilidad k (m/s)				
Calicata	Tratamiento	Tiempo (s)	K(m/s)	Not. Exp.
C-01	Sin aditivo	100.00	0.00137	1.38E-03
C-02	Sin aditivo	133.20	0.00111	1.12E-03
C-03	Sin aditivo	189.00	0.00076	7.61E-04
C-04	Sin aditivo	142.00	0.00104	1.05E-03

NOTA

La Tabla 48, muestra la permeabilidad (k) del afirmado sin aditivo por calicata, con tiempos de ensayo entre 100.00 s y 189.00 s y valores de k entre $7.61E-04$ y $1.38E-03$ m/s: en C-01 se registró 100.00 s con $k = 0.00137$ m/s ($1.38E-03$), en C-02 133.20 s con $k = 0.00111$ m/s ($1.12E-03$), en C-03 el mayor tiempo 189.00 s con el menor valor $k = 0.00076$ m/s ($7.61E-04$), y en C-04 142.00 s con $k = 0.00104$ m/s ($1.05E-03$), destacando como máxima permeabilidad C- 01 ($1.38E-03$) y como mínima C-03 ($7.61E-04$).





NOTA

El gráfico de permeabilidad k (m/s) sin aditivo confirma la variación entre calicatas, registrándose C-01 = 1.4E-03, C-02 = 1.1E-03, C-03 = 7.6E-04 y C- 04 = 1.0E-03, donde la mayor permeabilidad corresponde a C-01 (≈1.38E-03) y menor a C-03 (≈7.61E-04).

Figura 37 — Permeabilidad del afirmado sin aditivos

a) Calicata C-01

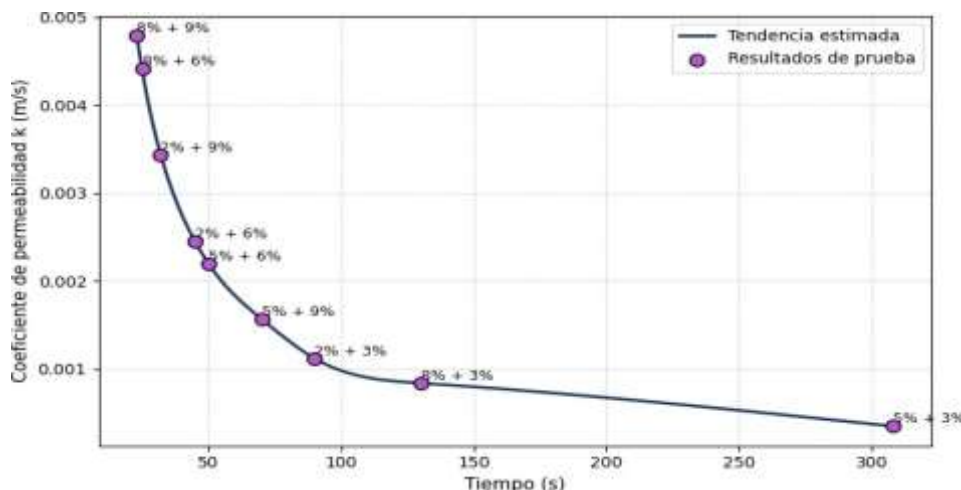
Tabla 49 — Resultados de los valores de la permeabilidad, C-01

Calicata	NRG (%)	EC (%)	Tiempo (s)	k (m/s)	Notación
C-01	2%	3%	90	0.00112	1.12E-03
	2%	6%	45	0.00245	2.45E-03
	2%	9%	32	0.00344	3.44E-03
	5%	3%	308	0.00035	3.58E-04
	5%	6%	50	0.00220	2.20E-03
	5%	9%	70	0.00157	1.57E-03
	8%	3%	130	0.00084	8.48E-04
	8%	6%	25	0.00441	4.41E-03
	8%	9%	23	0.00479	4.79E-03

NOTA

La Tabla 49, evidencia que la permeabilidad k varía ampliamente según la combinación NRG–EC, con tiempos entre 23 s y 308 s y valores de k entre 3.58E-04 y 4.79E-03 m/s: con NRG 2% el k aumenta al incrementar la EC, sube a 2.20E-03 (50 s; EC 6%) y baja a 1.57E-03 (70 s; EC 9%); y con NRG 8% se registra 8.48E-04 (130 s; EC 3%), incrementando a 4.41E-03 (25 s; EC 6%) y alcanzando el máximo con 4.79E-03 (23 s; EC 9%).





NOTA

El gráfico “k” vs tiempo refuerza esta relación inversa, mostrando que a menor tiempo se observan mayores permeabilidades, destacando los puntos de 8%+9% (23 s; 4.79E-03) y 8%+6% (25 s; 4.41E-03) como los más altos, y el de 5%+3% (308 s; 3.58E-04) como el más bajo.

Figura 38 — Evolución del coeficiente de permeabilidad C-01

b) Calicata C-02

Tabla 50 — Resultados de los valores de la permeabilidad, C-02

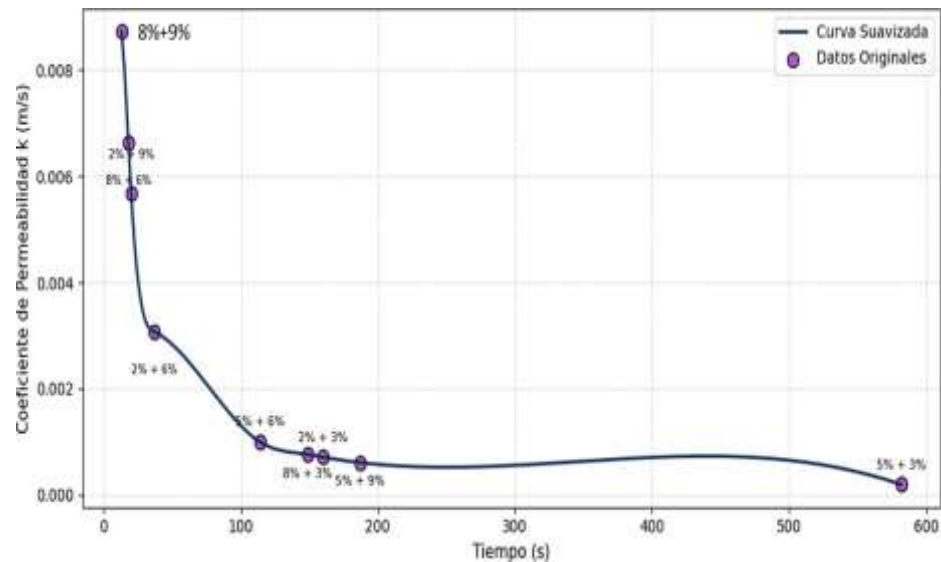
Calicata	NRG (%)	EC (%)	Tiempo (s)	k (m/s)	Notación
C-02	2%	3%	160	0.00071	7.10E-04
	2%	6%	37	0.00310	3.10E-03
	2%	9%	20	0.000568	5.68E-04
	5%	3%	582	0.000194	1.94E-04
	5%	6%	114	0.000996	9.96E-04
	5%	9%	187	0.000607	6.07E-04
	8%	3%	149	0.000760	7.60E-04
	8%	6%	18	0.00631	6.31E-03
	8%	9%	13	0.00870	8.70E-03

NOTA

La Tabla 38, evidencia una variación marcada de la permeabilidad k según la combinación NRG-EC, con tiempos entre 13 s y 582 s y valores de k entre 1.94E-04 y 8.70E-03 m/s: con NRG 2% se obtiene 7.10E-04 (160 s; EC 3%), luego aumento a 3.10E-03 (37 s; EC 6%) y vuelve a disminuir a 5.68E-04 (20 s; EC 9%); con NRG 5% se registra el mínimo con 1.94E-04 (582 s; EC 3%), y valores de 9.96E-04 (114 s; EC 6%) y 6.07E-04 (187 s, EC 9%); y con NRG 8% se observa 7.60E-



04 (149 s; EC 3%), incrementando fuertemente a $6.31E-03$ (18 s; EC 6%) y alcanzando el máximo con $8.70E-03$ (13 s; EC 9%), lo cual el gráfico k vs tiempo refuerza al mostrar mayores permeabilidades en los menores tiempos, destacando 8%+9% (13 s; $8.70E-03$) y 8%+6% (18 s; $6.31E-03$) frente al valor mínimo 5%+3% (582 s; $1.94E-04$).



NOTA

El gráfico "k" vs tiempo (C-02) muestra una relación inversa clara: los mayores coeficientes de permeabilidad se concentran en los menores tiempos, destacando 8%+9% con 13 s y $k = 8.70E-03$, seguido de 8%+6% con 18 s y $k = 6.31E-03$; en niveles intermedios aparece 2%+6% con 37 s y $k = 3.10E-03$, mientras que los valores más bajos se ubican en tiempos altos, principalmente 5%+3% con 582 s y el mínimo $k = 1.94E-04$, además de 5%+6% con 114 s y $9.96E-04$, y valores moderados como 2%+3% (160 s; $7.10E-04$), 8%+3% (149s; $7.60E-04$), 5%+9% (187 s; $6.07E-04$) y 2%+9% (20 s; $5.68E-04$).

Figura 39 — Evolución del coeficiente de permeabilidad C-02



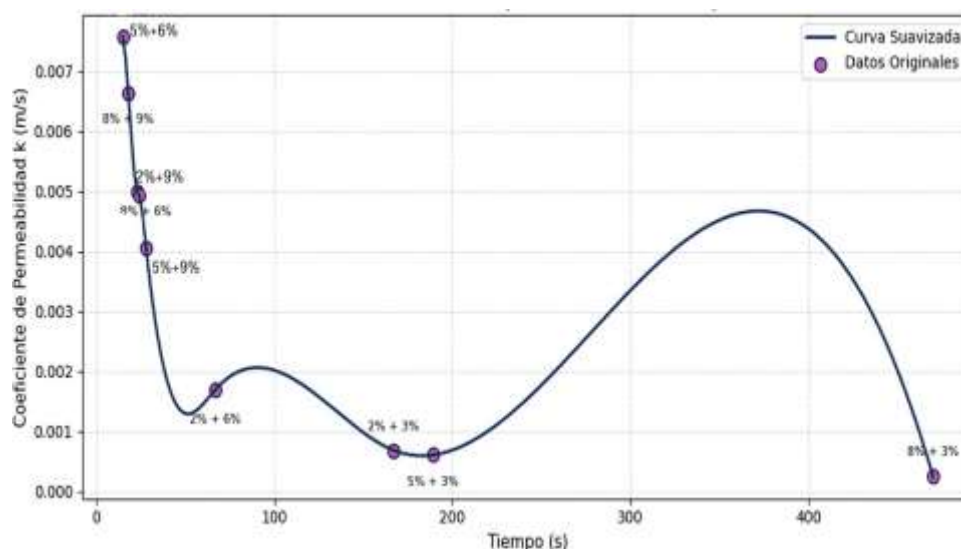
c) Calicata C-03

Tabla 51 — Resultados de los valores de la permeabilidad, C-03

Calicata	NRG (%)	EC (%)	Tiempo (s)	k (m/s)	Notación
C-03	2%	3%	167	0.000680	6.80E-04
	2%	6%	67	0.00169	1.69E-03
	2%	9%	23	0.00498	4.98E-03
	5%	3%	189	0.000601	6.01E-04
	5%	6%	15	0.00757	7.57E-03
	5%	9%	24	0.00494	4.94E-03
	8%	3%	470	0.000242	2.42E-04
	8%	6%	28	0.00405	4.05E-03
	8%	9%	18	0.00631	6.31E-03

NOTA

La Tabla 51, muestra que la permeabilidad k presenta alta variabilidad según la combinación NRG-EC, con tiempos entre 15 s y 470 s y valores de k entre 2.42E-04 y 7.57E-03 m/s: con NRG 2% el k aumenta al subir la EC, pasando de 6.80E-04 (167 s; EC 3%) a 1.69E-03 (67 s; EC 6%) y 4.98E-03 (23 s; EC 9%); con NRG 5% se obtuvo 6.01E-04 (189 s; EC 3%), luego se alcanzó el máximo con 7.57E-03 (15 s; EC 6%) y se mantiene alto con 4.94E-03 (24 s; EC 9%); y con NRG 8% se registra el mínimo con 2.42E-04 (470 s; EC 3%), aumentando a 4.05E-03 (28 s; EC 6%) y 6.31E-03 (18 s; EC 9%), evidenciando además que los mayores k se asocian a los menores tiempos (por ejemplo 15 s-7.57E-03 y 18 s-6.31E-03).



NOTA

El gráfico k vs tiempo (C-03) muestra que la permeabilidad aumenta cuando el tiempo disminuye, destacando el máximo en 5%+6% (15 s; 7.57E-03) y valores altos en 8%+9% (18 s; 6.31E-03), 2%+9% (23 s; 4.98E-03), 5%+9% (24 s; 4.94E-03) y 8%+6% (28 s; 4.05E-03); en tiempos mayores, los valores bajan hasta el mínimo en 8%+3% (470 s; 2.42E-04), con un rango total de 2.42E-04 a 7.57E-03 m/s.

Figura 40 — Evolución del coeficiente de permeabilidad vs tiempo C-03

d) Calicata C-04

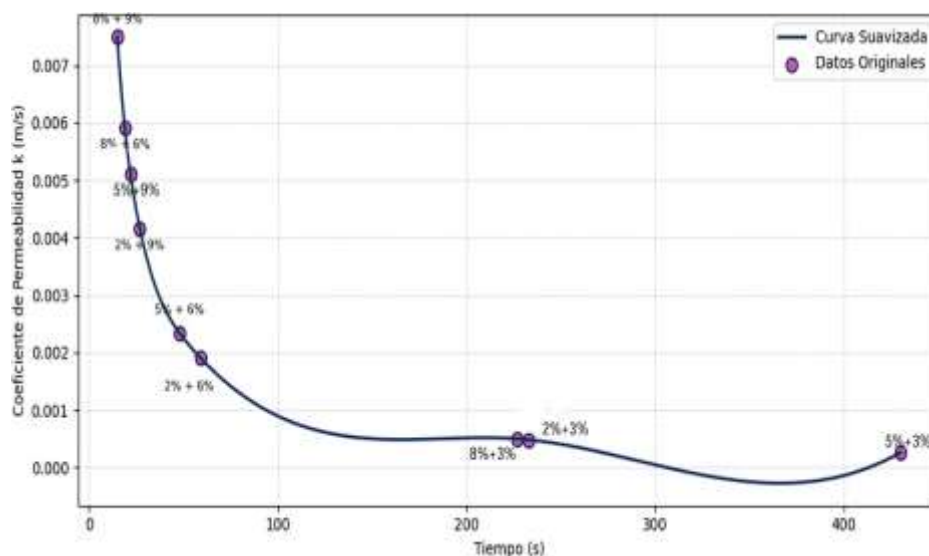
Tabla 52 — Resultados de los valores de la permeabilidad, C-04

Calicata	NRG (%)	EC (%)	Tiempo (s)	k (m/s)	Notación
C-04	2%	3%	233	0.000483	4.83E-04
	2%	6%	59	0.00190	1.90E-03
	2%	9%	27	0.00420	4.20E-03
	5%	3%	430	0.000261	2.61E-04
	5%	6%	48	0.00234	2.34E-03
	5%	9%	22	0.00511	5.11E-03
	8%	3%	227	0.000500	5.00E-04
	8%	6%	19	0.00592	5.92E-03
	8%	9%	17	0.00661	6.61E-03

NOTA

La Tabla 52, muestra que la permeabilidad k varía entre 2.61E-04 y 6.61E-03 m/s, con tiempos de 17 s a 430 s: con NRG 2% el k aumenta de 4.83E-04 (233 s; EC 3%) a 1.90E-03 (59 s; EC 6%) y 4.20E-03 (27 s; EC 9%); con NRG 5% se obtuvo el mínimo 2.61E-04 (430 s; EC 3%) y luego subió a 2.34E-03 (48 s) y 5.11E-03 (22 s); y con NRG 8% pasa de 5.00E-04 (227 s) a 5.92E-03 (19 s) y alcanza el máximo 6.61E-03 (17 s; EC 9%).





NOTA

El gráfico "k" vs tiempo (C-04) confirma que las mayores permeabilidades se presentan en los menores tiempos, destacando 8%+9% (17 s; 6.61E-03) y 8%+6% (19 s; 5.92E-03), seguidos por 5%+9% (22 s; 5.11E-03) y 2%+9% (27 s; 4.20E-03); en la zona media aparecen 5%+6% (48 s; 2.34E-03) y 2%+6% (59 s; 1.90E-03), mientras que a tiempos altos la permeabilidad disminuye a 8%+3% (227 s; 5.00E-04), 2%+3% (233 s; 4.83E-04) y el mínimo en 5%+3% (430 s; 2.61E-04), con un rango total de 2.61E-04 a 6.61E-03 m/s.

Figura 41 — Evolución del coeficiente de permeabilidad C-04

5.1.6.2 Variación del coeficiente de permeabilidad

Tabla 53 — Valores mín, máx del coef. de permeabilidad "k (m/s)" por calicata

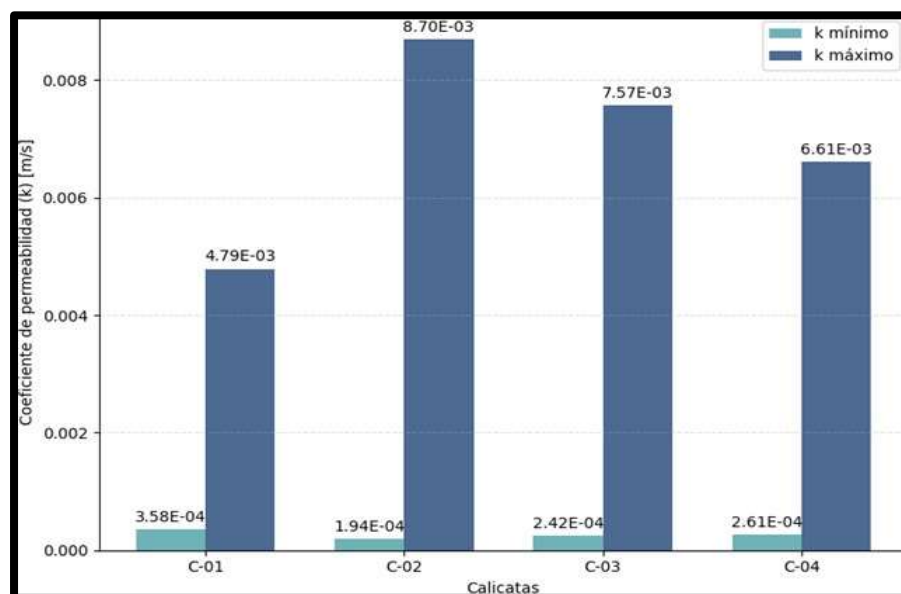
Calicata	k min (m/s)	k máx (m/s)	Rango de permeabilidad
C-01	3.58E-04	4.79E-03	Baja a muy alta
C-02	1.94E-04	8.70E-03	Muy baja a muy alta
C-03	2.42E-04	7.57E-03	Muy baja a muy alta
C-04	2.61E-04	6.61E-03	Muy baja a muy alta

NOTA

La Tabla 53, resume que la permeabilidad k (m/s) presenta rangos amplios por calicata: en C-01 el k mín = 3.58E-04 y el k máx = 4.79E-



03, clasificándose el rango como “baja a muy alta”; en C-02 se registro el mínimo más bajo con $k_{\text{mín}} = 1.94\text{E-}04$ y el máximo más alto con $k_{\text{máx}} = 8.70\text{E-}03$, con rango “muy baja a muy alta”; en C-03 el $k_{\text{mín}} = 2.42\text{E-}04$ y $k_{\text{máx}} = 7.57\text{E-}03$, también “muy baja a muy alta”; y en C-04 el $k_{\text{mín}} = 2.61\text{E-}04$ y $k_{\text{máx}} = 6.61\text{E-}03$, manteniendo igualmente el rango “muy baja a muy alta”, confirmando que la mayor variabilidad extrema se presenta en C-02 ($1.94\text{E-}04$ a $8.70\text{E-}03$).



NOTA

El gráfico comparativo de $k_{\text{mínimo}}$ y $k_{\text{máximo}}$ por calicata confirma que C-02 presenta los extremos más marcados, con $k_{\text{mín}} = 1.94\text{E-}04$ y $k_{\text{máx}} = 8.70\text{E-}03$, seguido de C-03 con $2.42\text{E-}04$ y $7.57\text{E-}03$, y C-04 con $2.61\text{E-}04$ y $6.61\text{E-}03$; en cambio, C-01 muestra valores relativamente menores con $k_{\text{mín}} = 3.58\text{E-}04$ y $k_{\text{máx}} = 4.79\text{E-}03$, evidenciando en conjunto rangos que van desde el orden de 10^{-4} (mínimos) hasta 10^{-3} (máximos).

