

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

**EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FOTOCATALÍTICAS Y
MECANICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CON
ADICIÓN DEL DIOXIDO DE TITANIO PARA CARPETAS
ASFÁLTICAS DE PAVIMENTOS FLEXIBLES, CUSCO-2022**

PRESENTADO POR:

Br. JOSE PANTOJA OLAVE

Br. ALEJANDRO MARCIAL AGUILAR ZAMBRANO

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO CIVIL**

ASESOR:

Mgt. Ing. MIJAIL ELIO ROZAS GOMEZ

FINANCIADO POR PROGRAMA

YACHAYNINCHIS WIÑARINAMPAQ – UNSAAC

CUSCO – PERÚ

2025



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el Asesor Mgt. Ing. Mijail Elio Rojas Gomez
..... quien aplica el software de detección de similitud al
trabajo de investigación/tesis titulada: EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES
FOTOCATALÍTICAS Y MECANICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE
CON ADICIÓN DEL DIOXIDO DE TITANIO PARA CARPETAS ASFÁLTICAS DE
PAVIMENTOS FLEXIBLES, CUSCO - 2022

Presentado por: Jose Pantoja Olave DNI N° 46891876;
presentado por: Alejandro Narcial Aguilar Zambrano DNI N°: 46103621
Para optar el título Profesional/Grado Académico de INGENIERO CIVIL

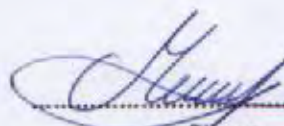
Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 2 veces, mediante el
Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de**
Similitud en la UNSAAC y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 10%.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a
grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 15 de enero de 2026


Firma

Post firma Mgt. Ing. Mijail Elio Rojas Gomez

Nro. de DNI 46035754

ORCID del Asesor 0000-0002-3582-2907

Se adjunta:

- Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
- Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: oid: 27259:546448531

EVALUACION PROPIEDADES FOTOCATALITICAS Y MECANICAS DE UNA MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE CON ...

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:546448531

Fecha de entrega

15 ene 2026, 11:13 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

15 ene 2026, 11:28 a.m. GMT-5

Nombre del archivo

EVAL. PRO. FOTOCATALITICAS Y MECANICAS DE UNA MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE CON ADICI....pdf

Tamaño del archivo

15.4 MB

216 páginas

46.572 palabras

257.374 caracteres




10% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe


- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 11 palabras)

Fuentes principales

- 7%  Fuentes de Internet
- 2%  Publicaciones
- 7%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

-  **Texto oculto**
49 caracteres sospechosos en N.º de páginas
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

RESUMEN

La presente investigación busca evaluar las propiedades fotocatalíticas y mecánicas de una mezcla asfáltica en caliente con adición de dióxido de titanio (TiO_2) para pavimentos flexibles de la ciudad del Cusco, en respuesta a los elevados niveles de contaminación atmosférica asociados a la presencia de óxidos de nitrógeno (NO_x), compuestos orgánicos volátiles (COVs) y material particulado, que derivan del parque automotor y la actividad urbana. Se desarrolló una investigación aplicada, de nivel explicativo y con diseño cuasi – experimental; se prepararon muestras con cinco niveles de adición de dióxido de titanio (0%, 2%, 4%, 6% y 8%) con tres repeticiones por nivel para los ensayos de estabilidad, flujo, autolimpieza y purificación del aire, posteriormente se fabricaron 6 muestras para los ensayos de módulo resiliente y resistencia a la tensión, conformando un total de 11 muestras. Los resultados muestran que la estabilidad y flujo presentan un equilibrio para la dosificación de 2% de TiO_2 . El módulo resiliente incrementa de 10% y 15% respecto a la mezcla convencional, indicando una mayor capacidad de recuperación elástica y menor riesgo de deformación permanente. Asimismo, se evidencia una mejor resistencia al daño por humedad con valores superiores de ITS y TSR. Con respecto a las propiedades fotocatalíticas, se alcanzaron degradaciones de 20.32% y 72.45% (R4 y R26), confirmando la capacidad de autolimpieza sin afectar las propiedades mecánicas. Finalmente, se logró una degradación promedio de 50.59% de contaminante dióxido de nitrógeno para 2 horas de exposición, demostrando un aporte significativo en la purificación del aire.

Palabras clave: Dióxido de titanio, Fotocatálisis, Autolimpieza, Purificación del aire, Módulo resiliente.