Figura 42 — Comparación de los valores de “k” entre calicatas

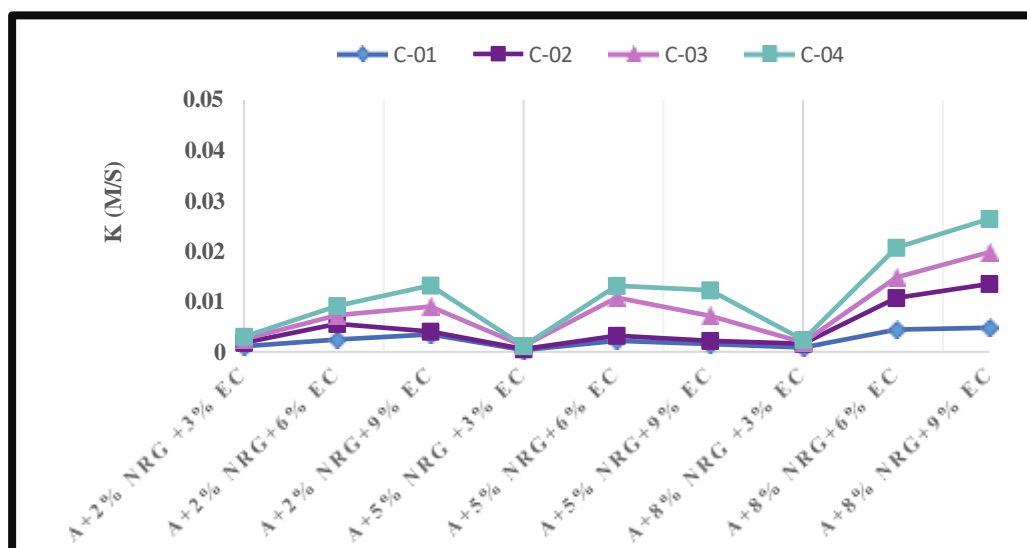
5.1.6.3 Comparación de los coeficientes de permeabilidad entre calicatas

Tabla 54 — Evaluación del Coeficiente de permeabilidad por calicata

Resumen de los valores de Coeficiente de permeabilidad "k (m/s)"									
Calicata	NRG	Emulsión catiónica			Calicata	NRG	Emulsión catiónica		
		3%	6%	9%			3%	6%	9%
C-01	2%	1.12 E-03	2.45 E-03	3.44 E-03	C-02	2%	7.10 E-04	3.1 E-03	5.68 E-04
	5%	3.58 E-04	2.20 E-03	1.57 E-03		5%	1.94 E-04	9.96 E-04	6.07 E-04
	8%	8.48 E-04	4.41 E-03	4.79 E-03		8%	7.6 E-04	6.31 E-03	8.7 E-03
C-03	2%	6.80 E-04	1.69 E-03	4.98 E-03	C-04	2%	4.83 E-04	1.9 E-03	4.2 E-03
	5%	6.01 E-04	7.57 E-03	4.94 E-03		5%	2.61 E-04	2.34 E-03	5.11 E-03
	8%	2.42 E-04	4.05 E-03	6.31 E-03		8%	5.0 E-04	5.92 E-03	6.61 E-03

NOTA

La Tabla 54, muestra que la permeabilidad k (m/s) varía del orden E-04 a E-03, con el mínimo global en C-02: 1.94E-04 (NRG 5% + EC 3%) y el máximo global en C-02: 8.7E-03 (NRG 8% + EC 9%); por calicata, los rangos son C-01: 3.58E-04 a 4.79E-03, C-03: 2.42E-04 a 7.57E-03 (pico en NRG 5% + EC 6%) y C-04: 2.61E-04 a 6.61E-03, confirmando que mayores contenidos de EC y NRG 8% tienden a asociarse a valores más altos de "k".



NOTA

El gráfico comparativo de k (m/s) por tratamientos muestra que la permeabilidad aumenta notablemente en las combinaciones con NRG 8%, especialmente con EC 6% y 9%, destacando los valores máximos en C-02 (8%+9% = 8.7E-03), C-03 (8%+9% = 6.31E-03) y C-04 (8%+9% = 6.61E-03);



en contraste, los valores más bajos se observan en NRG 5% + EC 3%, con el mínimo global en C-02 = 1.94E-04 y mínimos también en C-03 = 6.01E-04 y C-04 = 2.61E-04, evidenciando que el rango general se extiende desde 1.94E-04 hasta 8.7E-03 m/s.

Figura 43 — Grafico comparativo de “k (m/s)”, C1, C2, C3 y C4

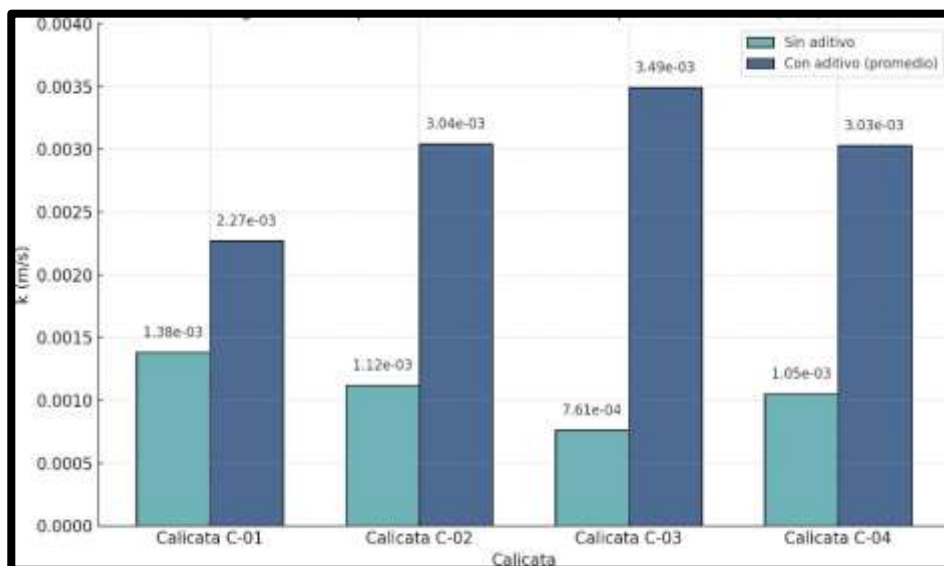
a) Resumen de Resultados desarrollados

Tabla 55 — Características físicas y mecánicas del afirmado + aditivos por

Calicata	Resumen de la características físicas y mecánicas del afirmado + aditivos (valores más altos)								
	Muestra	COH %	MDS (gr/cm ³)	% de expansión	CBR		Permeabilidad		
					95%	100%	(t)	K (cm/seg)	Not. Exp.
C-01	Afir + 5%NEG + 9%EC	5.60	2.33	0.44	48.31	59.87	70	0.00157	1.57 E-03
C-02	Afir + 2%NEG + 6%EC	4.20	2.35	0.79	52.29	65.59	37	0.00310	3.10 E-03
C-03	Afir + 2%NEG + 9%EC	6.72	2.27	0.50	48.01	57.66	23	0.00498	4.98 E-03
C-04	Afir + 2%NEG + 6%EC	5.44	2.31	0.74	48.53	59.24	59	0.00190	1.90 E-03

NOTA
 La Tabla 55, sintetiza las combinaciones con mejores valores por calicata y evidencia diferencias en compactación, expansión, resistencia y permeabilidad: en C-01 (Afir + 5% NRG + 9% EC) se registró COH = 5.60%, MDS = 2.33 gr/cm³, expansión = 0.44, CBR = 48.31 (95%) y 59.87 (100%), con t = 308 y k = 0.000358 cm/seg (3.58E-04); en C-02 (Afir + 2% NRG + 6% EC) se obtuvo COH = 4.20%, MDS = 2.35 gr/cm³, expansión = 0.79, CBR = 52.29 (95%) y el máximo 65.59 (100%), con t = 582 y el mínimo k = 0.000194 cm/seg (1.94E-04); en C-03 (Afir + 2% NRG + 9% EC) se tuvo COH = 6.72%, MDS = 2.27 gr/cm³, expansión = 0.50, CBR = 48.01 (95%) y 57.66 (100%), con t = 470 y k = 0.000242 cm/seg (2.42E- 04); y en C-04 (Afir + 2% NRG + 6% EC) se registra COH = 5.44%, MDS = 2.31 gr/cm³, expansión = 0.74, CBR = 48.53 (95%) y 59.24 (100%), con t = 430 y k = 0.000261 cm/seg (2.61E-04), destacando que C-02 presento el mayor CBR 100% (65.59) y la menor permeabilidad (1.94E-04), mientras C-01 reporta la menor expansión (0.44).





NOTA

Se observa una disminución significativa del coeficiente de permeabilidad en todas las calicatas tras la incorporación de aditivos (NRG + EC), en comparación con el suelo sin tratar. Esta reducción confirma el efecto impermeabilizante de la mezcla utilizada, lo cual valida su eficacia como alternativa de mejora en la afirmación de vías rurales. Los valores promedio con aditivo se mantienen por debajo del umbral original, reforzando la coherencia del comportamiento hidráulico observado en los ensayos individuales.

Figura 44 — Comparación de coeficiente de permeabilidad: sin aditivo vs con aditivo

Tabla 56 — Cuadro de resumen con los valores óptimos por calicata

Calicata	Resumen de la características físicas y mecánicas: Afirmado + aditivos (valores óptimos)								
	Muestra	COH %	MDS (gr/cm3)	% de expansión	CBR		Permeabilidad		
					95%	100%	(t)	“k” (cm/seg)	Not. Exp.
C-01	Afir + 0%NRG + 0%EC	4.08	2.26	0.829	33.9	41.65	100.00	0.00137	1.38 E-03
	Afir + 5% NRG + 9%EC	5.6	2.33	0.44	48.31	59.87	70.00	0.00157	1.57 E-03
C-02	Afir + 0% NRG + 0%EC	3.19	2.31	1.025	46.1	53.87	113.20	0.00111	1.12 E-03
	Afir + 2% NRG + 6%EC	4.2	2.35	0.79	52.29	65.59	37.00	0.0031	3.10 E-03
C-03	Afir + 0% NRG + 0%EC	5.21	2.21	0.872	41.8	48.53	189.00	0.00076	7.61 E-04
	Afir + 2% NRG + 9%EC	6.72	2.27	0.5	48.01	57.66	23.00	0.00498	4.98 E-03
C-04	Afir + 0% NRG + 0%EC	4.43	2.27	0.959	43.3	50.1	142.00	0.00104	1.05E-03
	Afir + 2% NRG + 6%EC	5.44	2.31	0.74	48.53	59.24	59.00	0.0019	1.90 E-03



NOTA

La Tabla 56, sintetiza las combinaciones con mejores valores óptimos por calicata y evidencia diferencias en compactación con respecto al afirmado natural y el afirmado más aditivo, también se muestra detalladamente los valores del coeficiente de permeabilidad para cada valor óptimo hallado, se muestran los valores del % de expansión, MDS, CBR y el coeficiente de permeabilidad.

5.2 Contrastación de hipótesis

5.2.1 Contrastación de hipótesis general

En la presente investigación se empleó un enfoque estadístico inferencial acorde con el nivel explicativo y el diseño cuasi experimental del estudio. El análisis se realizó mediante el análisis de varianza (ANOVA) de dos factores, con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, con el propósito de evaluar la influencia del (NRG) y la (EC) sobre las propiedades físicas y mecánicas del afirmado. El procesamiento y análisis estadístico de los datos se efectuó mediante software especializado, como Microsoft Excel y Python (statsmodels, scipy), lo que permitió contrastar las hipótesis planteadas y garantizar la consistencia de los resultados obtenidos.

H₁: La adición de neumático reciclado granular y emulsión catiónica influye positivamente en la estabilización e impermeabilización de la capa de afirmado en vía vecinal AP-650, Abancay - Apurímac, 2025.

H₀: La adición de neumático reciclado granular y emulsión catiónica no influye positivamente en la estabilización e impermeabilización de la capa de afirmado en vía vecinal AP-650, Abancay - Apurímac, 2025.

a) Prueba de Normalidad

Tabla 57 — Prueba de normalidad

Pruebas de normalidad						
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
MDS	0.146	11	0.200*	0.958	11	0.745
% de expansión)	0.221	11	0.118	0.901	11	0.176
CBR	0.248	11	0.052	0.884	11	0.51
Permeabilidad "k"	0.312	11	0.006	0.793	11	0.012

*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.
a. Corrección de significación de Lilliefors

NOTA

En la Tabla 57, (Prueba de normalidad), considerando que con $gl = 11$ es más apropiado interpretar principalmente Shapiro–Wilk, se observo que MDS cumple el supuesto de normalidad con $W = 0.958$ y $Sig. = 0.745$ (y en Kolmogorov– Smirnov 0.146 , $Sig. = 0.200^*$); el % de expansión también presenta normalidad con $W = 0.901$ y $Sig. = 0.176$ (K–S 0.221 , $Sig. = 0.118$); el CBR mantiene normalidad porque $W = 0.884$ y $Sig. = 0.110$, aunque en K–S es cercano al umbral con $Sig. = 0.052$ (estadístico 0.248); en cambio, la permeabilidad k no cumple normalidad, ya que tanto K–S = 0.312 , $Sig. = 0.006$ como Shapiro–Wilk $W = 0.793$, $Sig. = 0.012$ son < 0.05 , por lo que para esta variable se recomienda el uso de métodos no paramétricos si se requiere contrastación de hipótesis.

5.2.2 Contrastación de hipótesis específica 01

Hipótesis específica 1

H₁: La adición de neumático reciclado granular y emulsión catiónica influye positivamente en la máxima densidad seca del afirmado en la estabilización e impermeabilización en vía vecinal AP-650, Abancay - Apurímac, 2025.

H₀: La adición de neumático reciclado granular y emulsión catiónica no influye positivamente en la máxima densidad seca del afirmado en la estabilización e impermeabilización en vía vecinal AP-650, Abancay – Apurímac, 2025.

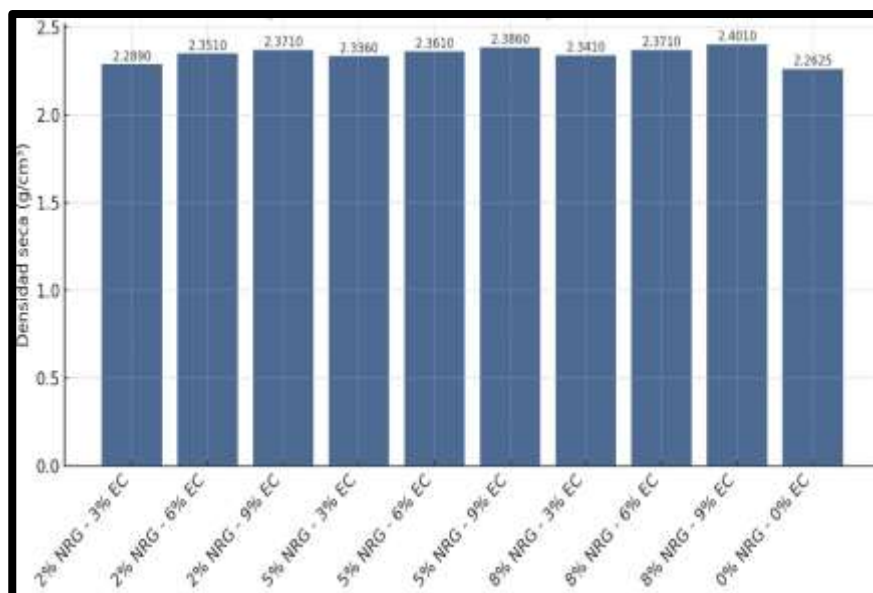


Tabla 58 — Análisis estadístico ANOVA del afirmado +%NRG + %EC para la MDS

ANOVA				
Fuente	Suma de cuadrados (SS)	Grados de libertad (df)	F	p-valor
NRG	0.009756	3	28.04	0.0038
EC	0.014166	3	40.71	0.0019
Residual	0.000464	4	-	-

NOTA

La Tabla 58, (ANOVA para la MDS) muestra que tanto el porcentaje de NRG como el porcentaje de EC influyen significativamente en la máxima densidad seca, ya que para NRG se obtiene $SS = 0.009756$, $df = 3$, $F = 28.04$ y $p\text{-valor} = 0.0038$, y para EC se registra $SS = 0.014166$, $df = 3$, $F = 40.71$ y $p\text{-valor} = 0.0019$, ambos menores a 0.05, mientras que el error presenta SS residual = 0.000464 con $df = 4$, por lo que se acepta la hipótesis alternativa (H_1) en ambos factores, concluyendo que existen diferencias estadísticamente significativas en la MDS entre los tratamientos evaluados con NRG y con EC, siendo el efecto de EC mayor que el de NRG al presentar un F más alto ($40.71 > 28.04$) y un SS mayor ($0.014166 > 0.009756$).



NOTA

En la figura se puede apreciar los diferentes resultados obtenidos del afirmado



como también de la combinación del afirmado más aditivos, el orden se encuentra en función a los porcentajes, en la abscisa se encuentra las combinaciones de % NRG y % EC y en las ordenadas se encuentra los valores de la máxima densidad seca que cada combinación alcanza.

Figura 45 — Comparación estadística de la MDS según tratamiento

Tabla 59 — Efecto de NRG y EC sobre la máxima densidad seca (MDS)

% NRG	% EC				ANOVA	Resultado
	0 %	3 %	6 %	9 %		
0 %	—	—	—	—	—	Control
2 %	F	F	F	F	Significativo	Favorable
5 %	F	F	F	F	Significativo	Favorable
8 %	NF	NF	NF	NF	Significativo	No favorable

NOTA
 En la máxima densidad seca (MDS), el ANOVA evidenció influencia estadísticamente significativa del NRG y la EC; sin embargo, el comportamiento favorable se concentró en las dosificaciones de 2% y 5% de NRG, mientras que el 8% se clasificó como no favorable.
 *F = Favorable; NF = No favorable; C = control.

Hipótesis verificada (Objetivo específico 01)

La hipótesis verificada para el objetivo específico 01 confirma que la adición de neumático reciclado granular (NRG) y emulsión catiónica (EC) sí influye en la máxima densidad seca (MDS) del afirmado. Según el ANOVA (Tabla 57), tanto NRG como EC presentan efectos estadísticamente significativos sobre la MDS, con p-valor = 0.0038 para NRG y p-valor = 0.0019 para EC, ambos < 0.05; por ello, se rechaza la hipótesis nula (H₀) (“no influye”) y se acepta la hipótesis alternativa (H₁) (“sí influye”). En términos de desempeño, la mejor combinación reportada fue Afirmado + 5% NRG + 9% EC (C-02) con MDS = 2.386 g/cm³, superando al afirmado sin aditivo (2.2625 g/cm³), lo cual evidencia diferencias entre promedios atribuibles al tratamiento, asociadas a una mejor integración del material, relleno de vacíos y mayor compactación, incrementando la MDS y, en consecuencia, favoreciendo la estabilidad estructural del afirmado.



5.2.3 Contrastación de hipótesis específica 02

Hipótesis específica 2

H₁: La adición de neumático reciclado granular y emulsión catiónica influye positivamente en el porcentaje de expansión del afirmado en la estabilización e impermeabilización en vía vecinal AP-650, Abancay, Apurímac - 2025.

H₀: La adición de neumático reciclado granular y emulsión catiónica no influye positivamente en el porcentaje de expansión del afirmado en la estabilización e impermeabilización en vía vecinal AP-650, Abancay, Apurímac - 2025.

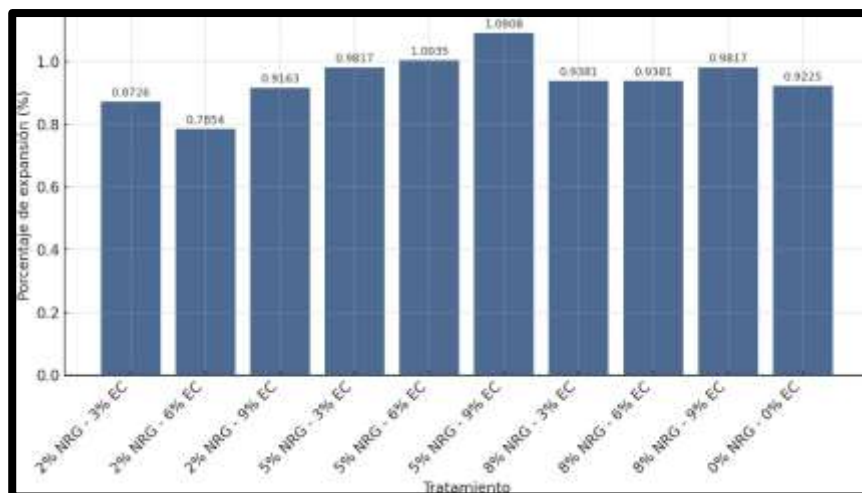
Tabla 60 — Análisis estadístico ANOVA del afirmado +%NRG +%EC - % de expansión

ANOVA				
Fuente	Suma de cuadrados (SS)	Grados de libertad (df)	F	p-valor
NRG	0.042659	3	12.81	0.0161
EC	0.012847	3	3.86	0.1125
Residual	0.004440	4	-	-

NOTA

La Tabla 60, (ANOVA para % de expansión) evidencia que el porcentaje de NRG tiene un efecto estadísticamente significativo sobre el % de expansión, ya que presenta SS = 0.042659, df = 3, F = 12.81 y p-valor = 0.0161 (< 0.05); en cambio, la emulsión catiónica (EC) no muestra efecto significativo, debido a que registra SS = 0.012847, df = 3, F = 3.86 y p-valor = 0.1125 (> 0.05), con un residual SS = 0.004440 y df = 4. En consecuencia, para el NRG se rechaza H₀ y se acepta H₁ (sí influye en la expansión), mientras que para la EC se acepta H₀ y se rechaza H₁ (no influye significativamente en la expansión) al nivel de significancia $\alpha = 0.05$.





NOTA

En la figura se puede apreciar los diferentes resultados obtenidos del afirmado como también de la combinación del afirmado más aditivos, el orden se encuentra de mayor a menor según los porcentajes, en la abscisa se encuentra las combinaciones de % NRG y % EC y en las ordenadas se encuentra los valores de los porcentajes de expansión que cada combinación alcanza.

Figura 46 — Comparación estadística del porcentaje de expansión según tratamiento

Tabla 61 — Efecto de NRG y EC el porcentaje de expansión (%)

% NRG	% EC				ANOVA	Resultado
	0 %	3 %	6 %	9 %		
0 %	—	C	C	C	—	Control
2 %	F	F	F	F	Significativo (NRG)	Favorable
5 %	F	F	F	F	Significativo (NRG)	Favorable
8 %	F	F	F	F	Significativo (NRG)	Favorable

NOTA

En el porcentaje de expansión, el análisis ANOVA evidenció que el factor estadísticamente significativo corresponde al (NRG), mientras que la (EC) no presenta influencia significativa; por ello, en la síntesis del cuadro de doble entrada se consignan como favorables las combinaciones que incorporan NRG, independientemente del porcentaje de EC.

*F = Favorable; NF = No favorable; C = control.



Hipótesis verificada (Objetivo específico 02)

La adición del (NRG) y (EC) influye en el porcentaje de expansión del afirmado, sin embargo, el efecto significativo se atribuye principalmente al NRG. Según el ANOVA (Tabla 59), el factor NRG presenta significancia estadística con p-valor = 0.0161 (< 0.05), por lo que se rechaza H_0 y se acepta H_1 respecto a la influencia del NRG en la expansión; en cambio, la EC no resulta significativa (p-valor = 0.1125 > 0.05), por lo que para este factor se acepta H_0 y se rechaza H_1 . En términos de desempeño, la mejor combinación reportada fue Afirmado + 2% NRG + 6% EC (C-02) con 0.7854% de expansión, reduciendo el valor frente al afirmado sin aditivo de 1.0253%, lo que evidencia una mejora en la estabilidad volumétrica; este comportamiento se explica porque el NRG actúa como un componente flexible, reduciendo la tendencia a la hinchazón y deformación asociada a la humedad.

En conclusión, para el objetivo específico 02 se acepta la hipótesis alternativa (H_1) en cuanto a la influencia positiva sobre la expansión, precisando que la significancia estadística está asociada al NRG, mientras que la EC no muestra efecto significativo al nivel $\alpha = 0.05$.

5.2.4 Contrastación de hipótesis específica 03

Hipótesis específica 3

H_1 : La adición de neumático reciclado granular y emulsión catiónica influye en el CBR del afirmado en la estabilización e impermeabilización en vía vecinal AP-650, Abancay - Apurímac, 2025.

H_0 : La adición de neumático reciclado granular y emulsión catiónica no influye en el CBR del afirmado en la estabilización e impermeabilización en vía vecinal AP-650, Abancay - Apurímac, 2025.

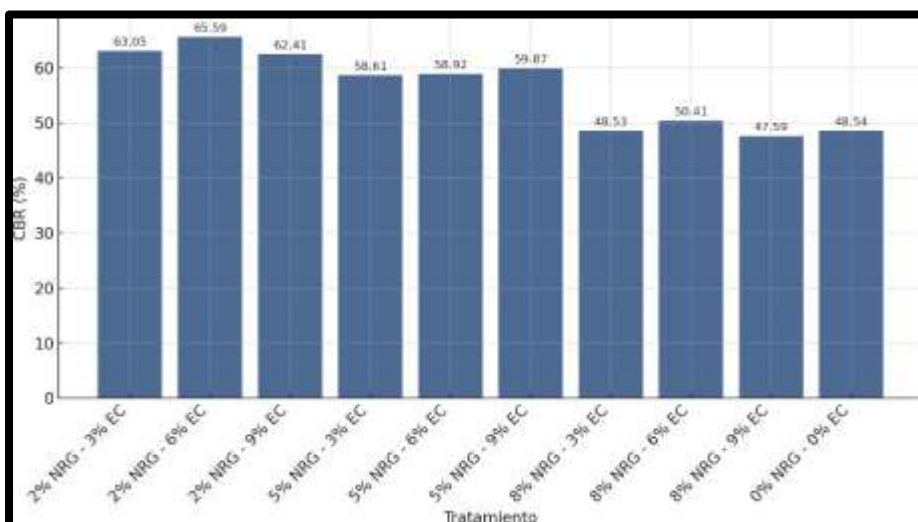


Tabla 62 — Análisis estadístico ANOVA del afirmado +%NRG + %EC para el CBR

ANOVA				
Fuente	Suma de cuadrados (SS)	Grados de libertad (df)	F	p-valor
NRG	414.66	3	104.07	0.0003
EC	73.18	3	18.37	0.0084
Residual	5.31	4	-	-

NOTA

La Tabla 62, (ANOVA para el CBR) indica que tanto el porcentaje de NRG como el porcentaje de EC influyen de manera estadísticamente significativa en el CBR del afirmado, ya que para NRG se obtiene $SS = 414.66$, $df = 3$, $F = 104.07$ y $p\text{-valor} = 0.0003 (< 0.05)$, y para EC se registra $SS = 73.18$, $df = 3$, $F = 18.37$ y $p\text{-valor} = 0.0084 (< 0.05)$, con un residual $SS = 5.31$ y $df = 4$; por ello, para ambos factores se rechaza H_0 y se acepta H_1 , concluyéndose que existen diferencias significativas en el CBR entre los tratamientos evaluados, siendo el efecto de NRG mayor que el de EC al presentar un F más alto ($104.07 > 18.37$) y una mayor contribución a la variabilidad ($SS 414.66 > 73.18$).



NOTA

En la figura se puede apreciar los diferentes resultados obtenidos del afirmado como también de la combinación del afirmado más aditivos, el orden se encuentra de mayor a menor, en la abscisa se encuentra las combinaciones de % NRG y % EC y en las ordenadas se encuentra los



valores del CBR de cada combinación alcanzada.

Figura 47 — Comparación estadística del CBR según tratamiento

Tabla 63 — Efecto de NRG y EC sobre el índice CBR

% NRG	% EC				ANOVA	Resultado
	0 %	3 %	6 %	9 %		
0 %	—	C	C	C	—	Control
2 %	F	F	F	F	Significativo (NRG y EC)	Favorable
5 %	F	F	F	F	Significativo (NRG y EC)	Favorable
8 %	F	F	F	F	Significativo (NRG y EC)	Favorable

NOTA

Para el índice CBR, el análisis ANOVA evidenció que tanto el (NRG) como la (EC) presentan influencia estadísticamente significativa, razón por la cual se consigna “Significativo (NRG y EC)” en la síntesis del cuadro de doble entrada, reflejando la mejora de la capacidad portante del afirmado estabilizado.

*F = Favorable; NF = No favorable; C = control.

Hipótesis verificada (Objetivo específico 03)

La adición de neumático reciclado granular (NRG) y emulsión catiónica (EC) sí influye en el CBR del afirmado. El ANOVA (Tabla 63) evidencia que ambos factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre el CBR, ya que para NRG se obtuvo $F = 104.07$ con $p\text{-valor} = 0.0003 (< 0.05)$ y para EC $F = 18.37$ con $p\text{-valor} = 0.0084 (< 0.05)$; en consecuencia, se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis alternativa (H_1), confirmando diferencias significativas entre los tratamientos evaluados. Además, los valores de SS refuerzan la mayor contribución del NRG ($SS = 414.66$) frente a EC ($SS = 73.18$), indicando que el NRG explica una porción más alta de la variabilidad del CBR. La mejor combinación reportada fue Afirmado + 2% NRG + 6% EC (C-02) con $CBR = 65.59\%$, superando el afirmado sin aditivo (53.87%) en 11.72 puntos porcentuales, lo cual representa una mejora relevante de la capacidad portante del afirmado.

5.2.5 Contrastación de hipótesis específica 04

Hipótesis específica 4



H₁: La adición de neumático reciclado granular y emulsión catiónica influye en la permeabilidad del afirmado en la estabilización e impermeabilización en vía vecinal AP-650, Abancay - Apurímac, 2025.

H₀: La adición de neumático reciclado granular y emulsión catiónica no influye en la permeabilidad del afirmado en la estabilización e impermeabilización en vía vecinal AP-650, Abancay - Apurímac, 2025.

a) Selección de la prueba estadística

Debido a que la variable permeabilidad no cumplió el supuesto de normalidad, la contrastación de la hipótesis se realizó mediante la **prueba no paramétrica de Friedman**, adecuada para comparar tres o más tratamientos relacionados, con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$.

Tabla 64 — Prueba de Friedman para la permeabilidad (k) - % NRG

Parámetro	Valor
Número de tratamientos (k)	3
Número de bloques (n)	12
Grados de libertad	2
Estadístico χ^2 (Friedman)	8.667
p-valor	0.0131
NOTA	
El análisis mediante la prueba no paramétrica de Friedman evidencia diferencias estadísticamente significativas en la permeabilidad del afirmado en función del porcentaje de NRG, dado que el p-valor obtenido (0.0131) es menor que el nivel de significancia $\alpha = 0.05$.	

H₀: Se rechaza $p < 0.05$, El NRG influye significativamente en la permeabilidad.

Tabla 65 — Prueba de Friedman para la permeabilidad (k) - %EC

Parámetro	Valor
Número de tratamientos (k)	3
Número de bloques (n)	12
Grados de libertad	2
Estadístico χ^2 (Friedman)	15.500



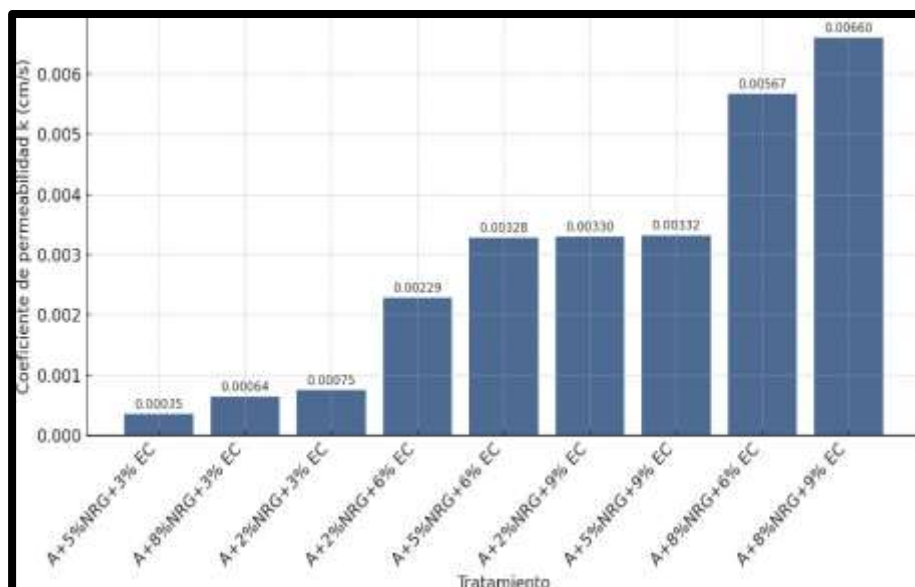
p-valor	0.00043
NOTA	
El análisis mediante la prueba no paramétrica de Friedman evidencia diferencias estadísticamente significativas en la permeabilidad del afirmado en función del porcentaje de emulsión catiónica, dado que el p-valor obtenido (0.00043) es menor que el nivel de significancia $\alpha = 0.05$.	

- **H₀:** Se rechaza $p < 0.05$, La emulsión catiónica influye significativamente en la permeabilidad.

Hipótesis verificada (Objetivo específico 04)

En función de los resultados obtenidos, conforme a lo señalado por (Siegel, y otros, 1988), se rechaza la hipótesis nula (H₀) y se acepta la hipótesis alternativa (H₁), evidenciándose que la adición de NRG y emulsión catiónica influye significativamente en la permeabilidad del afirmado; sin embargo, dicha influencia no resultó favorable bajo las condiciones del estudio.

En ese sentido, **se ratifica** el uso de la prueba no paramétrica de Friedman para la contrastación de esta hipótesis, al tratarse de una variable cuantitativa que no cumplió el supuesto de normalidad y de tratamientos relacionados.



NOTA

En la figura se puede apreciar los diferentes resultados obtenidos del afirmado como también de la combinación del afirmado más aditivos, el orden se encuentra de menor a mayor, en la abscisa se encuentra las combinaciones de % NRG y % EC y en las ordenadas se encuentra los valores de la permeabilidad que cada combinación alcanza.

Figura 48 — Comparación estadística de la permeabilidad según tratamiento

Tabla 66 — Efecto de NRG y EC sobre la permeabilidad

% NRG	% EC				ANOVA	Resultado
	0 %	3 %	6 %	9 %		
0 %	—	C	C	C	—	Control
2 %	NF	NF	NF	NF	No significativo	No favorable
5 %	NF	NF	NF	NF	No significativo	No favorable
8 %	NF	NF	NF	NF	No significativo	No favorable

NOTA

En la permeabilidad, el análisis ANOVA indicó que ni el (NRG) ni la (EC) presentan influencia estadísticamente significativa; en consecuencia, las combinaciones evaluadas se consignan como no favorables en la síntesis del cuadro de doble entrada, evidenciando un comportamiento impermeabilizante parcial bajo las condiciones del estudio.

*F = Favorable; NF = No favorable; C = control.



5.3 Discusión

Los resultados obtenidos fueron analizados en comparación con estudios previos, los cuales serán comparadas con los antecedentes, el cual se encontrarán puntos de concordancia y/o discrepancia, el cual dará a esta investigación una validez de los resultados obtenidos. El objetivo principal de esta investigación fue conocer la influencia del uso de neumático reciclado granular (NRG) y emulsión catiónica (EC) en la estabilización e impermeabilización de la capa de afirmado en vía vecinal AP-650, Abancay - Apurímac, 2025.

Respecto al objetivo general, los resultados muestran que, en relación con la máxima densidad seca (MDS), los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación muestran que la combinación de 8% NRG y 9% EC alcanzó el valor más alto con 2.401g/cm^3 , superando al afirmado sin aditivos que presentó 2.2625 g/cm^3 , Este aumento se atribuye a la redistribución más eficientes vacíos y el efecto cohesivo de la emulsión, lo cual evidencia una mejora significativa en la compactación del afirmado tratado.

- **Discusión 01**

Los resultados del objetivo específico 01 evidencian que la máxima densidad seca del afirmado mejora con la incorporación conjunta de NRG y EC, observándose incrementos progresivos al aumentar el contenido de emulsión. En condición natural, la MDS varió entre 2.21 y 2.31 g/cm^3 según calicata; mientras que con tratamiento se alcanzaron valores máximos entre 2.30 y 2.40 g/cm^3 , destacando la combinación 8% NRG + 9% EC.

Este comportamiento concuerda con (Perez Tueros, 2021), quien reportó incrementos de la MDS al adicionar emulsión catiónica, atribuidos al efecto ligante y a una mejor compactabilidad del material. De manera similar, (Velasquez, y otros, 2024), concluyen que la combinación de caucho reciclado y emulsión favorece la redistribución de vacíos en suelos granulares, incrementando la densidad seca.

No obstante, los resultados difieren de (Cosar, 2023), quien no encontró mejoras significativas en suelos arcillosos tratados con caucho granular. Esta discrepancia se explica por la diferencia en el tipo de suelo, ya que el presente estudio se desarrolló en afirmados granulares (GM-GP), donde la interacción partícula -



emulsión resulta más favorable que en suelos cohesivos.

- **Discusión 02**

Respecto al objetivo específico 02, se observó una reducción del porcentaje de expansión en determinadas combinaciones NRG + EC, alcanzándose valores mínimos de hasta 0.44%, en comparación con el afirmado natural, que presentó valores cercanos a 1.0%. Los mejores resultados se obtuvieron con bajos contenidos de NRG (2%) y mayores porcentajes de EC, evidenciando que la estabilidad volumétrica depende de una dosificación óptima y no del aumento indiscriminado del caucho.

Estos resultados son consistentes con (Alvarez Castelblanco, 2020), quien reportó disminuciones significativas del hinchamiento al incorporar caucho reciclado. Asimismo, (Surco Bocanegra, 2022) y (Tacca, 2024), concluyen que la emulsión catiónica, combinada con materiales reciclados, contribuye a controlar la expansión y mejorar la estabilidad del suelo.

De igual forma, (Cabrera Pasca, y otros, 2021), aunque no reportan valores directos de expansión, evidencian una mejora global del comportamiento mecánico y menor deterioro del afirmado tratado con emulsión, lo cual se alinea con la reducción de deformaciones volumétricas observadas en esta investigación.

- **Discusión 03**

En relación con el objetivo específico 03, los resultados muestran que el índice CBR del afirmado se incrementa de manera significativa con determinadas combinaciones NRG-EC. El CBR natural varió entre 41.65% y 53.87%, mientras que con tratamiento se alcanzó un valor máximo de 65.59% con la combinación 2% NRG + 6% EC, evidenciando una mejora sustancial de la capacidad portante. Este comportamiento coincide con los hallazgos de (Gavilanes Pozo, 2022), quien identificó un contenido óptimo de emulsión que maximiza el CBR, seguido de una disminución cuando el aditivo se incrementa en exceso. Resultados similares fueron reportados por (Amaro, y otros, 2021) y (Bezih, y otros, 2025), quienes destacan que el caucho granular actúa como refuerzo flexible, mejorando la resistencia al corte y la capacidad de soporte del suelo.

Asimismo, Pérez Tueros (2021) y Cabrera Pasca et al. (2021) evidencian que la emulsión asfáltica incrementa la cohesión entre partículas, mientras que (Tacca,



2024), confirma que el uso conjunto de caucho reciclado y emulsión mejora simultáneamente el CBR y controla la expansión. Estos antecedentes respaldan los resultados obtenidos y confirman el efecto sinérgico del NRG y la EC en el desempeño estructural del afirmado.

- **Discusión 04**

En cuanto al objetivo específico 04, los resultados evidencian que la permeabilidad del afirmado presenta un comportamiento altamente variable con la incorporación de NRG y EC, con valores que oscilaron entre el orden de 10^{-4} y 10^{-2} cm/s. Si bien se identificaron combinaciones puntuales con menor permeabilidad, como 5% NRG + 3% EC ($1.94E-04$ cm/s), el análisis estadístico indica que no se logró una impermeabilización consistente del afirmado.

Estos resultados difieren parcialmente de (Pino Rabanal, 2020) y (Romero Villajuan, 2022), quienes reportaron reducciones significativas de la permeabilidad en suelos finos tratados con emulsión y aditivos. La discrepancia se explica por el tipo de material, ya que el presente estudio se desarrolló en suelos granulares de afirmado, cuya estructura porosa y conectividad limita el sellado homogéneo, aun con la presencia de emulsión.

Por tanto, se concluye que, en este tipo de suelo, la permeabilidad está controlada principalmente por la geometría de poros y el grado de compactación, más que por la sola incorporación de NRG y EC.



CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

La presente investigación se desarrolló en la vía vecinal AP-650, en el distrito de Abancay, en el cual se evaluó la influencia del neumático reciclado granular (NRG) y la emulsión catiónica (EC) en la estabilización e impermeabilización del afirmado. Los resultados de laboratorio son respaldados por el análisis estadístico ANOVA, el cual permitió comprobar que los aditivos mejoraron significativamente la estabilización del suelo del afirmado, reflejándose en el aumento de los valores de la máxima densidad seca (MDS), en la reducción del porcentaje de expansión y en el incremento del índice de CBR. En cuanto a la impermeabilización, los resultados técnicos muestran que ciertas combinaciones lograron disminuir el coeficiente de permeabilidad, siendo esta una disminución no muy significativa. Por tanto, los aditivos (NRG y EC) evaluados representan una alternativa sostenible y técnicamente viable para mejorar capas de afirmado en vías vecinales.

- **Conclusión 01**

Se concluye, para el objetivo específico 01, que la incorporación de (NRG) y (EC) mejoró la máxima densidad seca (MDS) del afirmado, incrementándose desde valores base de 2.21–2.31 g/cm³ hasta un máximo de 2.40 g/cm³ con la combinación 8 % NRG + 9 % EC (C-02, Tabla 27). Asimismo, se registraron valores elevados de MDS de 2.36 g/cm³ (C-04, Tabla 29), 2.35 g/cm³ (C-01, Tabla 26) y 2.30 g/cm³ (C-03, Tabla 28), evidenciándose una tendencia de incremento conforme aumentó el contenido de EC (3 %, 6 %, 9 %).

De manera complementaria, el contenido óptimo de humedad (OCH) aumentó en las mezclas tratadas, observándose incrementos de 3.70 % a 4.72 % en C-02 (Tabla 27) y de 5.72 % a 6.73 % en C-03 (Tabla 28). El análisis ANOVA confirmó la influencia estadísticamente significativa de ambos factores sobre la MDS (NRG: $p = 0.0038$; EC: $p = 0.0019$; $p < 0.05$; Tabla 57), validando que los aditivos modifican la compactibilidad del material. Finalmente, la determinación de la MDS y el OCH se realizó conforme a la norma MTC E-115, evidenciándose que el material



estabilizado cumple con los criterios de estabilidad volumétrica requeridos para su aplicación en la vía vecinal AP-650.

- **Conclusión 02**

Se concluye, para el objetivo específico 02, que la adición de (NRG) y (EC) permitió reducir el porcentaje de expansión respecto al afirmado sin tratamiento, cuyos valores se situaron entre 0.829 y 1.025 % (Tabla 30). Los menores valores de expansión se alcanzaron con la combinación 2 % NRG + 9 % EC, registrándose 0.44 % en la calicata C-01 (Tabla 31) y 0.50 % en la calicata C-03 (Tabla 33). No obstante, también se identificó un valor máximo de 1.09 % con la dosificación 5 % NRG + 9 % EC (C-04, Tabla 34), lo que evidencia que la expansión depende de la dosificación empleada y no disminuye necesariamente con incrementos en el contenido de NRG; en particular, con 8 % NRG se observaron valores relativamente elevados, comprendidos entre 0.83 y 0.98 %. El análisis ANOVA evidenció una influencia estadísticamente significativa del NRG sobre el porcentaje de expansión ($p = 0.0161 < 0.05$; Tabla 59), mientras que la emulsión catiónica no presentó influencia significativa ($p = 0.1125 > 0.05$; Tabla 59), indicando que el control volumétrico del afirmado se asocia principalmente al efecto del NRG como componente flexible. Finalmente, de acuerdo con la norma MTC E-110 (expansión ≤ 1.0 % a 4 días), la mayoría de las combinaciones evaluadas cumplen el criterio de estabilidad volumétrica, excepto el caso puntual de 1.09 %, por lo que la selección de la mezcla debe priorizar dosificaciones que aseguren valores de expansión iguales o inferiores a 1.0 % para garantizar un adecuado desempeño en servicio.

- **Conclusión 03**

Se concluye, para el objetivo específico 03, que la dosificación de (NRG) y (EC) influye en el índice CBR del afirmado, incrementándolo respecto a la condición natural, cuyos valores se situaron entre 41.65 y 53.87 % (Tabla 35). El mayor valor de CBR se alcanzó con la combinación 2 % NRG + 6 % EC, registrándose 65.59 % en la calicata C-02 (Tabla 37), mientras que dosificaciones no adecuadas provocaron reducciones del CBR, alcanzándose un valor mínimo de 28.97 % con 8 % NRG + 6 % EC en la calicata C-03 (Tabla 38). A nivel de calicatas, las combinaciones óptimas incrementaron el CBR hasta 59.87 % en C-01 (incremento



de +18.22 %, Tabla 36), 65.59 % en C-02 (+11.72 %, Tabla 37), 57.66 % en C-03 (9.13 %, Tabla 38) y 59.24 % en C-04 (9.14 %, Tabla 39), confirmándose un aumento relevante de la capacidad portante del afirmado. El análisis ANOVA respaldó estos resultados al evidenciar influencia estadísticamente significativa de ambos factores (NRG: $p = 0.0003$; EC: $p = 0.0084$; $p < 0.05$; Tabla 61).

- **Conclusión 04**

Se concluye, para el objetivo específico 04, que la permeabilidad “k” del afirmado presentó un comportamiento no uniforme frente a las combinaciones de (NRG) y (EC), registrándose una amplia variabilidad de valores comprendidos entre 1.94×10^{-4} y 9.96×10^{-3} m/s. En contraste, el afirmado sin aditivo presentó valores de permeabilidad comprendidos entre 7.61×10^{-4} y 1.38×10^{-3} m/s, correspondientes a las calicatas C-03 y C-01 (Tabla 46). Si bien se observaron reducciones puntuales de la permeabilidad, destacando el mínimo global de 1.94×10^{-4} m/s con la combinación 5 % NRG + 3 % EC en la calicata C-02 (Tabla 49), frente a 1.12×10^{-3} m/s del afirmado sin aditivo en la misma calicata (Tabla 46), así como mínimos por calicata de 3.58×10^{-4} m/s en C-01 (Tabla 48), 2.42×10^{-4} m/s en C-03 (Tabla 50) y 2.61×10^{-4} m/s en C-04 (Tabla 51), también se registraron incrementos marcados de la permeabilidad, alcanzándose valores de 8.70×10^{-3} , 7.57×10^{-3} y 6.61×10^{-3} m/s, principalmente con dosificaciones elevadas de NRG (8 %) y EC (6, 9 %).

La prueba no paramétrica de Friedman evidenció que tanto el NRG como la EC influyen de manera estadísticamente significativa en la permeabilidad del afirmado ($p < 0.05$; Tablas 63 y 64); sin embargo, el sentido de dicha influencia no fue favorable, dado que no se logró una reducción consistente y sostenida de la permeabilidad con el incremento de los aditivos. Finalmente, cumple con la norma del NTP 339.147, que exige $k \leq 5.0 \times 10^{-7}$ m/s, ninguno de los valores obtenidos (incluso el mínimo) alcanza el umbral normativo, por lo que la combinación NRG–EC no logra una impermeabilización suficiente bajo dicho criterio.



6.2 Recomendaciones

Se recomienda validar la combinación óptima de NRG y EC en obras reales y a escala completa en vías vecinales de Apurímac, con monitoreo del comportamiento estructural e hidráulico durante al menos un ciclo anual. Además, se requiere desarrollar investigaciones complementarias sobre: su efectividad en suelos de diferente plasticidad, un análisis costo- beneficio comparativo con métodos tradicionales, y la gestión para su incorporación en los manuales técnicos de infraestructura vial. El estudio de la investigación se centró en la caracterización experimental y la optimización en laboratorio, que es la fase previa necesaria. La implementación en obra real y el análisis de viabilidad económica y normativa corresponden a etapas posteriores de desarrollo tecnológico, las cuales exceden el alcance, tiempo, laboratorio y recursos de la investigación de caracterización inicial como la presentada. En cuanto a la línea de investigación puede ser liderado por tesis de posgrado (maestría) en ingeniería civil, geotecnia o vías, en colaboración con las autoridades locales. Esta propuesta está dirigida a la mejora de la calidad de vida de la población que hace uso de la vía vecinal AP-650, así como también a las municipalidades distritales y provinciales de Apurímac y regiones con problemas similares y al MTC y sus programas (PROVIAS) para la actualización de normativas y especificaciones técnicas.

- **Recomendación 01**

Se recomienda estudiar el comportamiento bajo tránsito vehicular real, bajo ciclos de humedad y sequía y en suelos con alta plasticidad. El enfoque línea de la investigación se centró en la validación experimental en laboratorio, midiendo parámetros como la (MDS) y la falta de equipos especializadas en laboratorios locales no permitieron continuar con la investigación más allá de los resultados del objetivo específico 01. Esta línea de investigación puede desarrollarse tanto en trabajos de pregrado como en tesis de posgrado maestría o doctorado en Ingeniería Civil, Geotecnia o Vías Terrestres, profundizando en el monitoreo a largo plazo y el análisis del desempeño estructural. Esta implementación enfocada a las instituciones educativas aledañas, centros de salud y brindar calidad de vida a los pobladores que hacen uso de la vía vecinal AP-650.



- **Recomendación 02**

Se recomienda evaluar el desempeño de la combinación NRG-EC en la reducción del porcentaje de expansión volumétrica en suelos con diferentes índices de plasticidad (bajo, medio y alto), especialmente en suelos expansivos o de alta plasticidad donde este fenómeno es crítico. Asimismo, se requiere validar su eficacia en condiciones reales de tránsito y clima, mediante un plan de vigilancia post-construcción que monitoree las deformaciones a largo plazo. El estudio de la investigación se centró en suelos granulares de la capa de afirmado, por lo que no se evaluó su comportamiento en suelos finos o altamente plásticos, donde el mecanismo de expansión es diferente y representa un reto técnico mayor. Esta línea de investigación, que requiere mayor especialización y precisión en la medición de parámetros de expansión, es adecuada para tesis de posgrado (Maestría en Geotecnia, Ingeniería de Pavimentos o similares). La implementación de esta alternativa técnica está dirigida a las instituciones educativas aledañas, centros de salud y brindar calidad de vida a los pobladores que hacen uso de la vía vecinal AP-650, así como también para municipalidades provinciales y distritales con jurisdicción en vías vecinales.

- **Recomendación 03**

Se recomienda validar el desempeño de la combinación óptima (Afirmado + NRG + EC) en condiciones reales de servicio como: su comportamiento estructural bajo tránsito pesado en vías vecinales rurales, relación entre el control de calidad en obra (espesor uniforme, granulometría), el CBR alcanzado en campo y su efectividad en otras regiones con problemas similares de inestabilidad en la capa de afirmado. Este estudio proporcionó evidencia experimental de laboratorio sobre la mejora del CBR, la validación en proyectos reales a escala completa es una fase posterior de implementación, necesaria para confirmar la transferibilidad de los resultados y ajustar los protocolos de construcción, esta fase no fue abordada porque escapa al alcance de la investigación de caracterización inicial, representando un escalamiento que requiere recursos y condiciones diferentes. La implementación y monitoreo de esta tecnología en obra corresponde principalmente a profesionales y entidades ejecutoras, su profundización técnica y replicabilidad puede ser objeto de estudio en tesis de posgrado especializaciones, maestrías en Ingeniería Vial o Geotecnia. La implementación está dirigida a las instituciones educativas aledañas,



centros de salud, así como también para Organismos ejecutores de infraestructura vial, empresas consultoras y contratistas especializadas en estabilización de suelos y afirmados.

- **Recomendación 04**

Se recomienda evaluar y comparar la eficacia de nuevos aditivos de carga positiva distintos a la EC, en la impermeabilización del afirmado, utilizando métodos precisos de medición carga variable / constante en tramos pilotos expuestos a lluvias intensas, el objetivo es superar la impermeabilización parcial lograda con la combinación NRG-EC, la cual mostró un coeficiente de permeabilidad “k” aún elevado. El estudio se centró en caracterizar el efecto de una (EC) específica la baja eficacia relativa de la combinación NRG-EC para lograr una impermeabilización profunda revela la necesidad de explorar otros agentes químicos con mecanismos de sellado más efectivos, esta brecha se debe a que la optimización química de aditivos es una línea de investigación posterior y con equipos de laboratorio especializados. Esta línea de investigación, que requiere alto rigor en metodologías de laboratorio y análisis de desempeño hidráulico, es ideal para tesis de posgrado Maestría / Doctorado en Geotecnia, Hidrología o Materiales. La implementación de esta alternativa técnica está dirigida a las instituciones educativas aledañas, así como también para entidades gestoras de vías rurales, investigadores y consultoras especializadas en pavimentos, drenaje vial y estabilización de suelos.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVA HURTADO, Jorge E. 1996.** *Terzaghi y la mecánica de suelos*. Lima : Laboratorio Geotécnico del CISMID Universidad Nacional de Ingeniería, 1996.
- ALVAREZ CASTELBLANCO, Sergio Andres. 2020.** *Utilización de granulo de caucho pulverizado proveniente de llantas usadas como solución para reforzar los suelos blandos de subrasante en la sabana de Bogotá*. Bogotá : Universidad Anronio Nariño, 2020. Tesis. <https://repositorio.uan.edu.co/server/api/core/bitstreams/bb00c563-c741-4a92-ad7c-9c1f03e72422/content>.
- AMARO, DELGADO Franko Kilinsman y JARA IDMA, Yuliana. 2021.** *Subrasante Mejorada Aplicando Caucho Granular en Suelos Cohesivos de la Avenida Punchauca – Carabayllo, 2021*. Universidad Cesar Vallejo. Lima - Perú s.n., 2021. https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/144936/Mendoza_CEY-Perez_RLJ-SD.pdf.txt?sequence=5.
- ANGELONE, Silvia, GARIBAY, Maria Teresa y Cauhape, Marina. 2006.** *Geologia y Geotecnica. Permeabilidad de suelos*. Argentina : s.n., 2006.
- ARIAS, María y CANGALAYA, Alfredo. 2023.** *Metodología de la investigación científica aplicada*. 2023.
- ASPHALT INSTITUTE. 2007.** *The Asphalt Handbook. El manual del asfalto*. USA, 7ma edicion : s.n., 2007. ISBN 978-1-934154-27-4.
- BAÑÓN, Luis y BEVIÁ GARCÍA, José francisco. 2000.** *Manual de carreteras. Volumen II: construcción y mantenimiento*. 2000. ISBN: 84-607-0123-9.
- BASUDAM, Adhikari, y otros. 2000.** *Reclamation and recycling of waste rubber*. Septiembre de 2000, Vol. 25, 7, págs. 909-948. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877400000728>.
- BEZIH, K, y otros. 2025.** Experimental study of shear strength and CBR improvement of silty clay soil reinforced with waste tires. 2025. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC12069539/>.
- BOADA, Alejandro. 2023.** *El reciclaje, una herramienta no un concepto*:. Universidad Externado de Colombia. Bogota : s.n., 2023. <https://ambientehogar.files.wordpress.com/2017/08/libro-12.pdf..>
- CABRERA PASCA, Gabriela Andreina y ROQUE HUACASI, Arturo. 2021.** *Diseño y*



evaluación del afirmado estabilizado con emulsión asfáltica de la vía hacia el Santuario Virgen de Chapi Charcani-Cayma. Universidad Nacional San Agustín de Arequipa. Arequipa - Perú : s.n., 2021. <https://repositorio.unsa.edu.pe/items/236bd2c8-2539-453d-8e1c-7901c8b3eb11>.

CALDERON, William. 2024. Estabilización de la subrasante adicionando caucho granular reciclado. *Una revisión de literatura entre los años 2019–2024.* 2024. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UCVV_cd1be685e94c7026b02ac662d5f433a3#:~:text=representativa%20de%20art%C3%ADculos%20relevantes,del%20material%20en%20condiciones%20reales.

CDC/ATSDR, EPA. 2024. *Federal Research Action Plan on Recycled Tire Crumb Used on Playing Fields.* Environmental Protection Agency. U.S : s.n., 2024.

CÉDEX. 2022. *Catálogo de Residuos Utilizables en la construcción.* [En línea] España, 2022. [Citado el: Mayo de 9 de 2024.] <https://www.cedexmateriales.es>.

CHAVEZ, Rosmel. 2023. *Influencia de las geoceldas de neumáticos reciclados en la capacidad de soporte del afirmado para base, Chota, 2021.* Universidad Nacional Autónoma de Chota. 2023. <https://repositorio.unach.edu.pe/items/b2e30e37-a68e-466a-8ee4-c42402d9f1c3>.

CHINOME, Camilo. 2022. *Modelo para especificar, ejecutar y controlar la impermeabilización de cubiertas en concreto reforzado de tipo plana construidas en la ciudad de Bogotá.* 2022. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/82132>.

CIFUENTES, L y SALAZAR, M. 2019. *Significado de la media aritmética y el uso de la palabra promedio.* Universidad de Tolima. Colombia : s.n., 2019. <https://repository.ut.edu.co/bitstream/001/2637/1/T%200501%20130%20CD6689.pdf>.

CIPIRIAN, Lady y BEJARANO, Kevin. 2023. *Estudio de Viabilidad del Aprovechamiento del Gránulo de Caucho Reciclado (GCR) en Vías de Colombia gr.* Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca. 2023.

<https://repositorio.unicolmayor.edu.co/bitstream/handle/unicolmayor/7110/Estudio%20de%20viabilidad%20para%20el%20aprovechamiento%20del%20gra%CC%81nulo%20de%20caucho%20.pdf?isAllowed=y&sequence=1>.

COSAR, SOTO Frank Eder. 2023. *Estabilización de Suelos Arcillosos Usando Caucho Granular de Neumático para fines De Carretera no Pavimentadas.* Pimentel - Peru : s.n., 2023. **CRESPO, VILLALAZ Carlos. 2004.** *MECANICA DE SUELOS Y CIMENTACIONES.* MEXICO : IB LUMUSA NORIEGA, 2004.



- DAS, Braja M. 2011.** *FUNDAMENTOS DE INGENIERIA DEL CIMENTACIONES.* s.l. : HUNURA SERVICIOS, 2011.
- GEOTECNIA. 2010.** *FUNDAMENTOS DE INGENIERIA DEL CIMENTACIONES.* s.l. : HUNURA SERVICIOS, 2010.
- GEOTECNIA. 2013.** *Fundamentos de la ingeniería de cimentaciones.* s.l. : Stamford: Cengage Learning, cuarta edición, 2013. ISBN: 978-607-519-373-1.
- DAS, Braja M. 2022.** *Principles of Geotechnical Engineering.* s.l. : Cengage Learning. 10ª edición., 2022.
- DAWSON, Andrew, Chris, SENSENEY y Phill, Donovay. 2021.** *Evaluating and Rating Unsurfaced Roads.* Colorado - Estados Unidos : s.n., 2021.
- DAWSON, Andrew R., & Plati, C. 2008.** *Performance of emulsion-treated bases in pavements. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport.* 2008. 127-138..
- DEVORE, Jay L. 2016.** *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias..* 9.ª ed. . México : Cengage Learning, 2016. ISBN 978-607-526-373-4.
- DIAZ, Khaterine y Torres, Rosa. 2019.** *“Incorporación de partículas de caucho de neumáticos para mejorar las propiedades mecánicas en suelos arcillosos”.* Universidad Nacional de Jaén. Jaen-Lima : s.n., 2019. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNJA_8c9efae38ff3b8e2c53eab54c160980.
- EPA. 2006.** *Environmental Protection Agency.* EE.UU : s.n., 2006. https://www.tceq.texas.gov/downloads/border/tirerecyclingsp.pdf?utm_source= .
- ESPINOZA, Miler. 2023.** *Prueba de resistencia del hormigón con el agregado fino de fibras de caucho.* Huacho - Peru : Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, 2023. [file:///C:/Users/usuario/Downloads/TESIS%20MILER%20CELISO%20ESPINOZA%20ORIVERA%20\(3\).pdf](file:///C:/Users/usuario/Downloads/TESIS%20MILER%20CELISO%20ESPINOZA%20ORIVERA%20(3).pdf).
- ETRA . 2003.** *Niveles de tratamiento (diagrama).* Asociación técnica interna. Bruselas : ETRA – European Tyre Recycling Association, 2003. <https://e-archivo.uc3m.es/rest/api/core/bitstreams/fc20e8a9-314b-493b-8018-a165f7d5d750/content>.
- FERNANDEZ, Luz, AQUINO, Joaquin y Cayo, Nahum. 2022.** *Ventajas y Desventajas del neumático. Análisis de las propiedades físicas y mecánicas del residuo de caucho de neumático como reemplazo parcial del agregado fino en el hormigón.* 2022, Vol. 12, 2. https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0719-07002022000200052.
- FISHER, Ronald A. 1925.** *Statistical Methods for Research Workers.* Edimburgo : Oliver



y Boyd, 1925.

FLORES, R. 2000. *Flujo de agua a través de suelos*. Ingeniería y Tecnología. s.l. : AMH, 2000. <http://repositorio.imta.mx/handle/20.500.12013/1154>.

GAVILANES POZO, Erika Samantha. 2022. *Estudio del efecto de la adición de emulsión asfáltica en las propiedades físico-mecánicas de suelos granulares, para el diseño de pavimentos flexibles*. Universidad Tecnica de Ambato. Ambato, Ecuador : s.n., 2022. <https://repositorio.uta.edu.ec/items/efcb2aeb-2339-49c4-8d63-15d2c11f9943>.

GEOTECNIA en línea. 2017. Ensayo de permeabilidad de suelos. *La librería del Ingeniero*. [En línea] 2017. <https://www.libreriaingeniero.com/2017/09/permeabilidad-del-suelo.html>. <https://www.libreriaingeniero.com/2017/09/permeabilidad-del-suelo.html> .

GHAZANFARI, Ehsan., ASADI, S. y Huat, B. B. K. 2012. *Stabilization of soft soils using recycled tire chips*. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2012. 925-935..

GOBIERNO REGIONAL DE APURIMAC. 2023. *ESTUDIO CLIMÁTICO DEL PROCESO DE MESO ZONIFICACION ECOLOGICA*. s.l. : Gobierno Regional de Apurimac, 2023. **GUERRERO, Bustramante o, CAMARGO, R y Dawd, I. 2024.** *Implementation of Crumb Rubber (CR) in Road Pavements*. s.l. : A Comprehensive Literature Review, 2024. <https://www.mdpi.com/2412-3811/9/12/223>.

GUTIERREZ, Juan y ROJAS, Luis. 2020. *Influencia de la plasticidad en el comportamiento expansivo de suelos arcillosos*. Lima - Perú : Universidad Nacional de Ingeniería, 2020.

HERNÁNDEZ, Juárez, L., G; TOBÓN, S. 2018. Juárez-Hernández, L.G. y Tobón, S., Revista ESPACIOS. *Diseño y validación de un instrumento para evaluar las competencias investigativas en estudiantes de educación superior*. [En línea] 2018. [https://www.revistaespacios.com/cited2017/cited2017-23.html#:~:text=variables%20señaladas,Este.39\(21\)](https://www.revistaespacios.com/cited2017/cited2017-23.html#:~:text=variables%20señaladas,Este.39(21)).

HERNANDEZ, Sampieri R. y Mendoza, C. 2014. *Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. Mexico : Mexico: Mc Graw Hill, 2014. ISBN: 978-1-4562-6096-5, 714 p.

HOLTZ, Robert D., Kovacs, William D. y SHEAHAN., Thomas C. 2011. *An Introduction to Geotechnical Engineering*. s.l. : Pearson, 2011.

INACAL, Instituto Nacional de Calidad. 2019. *NTP 339.127: Determinación del contenido de humedad en suelos y agregados*. Lima : s.n., 2019. s.n.

INGEOTECNICA. GAVIDIA, Andres. *Tipos de Permeámetro en Mecánica de Suelos*. [En



línea] <https://ingeotecnica.com/tipos-de-permeometro..>

KOLENDO, G, Voronova, V y BUMANIS, G. 2024. *Life Cycle Assessment of End-of-Life Tire Disposal Methods and Potential Integration of Recycled Crumb Rubber in Cement Composites.* s.l. : Applied Sciences,14, 2024. <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/24/11667>. **L, R. y Aiken. 1985.** *Three coefficients for analyzing the reliability and validity of ratings.* s.l. : Educational and Psychological Measurement, 1985. pág. vol. 45.

LIANG, Y, y otros. 2016. *Investigating the Internal erosion behavior and microscopic mechanisms of chemically stabilized soil: an experimental study.* 2016. <https://www.frontiersin.org/journals/earth-science/articles/10.3389/feart.2024.1452449/full>.

LIMING, Chen, Yang, Lu y Aruna, Nanayakkara. 2021. Rural Road Connectivity and Local Economic Activity: Evidence from Sri Lanka's Integrated Road Investment Program. *ADB South Asia Working Paper Series.* [En línea]. 2021. 87. 2313-5875.

MADS. 2016. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia. *"El Gránulo de Caucho Reciclado (GCR) proveniente de las llantas usadas será utilizado en la construcción de vías en el territorio nacional"*. 2016.

[https://archivo.minambiente.gov.co/index.php/noticias-asuntos-ambientales/1847-el-granulo-de-caucho-reciclado-gcr-proveniente-de-las-llantas-usadas-sera-utilizado-en-la-construccion-de-vias-en-el-territorio-nacional?utm_source=.](https://archivo.minambiente.gov.co/index.php/noticias-asuntos-ambientales/1847-el-granulo-de-caucho-reciclado-gcr-proveniente-de-las-llantas-usadas-sera-utilizado-en-la-construccion-de-vias-en-el-territorio-nacional?utm_source=)

MALDONADO, Luna Margarita, MENDEZ HINOJOSA, Luz y PEÑA MORENO, Jose. 2007. *Manual práctico para el diseño de la Escala Likert.* Mexico : Trillas, 2007. pág.95.<file:///C:/Users/usuario/Downloads/Dialnet-ManualPracticoParaElDisenoDeLaEscalaLikert-4953744.pdf>. 9789682475542.

MONTGOMERY, Douglas C. 2019. *Design and analysis of experiments.* 10th ed. s.l. : Hoboken: John Wiley & Sons, 2019. ISBN 978-1-119-49960-8..

MONTGOMERY, Douglas y Hines, Wlimiams. 1996. Diseño y análisis de experimentos. *Probabilidad de Estadística para Ingeniería y Administración.* segunda. Mexico: Editorial Continental, 1996.

https://www.academia.edu/44190954/Montgomery_y_Hines_Probabilidad_y_estadística.

MTC. 2014. *Documentos técnicos. Soluciones básicas en carreteras no pavimentadas.* Lima : s.n., 2014.

MTC. 2013. *Manual de carreteras especificaciones técnicas generales para construcción EG- 2013.* Lima : s.n., 2013.

MTC. 2018. *Manual de carreteras. mantenimiento o conservación vial.* LIMA : s.n., 2018.



MTC. 2008. *Manual de diseño de carreteras no pavimentadas de bajo volumen de tránsito.*

LIMA - PERU : s.n., 2008.

MTC, E-207. 2016. *Manual de Ensayo de Materiales / Ensayo de Abrasion.* Lima, Ministerio de Transporte y Comunicaciones. Lima - Perú : s.n., 2016.

https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/Manual%20Ensayo%20de%20Materiales.pdf.

MTC, EG-13. 2013. *Manual de Carreteras: especificaciones técnicas generales para la construcción EG-2013.* Ministerio de Transporte y Comunicaciones. 2013. https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/manuales.html.

MTC, Ministerio de Transportes y Comunicaciones. 2022. *Dirección de estudios especializados.* Lima : s.n., 2022. s.n.

MTC, Oficina de estadística del. 2024. *Estadística - Infraestructura de Transportes - Infraestructura Vial.* Lima : s.n., 2024. s.n.

OMV. 2016. *Ficha técnica de OMV Soluciones Arquitectónicas.* Medellín - Colombia : s.n., 2016. <https://www.omvdeco.co/walltakers/productos/>.

PEREZ TUEROS, Jordy David. 2021. *Estabilización de las propiedades del suelo con emulsión asfáltica catiónica para subrasante en el jirón Eucalipto, Sapallanga.* Universidad Peruana los Andes. Huancayo - Perú : s.n., 2021.

<https://repositorio.upla.edu.pe/handle/20.500.12848/3108>.

PERÚ, Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). MTC, 2008. *Reglamento Nacional de Gestión de Infraestructura Vial. Decreto Supremo N° 034-2008-MTC.* Lima : s.n., MTC, 2008.

PINO RABANAL, Joselyne Génesis. 2020. *Estudio de la permeabilidad las mezclas asfálticas utilizadas en la región del Maule y presentación de una posible mejora.* Universidad de Talca. Curicó Chile : s.n., 2020.

<http://dspace.otalca.cl/bitstream/1950/12995/3/2020A000738.pdf>.

R S, Shinde, y otros. 2019. Stabilization of soil and rubber crumb by using CBR test. *International Journal of Research in Engineering, Science and Management.* Marzo de 2019, Vol.2,3.

https://www.ijresm.com/Vol.2_2019/Vol2_Iss3_March19/IJRESM_V2_I3_248.pdf.

RECYCLING TODAY . 2024. *Report, EPA releases final crumb rubber risk.* [En línea] 2024. <https://www.recyclingtoday.com>.

RODRIGUEZ, R, Castaño, V y Martínez, M. 2001. *“Emulsiones Asfálticas”.* Instituto



Mexicano del Transporte. Sanfadila : s.n., 2001.

<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/11577/Marcoantoniosarmientoootalora.2012.pdf?sequence>.

RODRIGUEZ, Sergio. 2017. *Reutilización de Neumáticos Fuera de Uso*. San Cristóbal de La Laguna. España : Universidad de La Laguna, 2017. Departamento de Ingeniería Química. <https://riull.ull.es/xmlui/handle/915/6260>.

RODRIGUEZ, TALAVERA Rogelio, Castaño, MENESES Victor Manuel y MARTINEZ, MADRID Miguel. 2001. *Emulsiones asfálticas*. Mexico : s.n., 2001. 23.

ROGERS, J. David. 2003. *Soil Stabilization for Unpaved Roads. Informe técnico*. 2003. s.n.

ROMERO, VILLAJUAN Issa Militsa. 2022. *Estabilización de suelos con aditivos químicos para disminuir la infiltración del agua en la capa granular de un pavimento económico*. Universidad Nacional Federico Villareal. Lima-Perú : s.n., 2022. <https://repositorio.unfv.edu.pe/handle/20.500.13084/5727>.

SANCHEZ, Rocio. 2012. Segunda vida de los neumáticos usados. [ed.] Química Viva. 2012, Vol. 11, 1, págs. 24-39. <https://www.redalyc.org/pdf/863/86323612003.pdf>.

SIEGEL, Sidney y CASTELLAN, N. John. 1988. *Nonparametric statistics for the behavioral sciences*. New York (USA) : s.n., 1988. 2nd edition.

SIGNUS. 2018. Revista de plasticos modernos. *Reciclado de neumaticos: Transformacion de un residuo en un recurso*. 2018, Vol. 115, 730. <https://www.signus.es/wp-content/uploads/2018/04/reciclado-de-neumaticos-transformacion-de-un-residuo-en-un-recurso.pdf>.

SINAC. 2024. Decreto Supremo que aprueba el Reglamento de Jerarquización Vial y establece otras disposiciones. *El Peruano*. 2024, s.n.

SINAC, Sistema nacional de carreteras. 2024. *Mapa vial de Apurimac*. Lima : s.n., 2024.

SOTO, Jose y PEÑA, Jose. 2006. *ATEB, Asociación Técnica de Emulsiones Bituminosas*. 2006.

SURCO BOCANEGRA, Yeleny Fiorella. 2022. *Estabilización de suelos con emulsión asfáltica y tereftalato de polietileno con fines en carretera no pavimentada*. Universidad Señor de Sipan. Pimentel-Perú : s.n., 2022. <https://repositorio.uss.edu.pe/handle/20.500.12802/10429>.

TACCA, Fredy. 2024. "Efecto mecánico de suelos arcillosos con adición de polvo de caucho para el mejoramiento de la subrasante en la Av. Santo Domingo - Abancay -



Apurímac, 2022". Apurimac - Perú, Universidad Tecnológica de los Andes. Abancay - Apurimac : s.n., 2024. <https://repositorio.utea.edu.pe/items/725422f8-cd00-4968-8708-da6982c735af>.

TAHA, R, A, AL-HARTHY y K., AL-Shamsi. 2002. revista "Journal of Materials in Civil Engineering". *Artículo "Performance of Unpaved Roads Reinforced with Recycled Tire Rubber"*. 2002.

TEJELA, Juan. 2013. *Neumáticos fuera de uso en carreteras. Revista interempresas.* Universidad Cesar Vallejo.Lima-Peru:s.n.,2013.

<https://www.interempresas.net/Automocion/Articulos/109593-El-caucho-de-neumaticos-fuera-de-uso-en-carreteras.html>.

TERZAGHI, Karl y B., Peck Ranlph. 1973. *Mecanica de suelos en la ingenieria practia* Barcelona : el ateneo, 1973.

TNU. 2024. TRATAMIENTO NEUMÁTICOS USADOS (TNU). *TNU destaca 10 ventajas del reciclaje de neumáticos para preservar el medio ambiente.* [En línea] 29 de mayo de 2024. <https://www.tnu.es/tnu-destaca-10-ventajas-del-reciclaje-de-neumaticos-para-preservar-el-medio-ambiente>.

TORO, Edgardo, y otros. 2023. *Desafíos éticos para la investigación en Latinoamérica: una aproximación desde el punto de vista de los investigadores.* Escocia : Neogranadina, 2023. Revista Latinoamericana de Bioética, vol. 23, no. 2, ISSN 2462-859X. DOI 10.18359/rlbi.6216.

VALLEJO, Sandoval y RIVERA, Mena. 2019. Correlación del CBR con la resistencia a la compresión confinada. 1, 2019, Vol. 29, págs. 135-152.

https://www.researchgate.net/publication/335582415_Correlacion_del_CBR_con_la_resistencia_a_la_compresion_inconfnada..

VELASQUEZ, ÁLAVA Wellinston, y otros. 2024. Revista Veritas de Difusão Científica. *Habilitación de Vías de Tercer Orden con Grava, Emulsión Asfáltica y Grano de Caucho.* Julio- agosto de 2024, Vol. 5, 2.

<file:///C:/Users/usuario/Downloads/Habilitación+de+Vías+de+Tercer+Orden+con+Grava,+Emulsión+Asfáltica+y+Grano+de+Caucho.pdf>.

WIKIPEDIA. 2025. The Free Encyclopedia. *Permeabilidad del suelo, Estudios geotécnicos.*

[En línea] 2025. <https://estudiosgeotecnicos.info/index.php/permeabilidad-de-los-suelos/>.

ZAGA, DE LA CRUZ Ivan. 2022. *Influencia de la adición de caucho reciclado en elementos de concreto no estructural para el aislamiento acústico, Cusco 2021.* Lima : s.n.



ANEXOS



Anexo A

Tabla 67 — Matriz de consistencia

TITULO: “Estabilización e impermeabilización de la capa de afirmado con neumático reciclado granular y emulsión catiónica en vía vecinal AP - 650, Abancay-Apurímac, 2025”				
PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPOTESIS	VARIABLES	METODOLOGIA
<p>General:</p> <ul style="list-style-type: none"> ¿Cómo influye el uso de neumático reciclar granular y emulsión catiónica en la estabilización e impermeabilización de la capa de afirmado en vía vecinal AP-650, Abancay-Apurímac, 2025? <p>Específicos:</p> <ul style="list-style-type: none"> ¿Cómo influye el uso de neumático reciclar granular y emulsión catiónica en la máxima densidad seca del afirmado en vía vecinal AP-650, Abancay- Apurímac, 2025? ¿Cómo influye el uso de neumático reciclar granular y emulsión catiónica en el porcentaje de expansión del afirmado en vía vecinal AP-650, Abancay- Apurímac, 2025? 	<p>General:</p> <p>Evaluar la influencia del uso de neumático reciclado granular y emulsión catiónica en la estabilización e impermeabilización de la capa de afirmado en vía AP-650, Abancay - Apurímac, 2025</p> <p>Específicos:</p> <ul style="list-style-type: none"> Determinar la influencia del uso de neumático reciclado granular y emulsión catiónica en la máxima densidad seca del afirmado en la estabilización e impermeabilización en vía vecinal AP-650, Abancay- Apurímac, 2025. Analizar la influencia del uso neumático reciclado granular y emulsión catiónica en el porcentaje de expansión del afirmado en la estabilización e impermeabilización en vía vecinal AP-650 Abancay- Apurímac, 2025. 	<p>General:</p> <ul style="list-style-type: none"> La adición de neumático reciclado granular y emulsión catiónica influye en la estabilización e impermeabilización del afirmado en vía vecinal AP-650, Abancay- Apurímac, 2025. <p>Específicos:</p> <ul style="list-style-type: none"> La adición de neumático reciclado granular y emulsión catiónica influye en la máxima densidad seca del afirmado en la estabilización e impermeabilización en vía vecinal AP-650, Abancay- Apurímac, 2025. La adición de neumático reciclado granular y emulsión catiónica influye en el porcentaje de expansión del afirmado en la estabilización e impermeabilización en vía vecinal AP-650, Abancay- Apurímac, 2025. 	<p>Estabilización</p> <p><i>Dimensiones:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Densidad seca máxima Relación de soporte de California (CBR) Porcentaje de expansión <p>Impermeabilización</p> <p><i>Dimensiones:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> Permeabilidad de carga constante 	<p>Enfoque:</p> <p>Cuantitativo</p> <p>Tipo de investigación:</p> <p>Aplicado</p> <p>Nivel:</p> <p>Explicativo</p> <p>Método de la investigación:</p> <p>Inductivo – deductivo</p> <p>Diseño de la investigación:</p> <p>Diseño cuasi experimental</p> <p>Población:</p> <p>Se consideró la vía vecinal AP-650, Abancay del tramo del km 0+000 hasta km 1+050</p> <p>Muestra:</p> <p>Tramo Km 0+000 hasta 1+050</p> <p>Muestreo:</p> <p>No probabilístico, intencional o por criterio.</p>



<ul style="list-style-type: none"> ▪ ¿Cómo influye el uso de neumático reciclado granular y emulsión catiónica en CBR del afirmado para la estabilización e impermeabilización en vía vecinal AP-650, Abancay - Apurímac, 2025? ▪ ¿Cómo influye el uso de neumático reciclado granular y emulsión catiónica en la permeabilidad del afirmado para la estabilización e impermeabilización en vía vecinal AP-650, Abancay - Apurímac, 2025? 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Evaluar la influencia del uso de neumático reciclado granular y emulsión catiónica en el CBR del afirmado en la estabilización e impermeabilización en vía vecinal AP-650, Abancay- Apurímac, 2025 ▪ Determinar la influencia del uso de neumático reciclado granular y emulsión catiónica en la Permeabilidad del afirmado en la estabilización e impermeabilización en vía vecinal AP-650, Abancay- Apurímac, 2025. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ La adición de neumático reciclado granular y emulsión catiónica influye en el CBR del afirmado en la estabilización e impermeabilización en vía vecinal AP-650, Abancay- Apurímac, 2025. ▪ La adición de neumático reciclado granular y emulsión catiónica influye en la permeabilidad del afirmado en la estabilización e impermeabilización en vía vecinal AP-650, Abancay- Apurímac, 2025 		<p>Técnicas e instrumentos</p> <p>Técnicas: Observación directa</p> <p>Instrumentos: Ficha de recolección de datos</p> <p>Método de análisis de datos Procesamiento de la información. Categorización de variables observación, laboratorio y análisis</p> <p>Técnicas para el análisis de datos: Excel, Python, HMS,</p>
---	--	---	--	---




Anexo B
Instrumentos de recolección de datos

Proyecto: **ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO ASTM D-422**
ESTABILIZACIÓN E IMPERMEABILIZACIÓN DE LA CAPA DE AFIRMADO CON NEUMÁTICO RECICLADO GRANULAR Y EMULSIÓN CATIONICA EN VÍA VECINAL AP - 650, ABANCAY, APURÍMAC-2025

Ubicación: Lugar: _____ Provincia: _____ Material: _____
 Distrito: _____ Región: _____ Calicata: _____

Fecha: _____



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR LAVADO Y TAMIZADO					
Muestra inicial	3010.1 gr	Muestra lavada y secada	0.0 gr	Peso Recipiente	0.0 gr
TAMIZ (Pulg.)	TAMIZ (mm)	PESO RET. (gr.)	PESO CORR (gr.)	%RET.	%PASA
2"	50.800				
1 1/2"	38.100				
1"	25.400				
3/4"	19.050				
1/2"	12.700				
3/8"	9.525				
1/4"	6.350				
Nº4	4.750				
Nº10	2.000				
Nº20	0.850				
Nº40	0.425				
Nº60	0.300				
Nº100	0.149				
Nº200	0.075				
Cazuela					
TOTAL					

PORCENTAJES DE FINOS, ARENAS Y GRAVAS

% FINOS	0.00%
% ARENAS	0.00%
% GRAVAS	0.00%

Figura 49 — Formato de ensayo de análisis granulométrico

ENSAYO DE COMPACTACION - PROCTOR MODIFICADO

ASTM D-1557-70 - AASHTO T-180-70

Proyecto : ESTABILIZACIÓN E IMPERMEABILIZACIÓN DE LA CAPA DE AFIRMADO CON NEUMÁTICO RECICLADO GRANULAR Y EMULSIÓN CATIONICA EN VÍA VECINAL AP - 650, ABANCAY, APURÍMAC-2025

Calicata:
Fecha:

Nº de Capas: 5	
Nº de golpes por capas: 56	Volumen Molde :

Muestra	I	II	III	IV
Wcap.				
Wcap+sh.				
Wcap+ss.				
Wss.				
Ww.				
%CH.				

%CH.				
Wmolde				
Wsh+molde				
Wsh.				
Densidad Hum.				
Densidad Seca				

Densidad Seca Maxima(g/cm3) :	
Contenido Optimo de Agua(%):	

GRAFICO DE COMPACTACION

Figura 50 — Formato de ensayo de Proctor modificado



RELACION DE SOPORTE DE CALIFORNIA (CBR).												
ASTM 1833 - 73												
Proyecto : ESTABILIZACIÓN E IMPERMEABILIZACIÓN DE LA CAPA DE AFIRMADO CON NEUMÁTICO RECICLADO GRANULAR Y EMULSIÓN CATIONICA EN VÍA VECINAL AP - 650, ABANCA Y, APURÍMAC-2025												
Cantera:												
Humedad Optima(%):						95% Densidad						
Seca Máxima(g/cm3): Densidad Seca Maxima(g/cm3):						Fecha:						
DIMENSIONES DE MOLDE:			Diametro	Altura	Area	Diametro	Altura	Area	Diametro	Altura	Area	
			15.24	11.64	182.42	15.24	11.64	182.42	15.24	11.64	182.42	
N° DE GOLPES POR CAPA			12			25			56			
CONDICIONES DE LA MUESTRA			SIN MOJAR	SATURA DA		SIN MOJAR	SATURADA		SIN MOJAR	SATURADA		
Peso del molde(gr).												
Volumen de la Muestra(cc).												
Muestra Humeda + Molde(gr).												
Muestra Humeda(gr).												
Densidad Humeda(gr/cm3).												
CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA MUESTRA												
Peso de la capsula(gr).												
Muestra Humeda + Capsula(gr).												
Muestra Seca+ Capsula(gr).												
Muestra Seca(gr).												
Contenido de Agua(gr)												
Contenido de Humedad(%)												
Densidad Seca(gr/cm3).												
DIA	HO RA	INTERVAL O (DIAS)	LECT. DEFOR.	EXPANSIÓN		LECT. DEFOR.	EXPANSIÓN		LECT. DEFOR.	EXPANSIÓN		
				PULGS	%		PULGS	%		PULGS	%	
MEDICION DE LA EXPANSION	1.00	13:05										
	2.00	13:02										
	3.00	13:10										
	4.00	13:04										
	5.00	12:58										
PENETRACION	CARGA PATRON "PULGADAS"	FACTOR DIAL	CARGA		CBR	FACTOR DIAL	CARGA		CBR	FACTOR DIAL	CARGA	
			MPa	12			MPa	25			MPa	56
ENSAYO DE PENETRACION	0											
	0.025											
	0.050											
	0.075											
	0.100											
	0.125											
	0.150											
	0.200											
	0.300											
	0.400											
0.500												

Figura 51 — Formato de ensayo de CBR



Anexo C VALIDACION DE INSTRUMENTOS

VALIDACION DE INSTRUMENTOS

I: DATOS GENERALES
Título de la Investigación:
 "Estabilización e impermeabilización de la capa de afanado con acústico reciclado granular y emisión catiónica en vía vecinal AP - 650, Abancay, Apurímac - 2025"

II: INVESTIGADORES
 Bach. Shunira Jaudry Vega Bolívar
 Bach. Sulma Chalico Leon

III: DATOS DEL EXPERTO
 Nombres y Apellidos: Dr. Sr. Angel Melchor de Ycaza
 Especialidad: Maestría en Gestión Integral de Calidad
 Cargo e institución donde labora: Director de G. E. P. T. G.

IV: FICHA DE RECOLECCION
Ficha (1-5)

V: ASPECTOS DE VALIDACION
 Marque con una (X) en la casilla correspondiente a cada criterio, seleccionando únicamente una opción por criterio, dando su valoración al cuestionario.

I. Puntuación:

Deficiente 1	Regular 2	Buena 3	Muy Buena 4	Excelente 5
--------------	-----------	---------	-------------	-------------


COMPONENTE	INDICADORES	VALORACION CUANTITATIVA	VALORACION				
			1	2	3	4	5
Forma	1. Redacción	Está redactado considerando los elementos necesarios					X
	2. Claridad	Está formulado con un lenguaje adecuado					X
	3. Objetividad	Todo expresa en conductas observables					X
Contenido	4. Actualidad	Es adecuado al tema y la tecnología				X	
	5. Suficiencia	Evalúa las dimensiones de las variables en cantidad y calidad					X
	6. Intencionalidad	Es adecuado para alcanzar los objetivos de estudio				X	
Estructura	7. Organización	Existe una organización lógica					X
	8. Consistencia	Exe basa en aspectos teóricos científicos de la ley educativa					X
	9. Coherencia	Existe coherencia entre las variables, dimensiones e indicadores					X
	10. Metodología	La estrategia responde al propósito del diagnóstico					X
TOTAL							

VI. VALORACION TOTAL: 4.5

VII. REVISADO EL INSTRUMENTO:
 Procede su aplicación () Debe corregirse ()

VIII. OPINION DE APLICABILIDAD:
Es aplicable

ABANCAY, 02 de Septiembre del 2025



Firma y sello del experto



VALIDACION DE INSTRUMENTOS

I: DATOS GENERALES

Título de la Investigación:

"Estabilización e impermeabilización de la capa de afirmado con neumático reciclado granular y emulsión catiónica en vía vecinal AP - 650, Abancay, Apurímac - 2025"

II: INVESTIGADORES

Bach. Shamira Jaudy Vega Bolívar
Bach. Sulma Chalco León

III: DATOS DEL EXPERTO

Nombres y Apellidos: Dr. D. Alvaro Alex Vargas Ramirez
Especialidad: Ph. D. en Ing. Ingeniería Civil
Cargo e Institución donde labora: Director de la Unidad de Investigación - UITEA

IV: FICHA DE RECOLECCION

Ficha (1-5)

V: ASPECTOS DE VALIDACION

Marque con una (X) en la casilla correspondiente a cada criterio, seleccionando únicamente una opción por criterio, dando su valoración al cuestionario.

I. Puntuación:

Deficiente 1	Regular 2	Buena 3	Muy buena 4	Excelente 5
--------------	-----------	---------	-------------	-------------

COMPONENTE	INDICADORES	VALORACION CUANTITATIVA	VALORACION				
			1	2	3	4	5
Forma	1. Redacción	Esta redactado considerando los elementos necesarios					X
	2. Claridad	Esta formulado con un lenguaje adecuado.					X
	3. Objetividad	Esta expresa en conducta observable			X		
Contenido	4. Actualidad	Es adecuado al avance y la tecnología					X
	5. Suficiencia	Evalua las dimensiones de las variables en cantidad y calidad					X
	6. Intencionalidad	Es adecuado para alcanzar los objetivos de estudio					X
Estructura	7. Organización	Existe una organización lógica					X
	8. Consistencia	Esc basa en aspectos teoricos científicos de la Inv. educativa					X
	9. Coherencia	Existe coherencia entre las variables, dimensiones e indicadores					X
	10. Metodología	La estrategia responde al propósito del diagnóstico					X
TOTAL							

VI. VALORACION TOTAL: 7

VII. REVISADO EL INSTRUMENTO:

Procede su aplicación (X) Debe corregirse()

VIII. OPINION DE APLICABILIDAD:

Aceptable

ABANCAY, 02 de Septiembre del 2025



[Handwritten signature]
Firma y sello del experto



VALIDACION DE INSTRUMENTOS

I: DATOS GENERALES

Título de la Investigación:

"Estabilización e impermeabilización de la capa de afirmado con neumático reciclado granular y emulsión catiónica en vía vecinal AP - 650, Abancay, Apurímac - 2025"

II: INVESTIGADORES

Bach. Shamira Jaudry Vega Bolívar
Bach. Sulma Chalco León

III. DATOS DEL EXPERTO

Nombres y Apellidos: Ing. Rubén Camarxa Mota
Especialidad: Ing. en proyectos de Infraestructura
Cargo e Institución donde labora: Docente a tiempo completo (UTEA)

IV: FICHA DE RECOLECCION

Se cierra (1-5 pag.)

V: ASPECTOS DE VALIDACION

Marque con una (X) en la casilla correspondiente a cada criterio, seleccionando únicamente una opción por criterio, dando su valoración al cuestionario.

I. Puntuación:

Deficiente 1	Regular 2	Buena 3	Muy buena 4	Excepcnte 5
--------------	-----------	---------	-------------	-------------

COMPONENTE	INDICADORES	VALORACION CUANTITATIVA	VALORACION				
			1	2	3	4	5
Forma	1. Redacción	Esta redactado considerando los elementos necesarios					X
	2. Claridad	Esta formulado con un lenguaje adecuado.					X
	3. Objetividad	Esta expresa en conducta observable					X
Contenido	4. Actualidad	Es adecuado al avance y la tecnología					X
	5. Suficiencia	Evalua las dimensiones de las variables en cantidad y calidad					X
	6. Intencionalidad	Es adecuado para alcanzar los objetivos de estudio					X
Estructura	7. Organización	Existe una organización logica					X
	8. Consistencia	Ese basa en aspectos teoricos científicos de la Inv. educativa					X
	9. Coherencia	Existe coherencia entre las variables, dimensiones e indicadores					X
	10. Metodología	La estrategia responde al propósito del diagnostico					X
TOTAL							X

VI. VALORACION TOTAL: Regular (6)

VII. REVISADO EL INSTRUMENTO:

Procede su aplicación Debe corregirse()

VIII. OPINION DE APLICABILIDAD:

Se debi realizar pruebas de laboratorio, con evidencias y especificaciones técnicas

ABANCAY, 07 de Septiembre del 2025


Ing. Rubén Camarxa Mota
DOCENTE
Firma y sello del experto



VALIDACION DE INSTRUMENTOS

I: DATOS GENERALES

Título de la Investigación:

"Estabilización e impermeabilización de la capa de afirmado con neumático reciclado granular y emulsión catiónica en vía vecinal AP - 650, Abancay-Apurímac - 2025"

II: INVESTIGADORES

Bach. Shamira Jaudry Vega Bolívar

Bach. Sulma Chalco León

III: DATOS DEL EXPERTO

Nombres y Apellidos: CÉSAR AUGUSTO QUILCA VERGARA

Especialidad: RECURSOS HÍDRICOS Y MEDIO AMBIENTE

Cargo e Institución donde labora: COORDINADOR DE COMITÉS VECINALES D.E.T.C. - APURÍMAC

IV: FICHA DE RECOLECCION

V: ASPECTOS DE VALIDACION

Marque con una (X) en la casilla correspondiente a cada criterio, seleccionando únicamente una opción por criterio, dando su valoración al cuestionario.

I. Puntuación:

Deficiente 1	Regular 2	Buena 3	Muy buena 4	Excelente 5
--------------	-----------	---------	-------------	-------------

COMPONENTE	INDICADORES	VALORACION CUANTITATIVA	VALORACION				
			1	2	3	4	5
Forma	1. Redacción	Esta redactado considerando los elementos necesarios				X	
	2. Claridad	Esta formulado con un lenguaje adecuado.					X
	3. Objetividad	Esta expresa un contenido observable				X	
Contenido	4. Actualidad	Es adecuado al avance y la tecnología				X	
	5. Suficiencia	Evalua las dimensiones de las variables en cantidad y calidad				X	
	6. Intencionalidad	Es adecuado para alcanzar los objetivos de estudio					X
Estructura	7. Organización	Existe una organización lógica				X	
	8. Consistencia	Está basa en aspectos teóricos científicos de la inv. educativa				X	
	9. Coherencia	Existe coherencia entre las variables, dimensiones e indicadores				X	
	10. Metodología	La estrategia responde al propósito del diagnóstico				X	
TOTAL							

VI. VALORACION TOTAL:

VII. REVISASO EL INSTRUMENTO:

Procede su aplicación (X)

Debe corregirse()

VIII. OPINION DE APLICABILIDAD:

ABANCAY, 01. de SETIEMBRE. del 2025



Firma y sello del experto



VALIDACION DE INSTRUMENTOS

I: DATOS GENERALES

Título de la Investigación:

"Estabilización e impermeabilización de la capa de afirmado con neumático reciclado granular y emulsión catiónica en vía vecinal AP - 650, Abancay-Apurímac - 2025"

II: INVESTIGADORES

Bach. Shamira Jaudry Vega Bolivar

Bach. Sulma Chalco Leon

III. DATOS DEL EXPERTO

Nombres y Apellidos: Ing. Rafael A. Guzmán Marino

Especialidad: Hidráulica y Ambiental

Cargo e Institución donde labora: Coordinador de Caminos Residenciales, DRETA - Apurímac

IV: FICHA DE RECOLECCION

V: ASPECTOS DE VALIDACION

Marque con una (X) en la casilla correspondiente a cada criterio, seleccionando únicamente una opción por criterio, dando su valoración al cuestionario.

I. Puntuación:

Deficiente 1	Regular 2	Buena 3	Muy buena 4	Excelente 5
--------------	-----------	---------	-------------	-------------

COMPONENTE	INDICADORES	VALORACION CUANTITATIVA	VALORACION				
			1	2	3	4	5
Forma	1. Redacción	Esta redactado considerando los elementos necesarios				X	
	2. Claridad	Esta formulado con un lenguaje adecuado.					X
	3. Objetividad	Esta expresa en conducta observable				X	
Contenido	4. Actualidad	Es adecuado al avance y la tecnología				X	
	5. Suficiencia	Evalua las dimensiones de las variables en cantidad y calidad					X
	6. Intencionalidad	Es adecuado para alcanzar los objetivos de estudio					X
Estructura	7. Organización	Existe una organización lógica				X	
	8. Consistencia	Está basada en aspectos teóricos científicos de la inv. educativa				X	
	9. Coherencia	Existe coherencia entre las variables, dimensiones e indicadores					X
	10. Metodología	La estrategia responde al propósito del diagnóstico				X	
TOTAL							

VI. VALORACION TOTAL:.....

VII. REVISASO EL INSTRUMENTO:

Procede su aplicación (/) Debe corregirse()

VIII. OPINION DE APLICABILIDAD:..... Es aplicable

ABANCAY, 08. de Setiembre. del 2025



Firma y sello del experto



Anexo D

Fotografías, certificados de calibración y resultados de laboratorio



NOTA

Identificación, acopio y recolección de Neumáticos Fuera de Uso (NFU) en distintos puntos urbanos de la ciudad de Abancay, mediante la participación de la Municipalidad y tesistas, para su posterior aprovechamiento en el desarrollo de la investigación.

Figura 54 — Búsqueda y selección de neumáticos fuera de uso



NOTA

Acopio de Neumáticos Fuera de Uso, con corte previo en tiras y posterior procesamiento mediante métodos mecánicos para la obtención de NRG, empleado en el desarrollo de la investigación.

Figura 55 — Acopio del NFU el cual será usado en la investigación



NOTA

Muestra del NRG y la EC, los cuales serán usados en las diferentes dosificaciones para la estabilización e impermeabilización de la vía vecinal AP-650.

Figura 56 — Muestra de los aditivos (EC y NRG) para la investigación



NOTA

Evaluación y cuantificación de fallas severas en la capa de afirmado del tramo en estudio, evidenciando presencia de baches, zonas de lodazal y cruces de agua.

Figura 57 — Fallas visibles en la vía vecinal AP-650



NOTA

Apertura de las cuatro calicatas y extracción de las muestras debidamente rotuladas, posteriormente llevadas al laboratorio para su análisis.

Figura 58 — Extracción de muestras de las cuatro calicatas



NOTA

Inspección del Asesor de la UNAMBA en la apertura y realización de muestras de las cuatro calicatas.

Figura 59 — Supervisión del asesor académico en la vía de estudio



NOTA

Supervisión del Asesor académico de la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, en los ensayos de laboratorio del CBR de las muestras de afirmado natural y de afirmado con aditivos (NRG y EC).

Figura 60 — Supervisión del asesor académico a los ensayos de laboratorio



NOTA

Obtención del índice de CBR de las muestras combinadas con aditivos (NRG y EC)

Figura 61 — Ensayos de CBR en muestras combinadas





NOTA

Ensayo de permeabilidad de carga constante realizado a las muestras del afirmado natural y al afirmado más aditivos (NRG y EC).



Figura 62 — Ensayo de permeabilidad (carga constante)



NOTA

Entrevista a la directora de la **I.E.I N° 1154 “San Francisco Solano”** sobre el deterioro de la vía y la afectación a la institución por el mal estado de la vía vecinal AP-650.

Figura 63 — Testimonio de la directora sobre el estado de la vía en estudio

**UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC**
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

Encuesta sobre las Condiciones de la vía vecinal AP-650 y su Impacto en la Seguridad y Calidad de Vida

TESIS: Estabilización e impermeabilización de la capa de afirmado con neumático reciclado granular y emulsión catiónica en vía vecinal AP-650, Abancay-Apurímac, 2025

Responda las siguientes preguntas y marque con un (x) según corresponda.

Sexo: Masculino () Femenino (x) edad:

Nombre: Yanet Chahuayo Quispe (Directora de la I.E.I N°1154 "San Francisco Solano")

1. ¿Con qué frecuencia transita por la vía AP-650? <input checked="" type="checkbox"/> a) Diario <input type="checkbox"/> b) Inter diario <input type="checkbox"/> c) Semana	5. ¿Alguna vez mostro su malestar ante una autoridad sobre el mal estado de la vía? <input checked="" type="checkbox"/> a) Si <input type="checkbox"/> b) No
2. ¿Cuál es su percepción general sobre el estado actual de la vía AP-650? <input type="checkbox"/> a) excelente <input type="checkbox"/> b) Bueno <input type="checkbox"/> c) Regular <input type="checkbox"/> d) Malo <input checked="" type="checkbox"/> e) Muy malo	6. ¿Estaría de acuerdo con el uso de técnicas sostenibles, como el uso de materiales reciclados para mejorar la estabilidad de la vía? <input checked="" type="checkbox"/> a) Si <input type="checkbox"/> b) No
3. ¿Qué problemas son los más frecuentes en la vía vecinal AP-650? <input type="checkbox"/> a) Baches o huecos <input type="checkbox"/> b) Ahuellamientos <input type="checkbox"/> c) Erosiones <input type="checkbox"/> d) Cruces de agua <input type="checkbox"/> e) Polvareda <input type="checkbox"/> f) Falta de drenaje <input checked="" type="checkbox"/> g) Todas las anteriores	7. "¿Sabe usted si el tránsito de vehículos pesados está permitido en esta vía?" <input type="checkbox"/> a) Si, está permitido <input checked="" type="checkbox"/> b) No, está prohibido <input type="checkbox"/> c) No estoy seguro
4. ¿Ha tenido algún accidente o incidente producto del mal estado de la vía AP-650? <input checked="" type="checkbox"/> a) Si <input type="checkbox"/> b) No	8. En su opinión, ¿el tránsito de vehículos pesados contribuye al deterioro de la vía? <input checked="" type="checkbox"/> a) Si, mucho <input type="checkbox"/> b) Si, parcialmente <input type="checkbox"/> c) No
Explique brevemente: En esta vía a menudo se ven accidentes ya sea por choques, carros varados a media vía por que se metieron a huecos, inundaciones a casas e instituciones que se encuentran por	9. ¿Qué sugerencias propone para mejorar esta vía? Buscar alternativas de materiales sostenibles que den un mejor resultado en la estabilización de la vía

Figura 64 — Entrevista técnica – Diagnóstico situacional en la vía vecinal AP-650

Certificado de validación de instrumentos

CERTIFICADOS DE CALIBRACION

SERVICIOS & METROLOGÍA S.A.C
LABORATORIO DE METROLOGÍA

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN
SMT - 020 - 2024

Expediente	24-0020	Página 1 de 1
1. Solicitante	CONCHIPA E.I.R.L.L.	<p>Los resultados del certificado son válidos sólo para el objeto calibrado y se refieren al momento y condiciones en que se realizaron las mediciones y no deben utilizarse como certificado de conformidad con normas de producto.</p> <p>Se recomienda al usuario realizar el instrumento a intervalos apropiados, los cuales deben ser elegidos con base en las características del trabajo, frecuencia de mantenimiento, conservación y el tiempo de uso del instrumento.</p> <p>SERVICIOS & METROLOGÍA S.A.C. no es responsable de los perjuicios que pueda ocasionar el uso inadecuado de este instrumento, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración aquí declarados.</p> <p>Este certificado de calibración es válido a patrones nacionales e internacionales, los cuales realizan las unidades de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI). Este certificado de calibración no podrá ser reproducido parcialmente sin la aprobación por escrito del laboratorio que lo emite.</p> <p>El certificado de calibración sin firma y sello carece de validez.</p>
2. Dirección	Pro. Arica N° s/n Abancay - Abancay - APURIMAC	
3. Equipo	HORNO	
Alicancia Máximo	De 0 °C a 200 °C	
Marca	ARSOU	
Modelo	HR701	
Número de Serie	600215	
Identificación	NO INDICA	
Precedencia	PERU	
Ubicación	LABORATORIO DE SUELOS Y CONCRETO	

Descripción	Controlador / Selector	Instrumento de medición
Alcance	0 °C a 200 °C	0 °C a 200 °C
División de escala / Resolución	1 °C	1 °C
Tipo	CONTROLADOR ELECTRONICO	TERMOMETRO DIGITAL

4. Fecha de Calibración: 2024-02-15

5. Fecha de Emisión: 2024-02-20



Sello



Jefe del Laboratorio de Metrología

Firmado digitalmente por
ELEAZAR CESAR CHAVEZ RARAZ
Fecha: 2024.02.23 15:24:26 -05'00'

SERVICIOS & METROLOGÍA S.A.C
LABORATORIO DE METROLOGÍA

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN
SMT - 020 - 2024

Página 2 de 1

Área de Metrología
Laboratorio de Temperatura

6. Método de Calibración

La calibración se efectuó por comparación directa de acuerdo al PC-018 "Procedimiento para la Calibración de Medios Isotérmicos con Aire como Medio Termostático", 2da edición, publicado por el SNM-INDECOPI, 2009.

7. Lugar de calibración

LABORATORIO DE SUELOS Y CONCRETO
Pro. Arica N° s/n Abancay - Abancay - APURIMAC

8. Condiciones Ambientales

	Inicial	Final
Temperatura	21.5 °C	22.2 °C
Humedad Relativa	62 %	62 %

El tiempo de calentamiento y estabilización del equipo fue de 120 minutos.
El controlador se seteo en 100 ° C

9. Patrones de referencia

Trazabilidad	Patrón utilizado	Certificado y/o informe de calibración
TERMÓMETROS DE INDICACIÓN DIGITAL EPI-2022-132-1 / LT-188-2022	TERMÓMETRO DE INDICACIÓN DIGITAL CON 12 CANALES	E688-1062B-2023-2

10. Observaciones

- Se colocó una etiqueta autoadhesiva con la indicación de **CALIBRADO**.
- La periodicidad de la calibración depende del uso, mantenimiento y conservación del instrumento de medición.

ventaservimetrol@gmail.com
asesorvimetrol@gmail.com
certvimetrol@gmail.com

938122709
938327400

Cal.37 Mza. A-34 Lote. 29 Urb. Cultura Peruana Moderna Lima - Lima - Santa Anita





SERVICIOS & METROLOGÍA S.A.C
LABORATORIO DE METROLOGÍA

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN
SMF - 040 - 2024

Página 1 de 3

Expediente	24-0053	<p>Los resultados del certificado son válidos sólo para el objeto calibrado y se refieren al momento y condiciones en que se realizaron las mediciones y no deben utilizarse como certificado de conformidad con normas de producto.</p> <p>Se recomienda al usuario recalibrar el instrumento a intervalos adecuados, los cuales deben ser elegidos con base en las características del trabajo realizado, el mantenimiento, conservación y el tiempo de uso del instrumento.</p> <p>SERVICIOS & METROLOGÍA S.A.C. no se responsabiliza de los perjuicios que pueda ocasionar el uso inadecuado de este instrumento, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración aquí declarados.</p> <p>Este certificado de calibración es trazable a patrones nacionales o internacionales, los cuales realizan las unidades de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI). Este certificado de calibración no podrá ser reproducido parcialmente sin la aprobación por escrito del laboratorio que lo emite.</p> <p>El certificado de calibración sin firma y sello carece de validez.</p>
1. Solicitante	CONCHIPA E.I.R.L.	
2. Dirección	Pro. Arica N° s/n Abancay - Abancay - APURIMAC	
3. Equipo	PRENSA CBR	
Capacidad	5000 kgf	
Marca	PINZUAR	
Modelo	PG-29	
Número de Serie	118	
Identificación	NO INDICA	
Procedencia	COLOMBIA	
4. Indicador	ANALÓGICO	
Marca	BAKER	
Número de Serie	BIA443	
División de Escala / Resolución	0,0001 pulg.	
5. Fecha de Calibración	2024-01-15	
6. Fecha de Emisión	2024-01-20	

Sello

Jefe de Laboratorio



Firmado digitalmente por
ELEAZAR CESAR CHAVEZ RARAZ
Fecha: 2024.05.15 19:40:18
-05'00'

✉ ventasservimetrol@gmail.com
✉ aservimetrol@gmail.com
✉ cservimetrol@gmail.com

☎ 938102709
938327400

📍 Cal.37 Mza. A-34 Lote. 29 Urb.
Cultura Peruana Moderna
Lima- Lima- Santa Anita



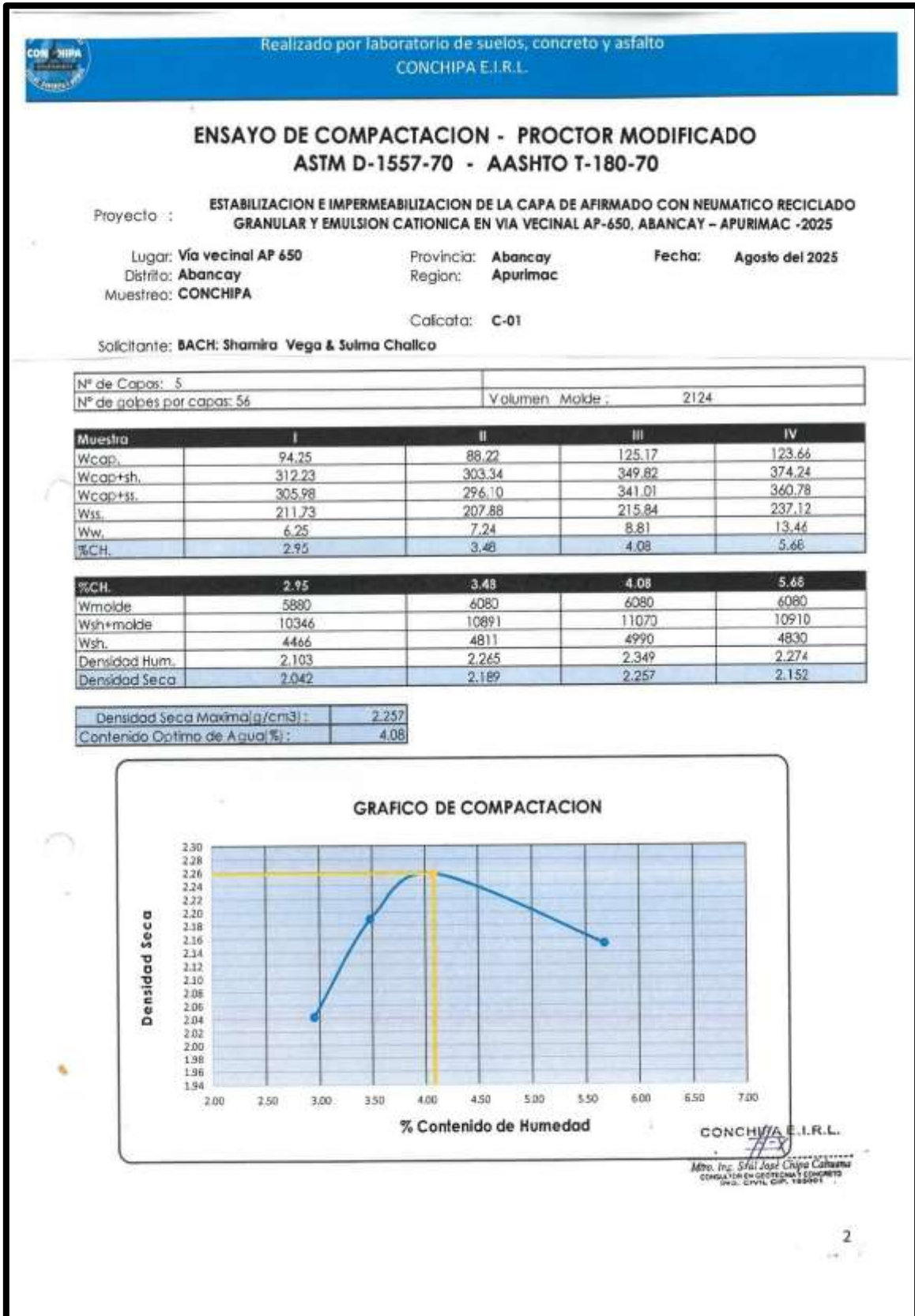


Figura 65 — Resultados de los ensayos de laboratorios – Proctor, C-01



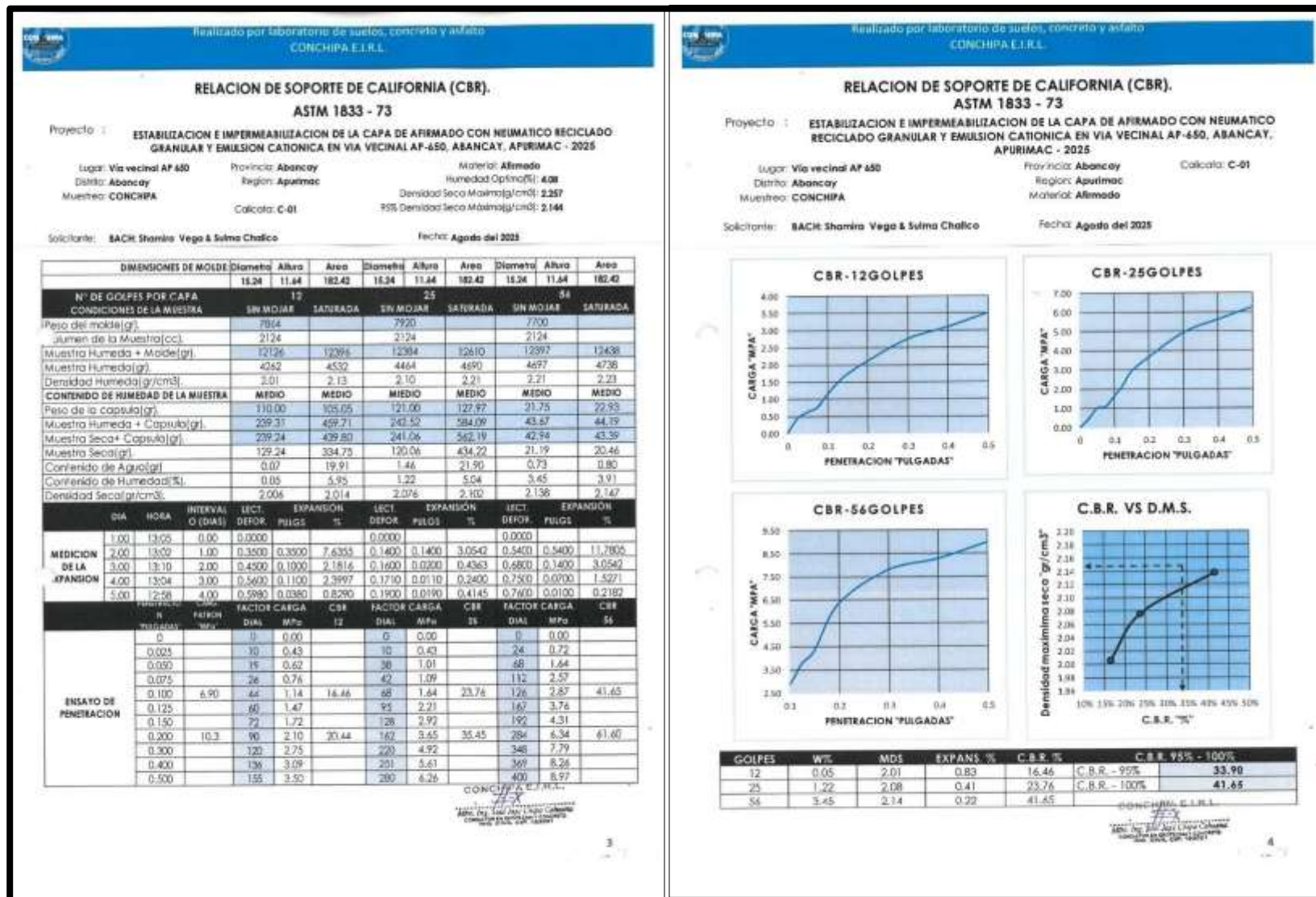


Figura 66 — Resultado de los ensayos de laboratorios – CBR, C-01



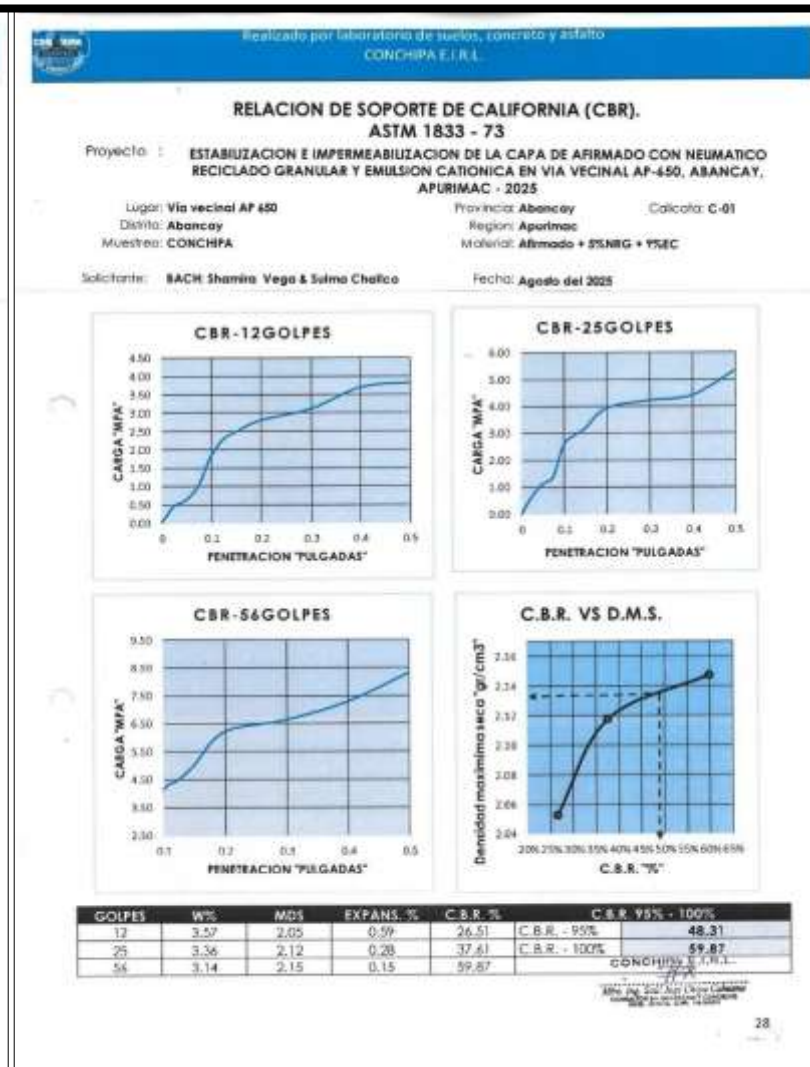
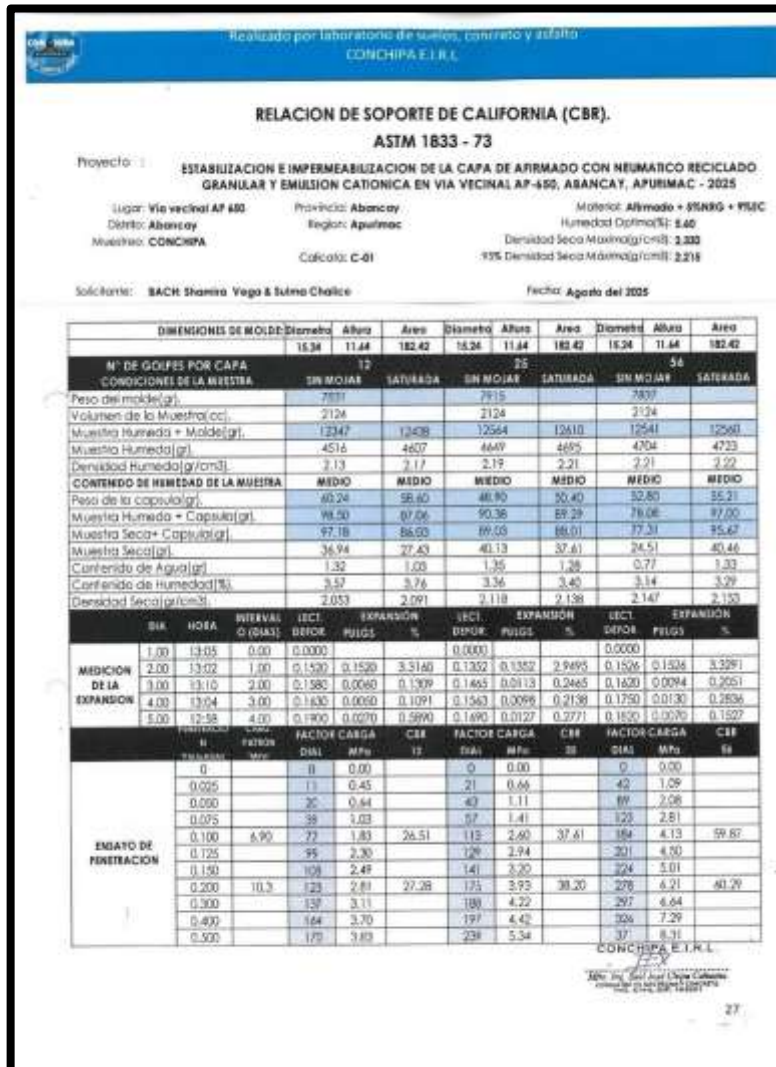


Figura 67— Resultado de los ensayos de laboratorios – CBR, (Af.+5% NRG+9%EC)



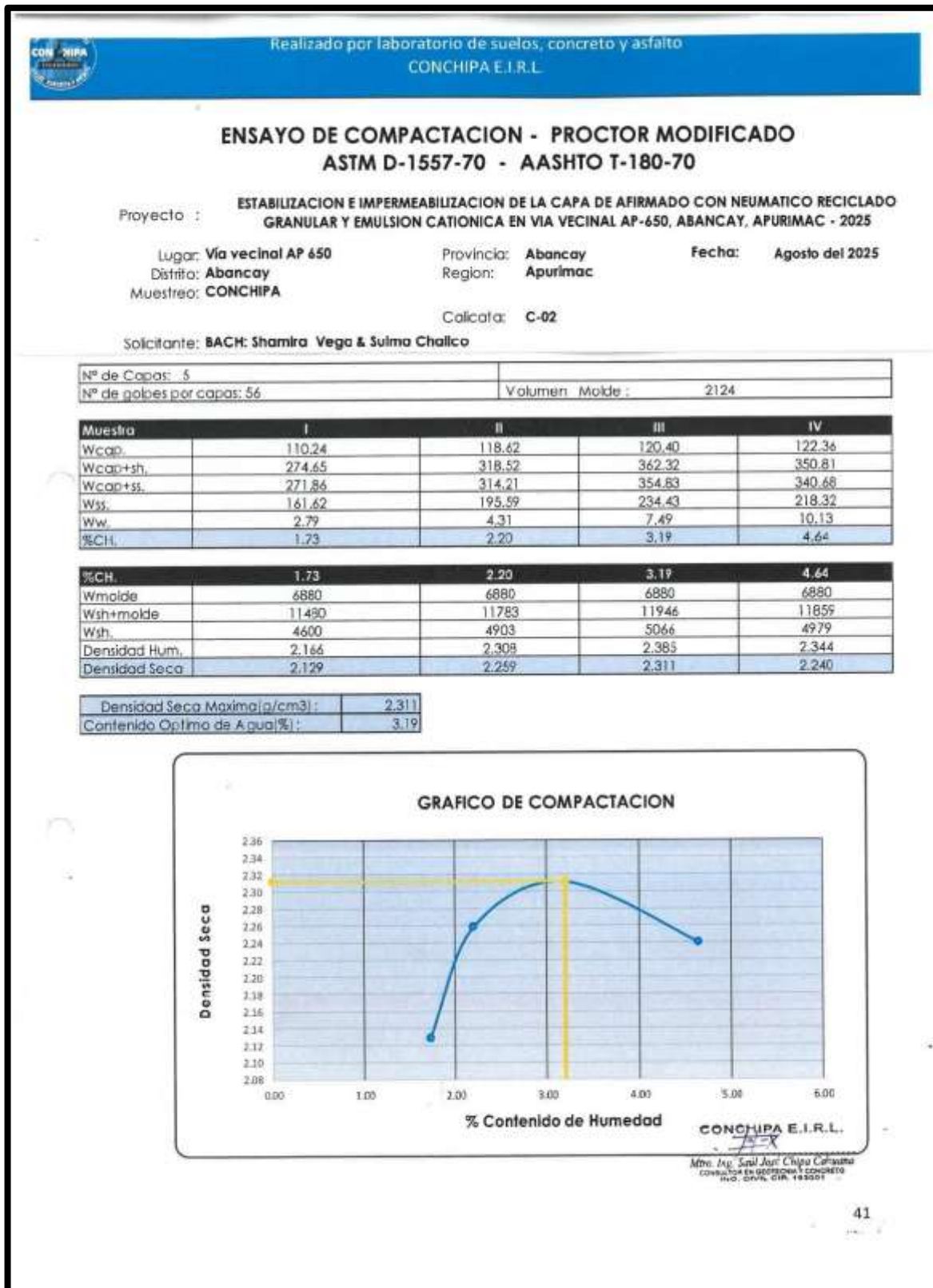


Figura 68 — Resultados de los ensayos de laboratorio – Proctor, C-02

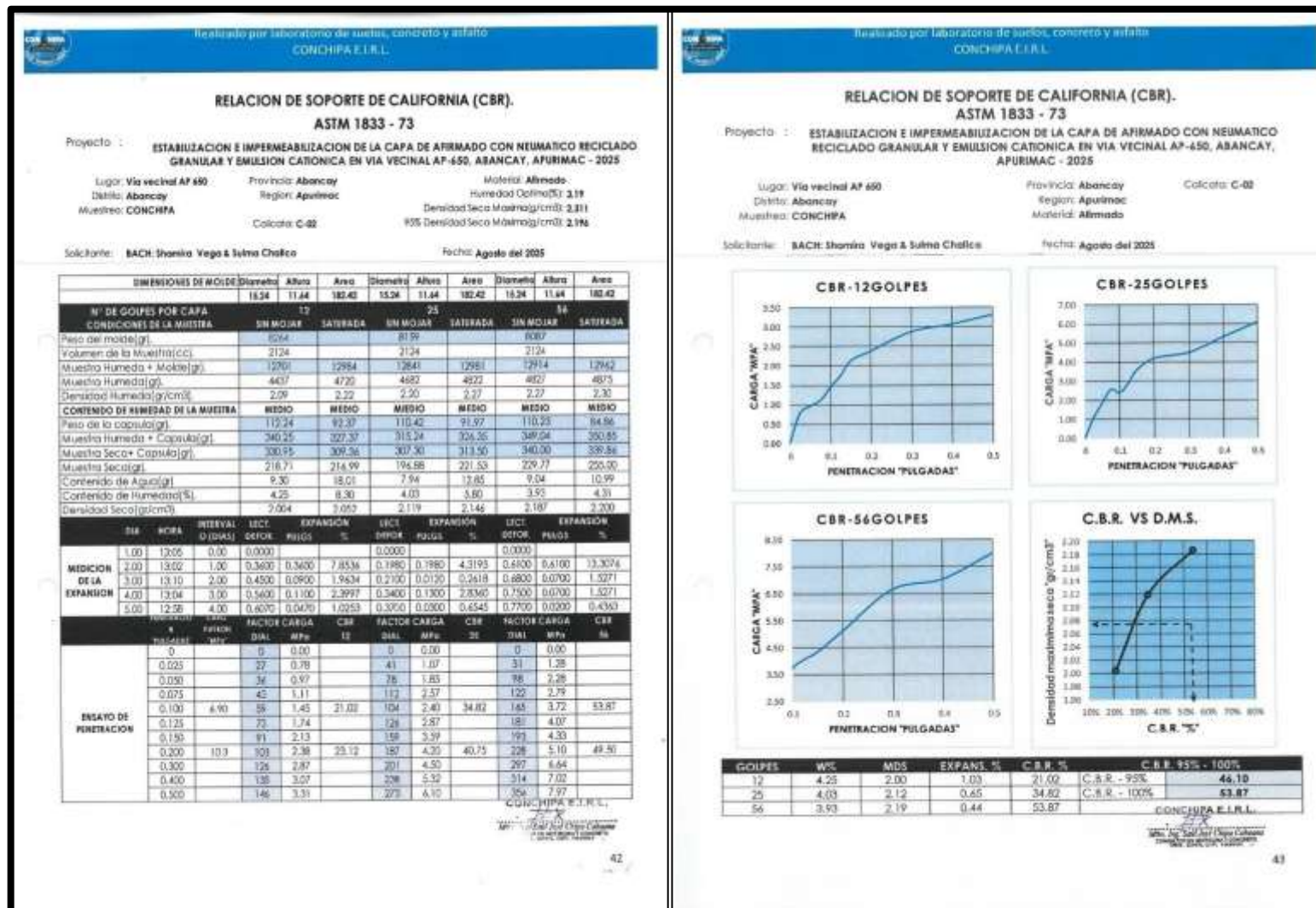


Figura 69 — Resultado de los ensayos de laboratorios – CBR, C-02



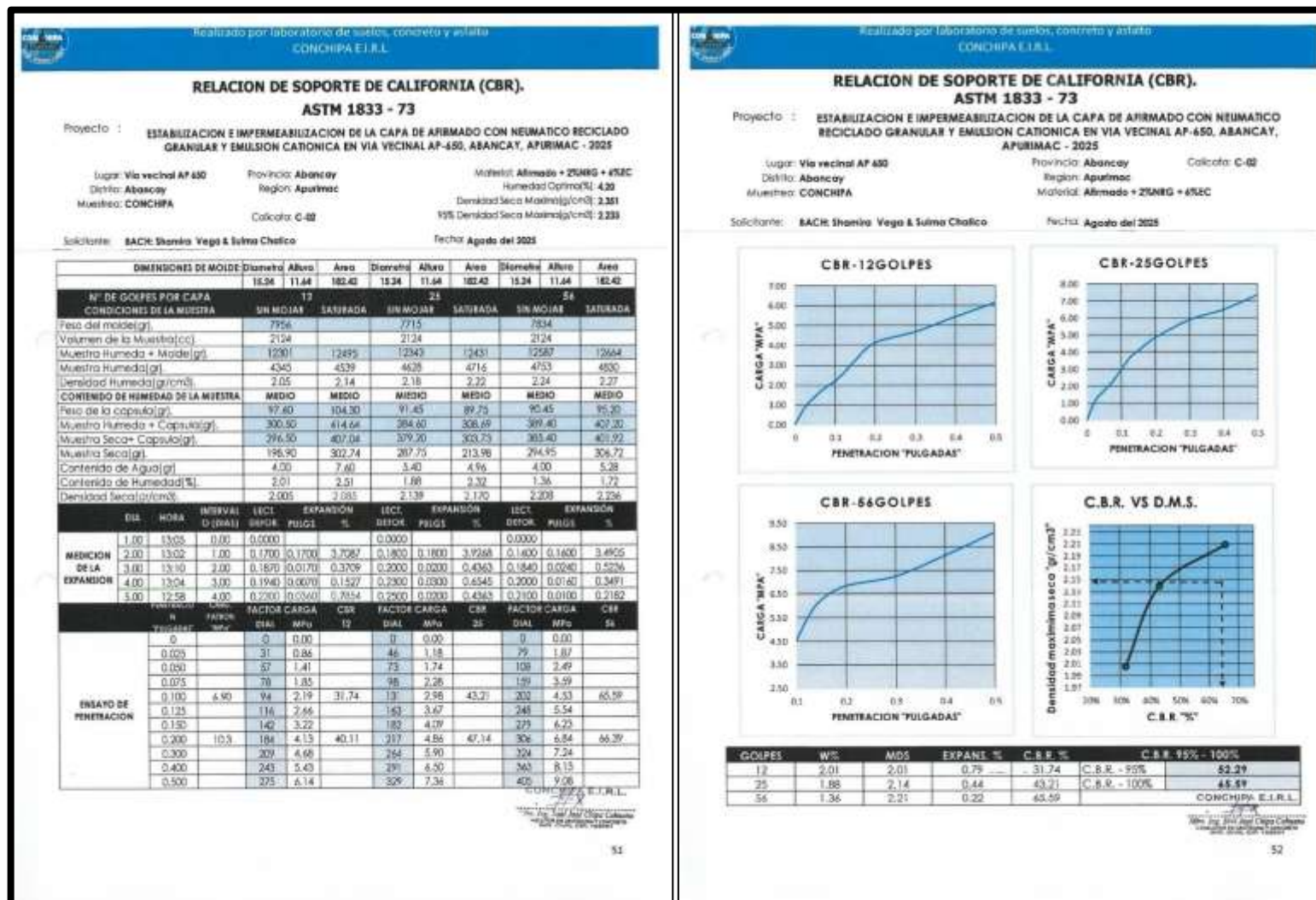


Figura 70 — Resultado de los ensayos de laboratorios –CBR, (Af. +2% NRG+6%EC)





Figura 71— Resultados de los ensayos de laboratorio – Proctor, C-03



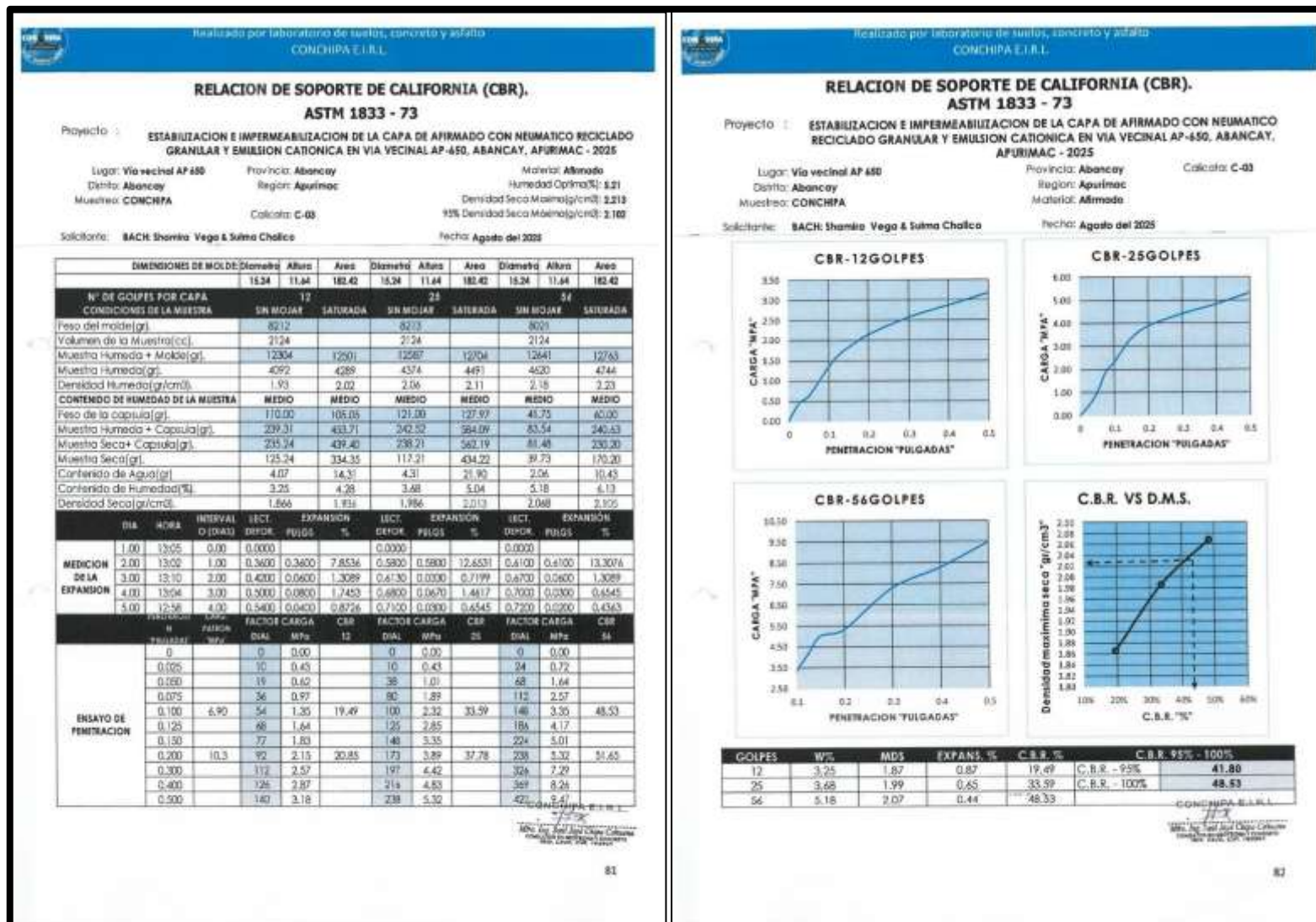


Figura 72 — Resultado de los ensayos de laboratorios – CBR, C-03



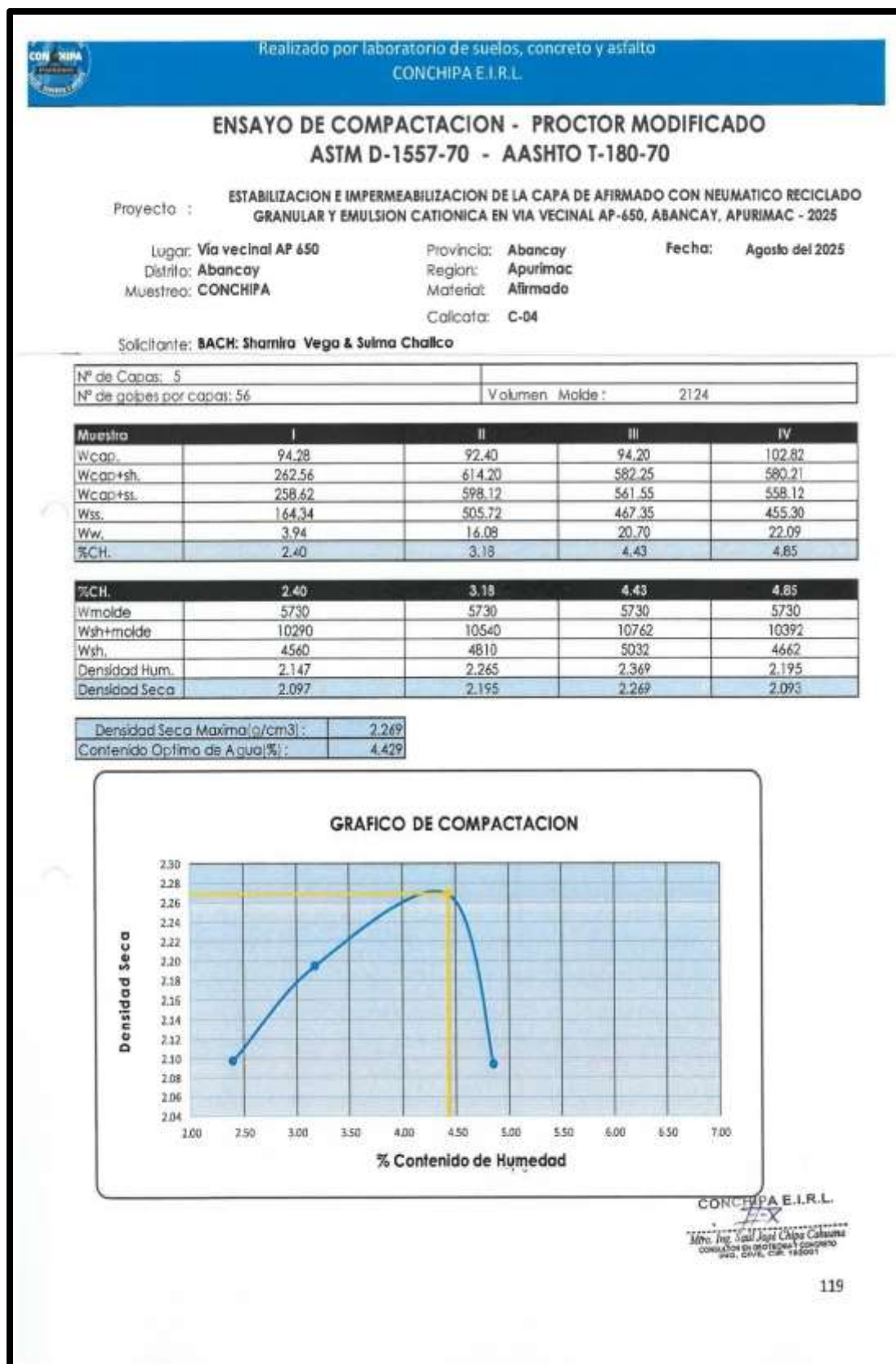


Figura 74— Resultados de los ensayos de laboratorio – Proctor, C-04



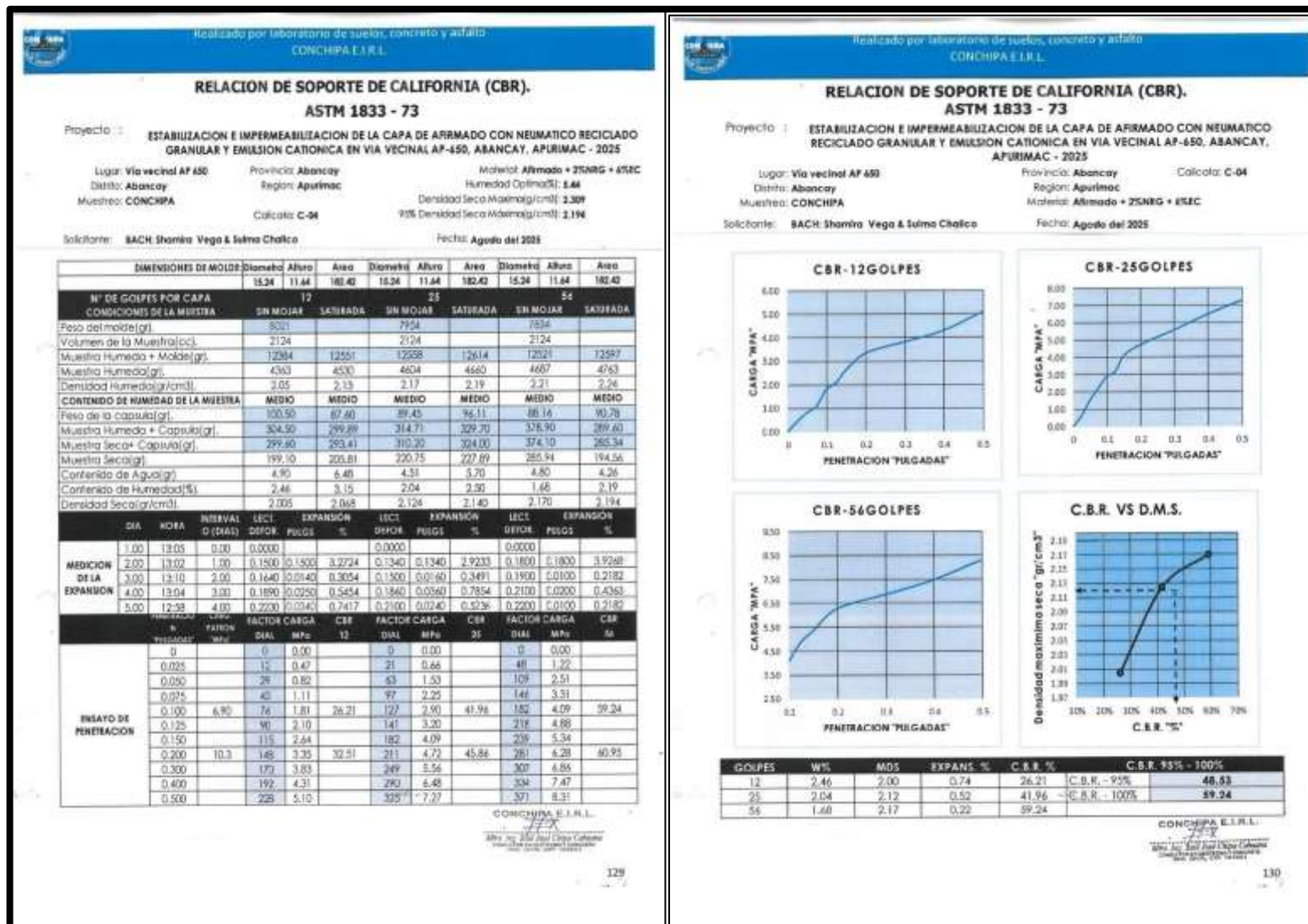


Figura 76 — Resultado de los ensayos de laboratorios –CBR, (Af. +2% NRG+6%EC)



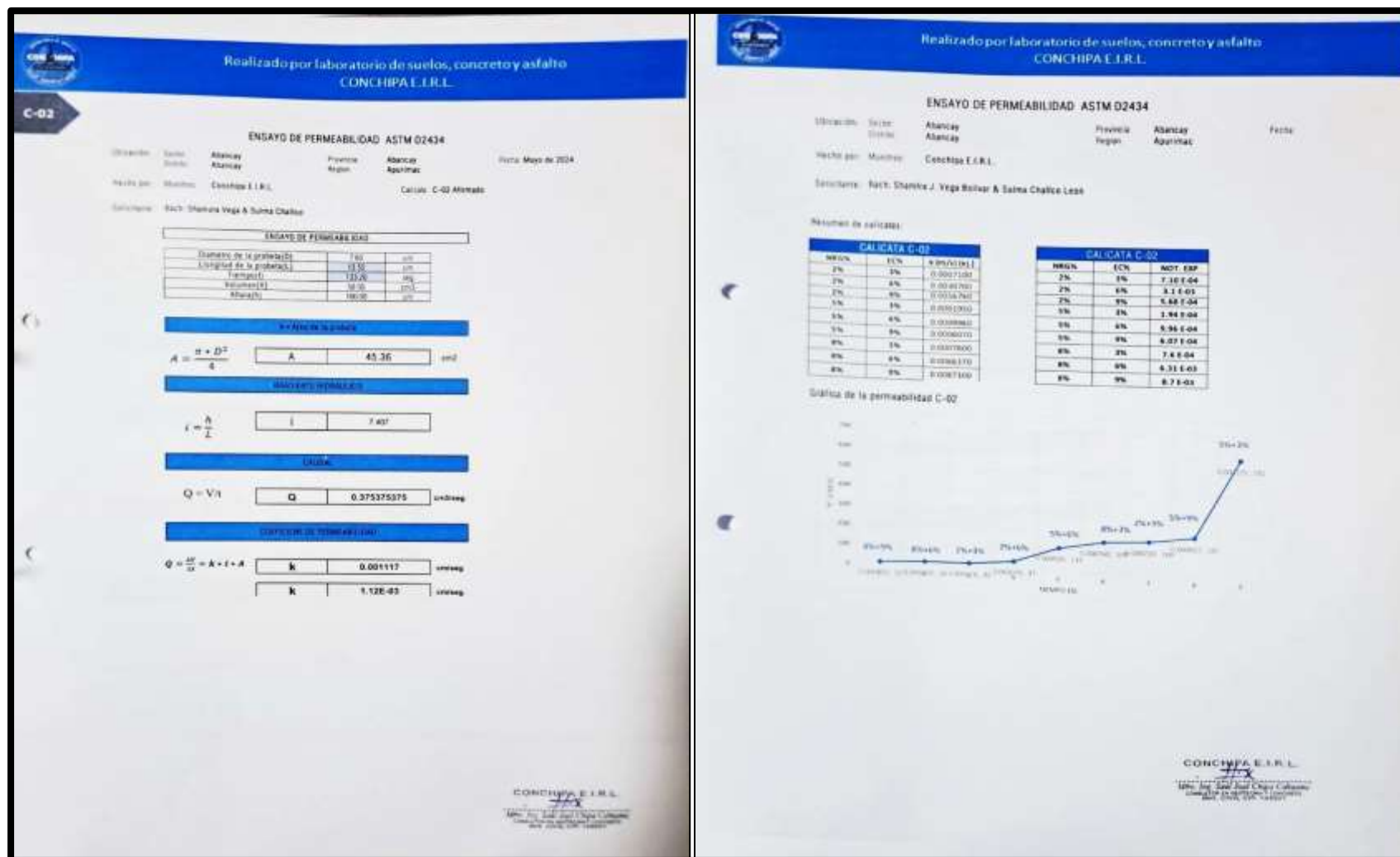


Figura 77 — Resultado de ensayos de laboratorio – permeabilidad (Af.+2%NRG+6%EC)




HOJA TECNICA DE EMULSION ASFALTICA IMPRIMANTE CQS

IMPERMEABILIZANTE ASFALTICO PARA CUBIERTAS, TERRAZAS, FISURAS, GRIETAS, MADERA Y METAL DE FACIL APLICACIÓN

DESCRIPCION DEL PRODUCTO Y USO
 La emulsion CQS es un tipo de emulsion asfáltica a base de agua es un producto que no se cristaliza con el tiempo ya que cuenta con un polímero en su composición generando la impermeabilización permanente de la estructura a utilizar.

CARACTERISITICAS Y ESPECIFICACION ASTM Y MTC CQS-1HP

ENSAYOS	MÉTODO		EMULTEC CQS-1HP	
	ASTM	MTC	MÍNIMO	MÁXIMO
Ensayos sobre la emulsión				
Viscosidad Saybolt Furol a 25°C, ssf	D 7496	E 403	20	100
Destilación	- Contenido de asfalto residual, %	D 6997	E 401	62
	- Contenido de disolventes, %	D 6997	E 401	—
Estabilidad al almacenamiento, 24 horas, %	D 6930	—	—	1
Prueba del tamiz N°20, %	D 6933	E 405	—	0.1
Carga de partícula	D 7402	E 407	Positiva	
Ensayos sobre el residuo de emulsión				
Penetración, 25°C, 100 g, 5 s, dmm	D 5	E 304	40	90
Punto de ablandamiento, °C	D 36	E 307	57	—
Ductilidad, 25°C, 5 cm/min, cm	D 113	E 306	40	—
Solubilidad en Tricloroetileno, %	D 2042	E 302	97.5	—

INFORMACION DEL PRODUCTO
 Color
marrón oscuro

Cilindro de 55 Glns y balde de 4.5 Glns
200 kg y 18.5 kg

CORPORC ASFALTO & EMULSIONES S.A.C
www.corporc.com / www.asfaltoemulsioncorporc.com / asfaltoemulsioncorporc@gmail.com
 e-mail: asfaltosc@corporc.com




INSTRUCCIONES DE APLICACIÓN

CONSUMO:

EMULSION CORPORC CQS : Para imprimaciones o generación de impermeabilizaciones de tejados o terrazas 1:3 (Emulsion y Agua) 2.5mm . aplicación con rodillo o equipo aspersor.

Para imprimaciones con geotextil manto asfáltico 1:2 (Emulsion y Agua) 5mm . aplicación con paletas de gebo o rodillo.

Para recubrimiento e impermeabilizaciones de galpones maderas lugares expuestos a las sales , aplicar ¼ / ¼ (Emulsion y agua) aplicación con una brocha.

Para la aplicación de 2 capas de podrá diluir hasta en un 50 %

El rendimiento por m2 es de 200 litros para un área de 200 m2 , un cilindro de **EMULSION CORPORC CQS** para un área de 300 m2 a dos capas en relación 1:3 5 mm (Emulsion y Agua) para impermeabilizar tejados terrazas expuestos al tránsito de personas y evita la exudación.

Dejar secar un promedio de 8 horas con mínimo para aplicación de siguiente capa a 20°C , no mezclar con otras emulsiones

Nota: Limpiar la zona a trabajar antes de la aplicación para mayor adherencia y evitar el desprendimiento de la película formada.

ALMACENAMIENTO Y SALUD
 Mantener el producto en sombra libre de exposición al sol tapado 20 C.
 Agitar y mover el producto antes de su aplicación.
 Utilizar guantes y lentes, evitar el contacto con los ojos

La dosificación y preparación se basa en métodos aplicados por el personal técnico y operativo de CORPORC S.A.C en caso se tenga un diseño de laboratorio las condiciones de preparación tendrán un cambio y se basaran en los ensayos de calidad de agregados, emulsion asfáltica y los estándares del diseño del proyecto o construcción ASTM MTC

EG2013.

CORPORC S.A.C
 ANTONIO CALVO CABRE
 GERENTE GENERAL

CORPORC ASFALTO & EMULSIONES S.A.C
www.corporc.com / www.asfaltoemulsioncorporc.com / asfaltoemulsioncorporc@gmail.com
 e-mail: asfaltosc@corporc.com

Figura 78 — Hoja técnica de la emulsión asfáltica imprimante CQS





Anexo E

DECLARACION DE ORIGINALIDAD DE AUTOR

	<p>UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA</p> <p>ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL</p>	
<p>DECLARATORIA DE ORIGINALIDAD DE AUTOR</p> <p>Yo, Shamira Jaudry Vega Bolivar, con DNI: 72324493, bachiller de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, con código de estudiante: 141357, declaro bajo juramento que todos los datos e información que acompañan al trabajo de investigación de tesis titulado:</p> <p>“Estabilización e impermeabilización de la capa de afirmado con neumático reciclado granular y emulsión catiónica en vía vecinal AP-650, Abancay - Apurímac, 2025”</p> <p>Es de mi autoría, por lo tanto, declaro que el presente trabajo de tesis:</p> <ul style="list-style-type: none">• No ha sido plagiado, ni parcialmente, ni total.• No ha sido publicada ni presentada anteriormente para la obtención de otro grado académico o título profesional• En la investigación se menciona todas las fuentes empleadas, identificada correctamente toda cita textual o de paráfrasis proveniente de otras fuentes.• En la investigación se mantuvo una fidelidad en la recolección y procedimiento de los datos presentados, los resultados no han sido falseados, ni duplicados, ni copiados, fueron hechos de manera fiel y precisa, garantizando así la validación de los resultados. <p>En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de información aportada, por lo cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac.</p> <p>Abancay <u>30</u> de <u>Agosto</u>..... del 2025</p> <p> Shamira Jaudry Vega Bolivar DNI: 72324493</p> <p> Huella dactilar</p>		

Figura 79 — Declaratoria de originalidad del autor 1

 UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL 

DECLARATORIA DE ORIGINALIDAD DE AUTORES

Yo, Sulma Chalco León, con DNI: 73545697, bachiller de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, con código de estudiante: 111392, declaro bajo juramento que todos los datos e información que acompañan al trabajo de investigación de tesis titulado:


“Estabilización e impermeabilización de la capa de afirmado con neumático reciclado granular y emulsión catiónica en vía vecinal AP-650, Abancay - Apurímac, 2025”

Es de mi autoría, por lo tanto, declaro que el presente trabajo de tesis:

- No ha sido plagiado, ni parcialmente, ni total.
- No ha sido publicada ni presentada anteriormente para la obtención de otro grado académico o título profesional
- En la investigación se menciona todas las fuentes empleadas, identificada correctamente toda cita textual o de paráfrasis proveniente de otras fuentes.
- En la investigación se mantuvo una fidelidad en la recolección y procedimiento de los datos presentados, los resultados no han sido falseados, ni duplicados, ni copiados, fueron hechos de manera fiel y precisa, garantizando así la validación de los resultados.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de información aportada, por lo cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac.

Abancay 30 de Agosto del 2025


.....
Sulma Chalco León
DNI: 73545697




Huella dactilar

Figura 80 — Declaratoria de originalidad del autor 2

Anexo G

AUTORIZACION DE CONSENTIMIENTO PARA REALIZAR LA INVESTIGACION

INFORME N° 081-2024-PEPM-SGDU-MPA


10 JUL. 2025

DE : PERCY E. PEÑA MENA
FISCALIZADOR CATASTRAL


ASUNTO REFERENCIA : PERMISO DE APERTURA DE CALICATA EN FINES DE INVESTIGACION
: SOLICITUD DE PERMISO PARA REALIZAR APERTURA DE CALICATA PARA TRABAJO DE INVESTIGACION

FECHA : Abancay, 10 de julio del 2025.

Mediante el presente me dirijo a usted, con la finalidad de informarle que la solicitud presentada para realizar apertura de calicata para el trabajo de investigación a la señorita Shamira Jaudry Vega Bolivar identificada con DNI: 72324493 y la señorita Sulma Chalco León identificada con DNI: 73545697, el lugar a solicitar es Av Jorge Chavez (antiguo desvio de Illanya) se realizara el día sábado 24 de febrero del año en curso.

Es cuanto informo a Ud. Para su conocimiento y fines consiguientes

Atentamente


Percy E. Peña Mena
FISCALIZADOR CATASTRAL DE DESARROLLO URBANO