ABSTRACT

This research aimed to evaluate the photocatalytic and mechanical properties of a hot-mix asphalt with the addition of titanium dioxide (TiO_2) for flexible pavements in the city of Cusco, in response to the high levels of air pollution associated with nitrogen oxides (NO_x), volatile organic compounds (VOCs), and particulate matter derived from the vehicle fleet and urban activities. An applied, explanatory study with a quasi-experimental design was conducted. Samples were prepared with five levels of TiO_2 addition (0%, 2%, 4%, 6%, and 8%) with three repetitions per level for the tests of stability, flow, self-cleaning, and air purification. Subsequently, six samples were fabricated for resilient modulus and tensile strength tests, resulting in a total of 11 conceptual samples. The results show that stability and flow reach an optimal balance at 2% TiO_2 dosage. The resilient modulus increased by 10%–15% compared to the conventional mix, indicating greater elastic recovery and a lower risk of permanent deformation. Additionally, improved resistance to moisture damage was observed, with higher ITS and TSR values. Regarding photocatalytic properties, degradations of 20.32% and 72.45% (R4 and R26) were achieved, confirming self-cleaning capacity without compromising mechanical properties. Finally, an average degradation of 50.59% of nitrogen dioxide was obtained after 2 hours of exposure, demonstrating a significant contribution to air purification.

Keywords: Titanium dioxide; Photocatalysis; Self-cleaning; Air purification; Resilient modulus.

DEDICATORIA

A Dios, por ser mi guía constante y por bendecir mi camino con salud, bienestar y fortaleza; por cuidar de quienes amo y sostenerme en cada etapa de este proceso.

A mis padres, por sus consejos que siempre iluminan mis decisiones y por su apoyo firme, paciente y amoroso, incluso en los momentos difíciles.

A Elisabeth, por su presencia invariable tanto en los días decisivos como en los más sencillos; por su apoyo incondicional, su compañía y su confianza en mí cuando la necesité.

AGUILAR ZAMBRANO ALEJANDRO MARCIAL

Para el motorcito de mi vida, por quien nace cada esfuerzo y a quien va dedicado cada logro alcanzado, mi hija Maia Catalina, cuya alegría y amor son la mayor motivación para seguir adelante y superarme cada día.

A mis padres y hermanos, por su apoyo incondicional y constante, acompañándome en cada dificultad y alegría de mi vida.

Y a mi compañera de vida, Katherine, con quien deseo seguir creciendo, compartiendo metas y aprendizajes por el camino que recorreremos juntos.

PANTOJA OLAVE JOSE

AGRADECIMIENTOS

*A Dios, por acompañarme en cada etapa de este camino,
fortalecerme en los momentos de duda y permitirme alcanzar
un paso más en mi crecimiento personal y profesional.*

*A mis padres, por esperar siempre lo mejor de mí, por sus
conversaciones sinceras que me orientaron cuando más lo
necesitaba y por sus buenos deseos que impulsaron cada uno
de mis esfuerzos.*

*A Elisabeth, por acompañarme siempre paciente, por
ofrecerme claridad y tranquilidad en los días confusos y por
sostener mi ánimo con confianza serena que hizo posible
avanzar incluso cuando el camino parecía largo.*

AGUILAR ZAMBRANO ALEJANDRO MARCIAL

*Agradezco a los docentes de la carrera, quienes, a través de
sus conocimientos y enseñanzas, contribuyeron de manera
significativa a mi formación profesional.*

*De manera especial, agradezco a mi familia, por su apoyo
incondicional, comprensión y motivación constante durante
todo este proceso académico.*

*Expreso un agradecimiento sincero a mi compañera de vida,
Katherine, por su apoyo, paciencia y aliento permanente,
fundamentales para la culminación de este trabajo.*

PANTOJA OLAVE JOSE

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	II
ABSTRACT	III
DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTO	V
CAPÍTULO I. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	17
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	17
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	18
1.2.1. <i>Problema general</i>	18
1.2.2. <i>Problemas específicos</i>	18
1.3. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN	19
1.3.1. <i>Alcance geográfico</i>	19
1.3.2. <i>Alcance del estudio</i>	20
1.3.3. <i>Insumos principales</i>	20
1.3.4. <i>Alcance de pruebas y ensayos</i>	21
1.4. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN	22
1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	23
1.5.1. <i>Objetivo general</i>	23
1.5.2. <i>Objetivos específicos</i>	23
1.6. FORMULACIÓN DE LAS HIPÓTESIS.....	24
1.6.1. <i>Hipótesis general</i>	24
1.6.2. <i>Hipótesis específicas</i>	24
1.7. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	24
1.7.1. <i>Justificación Teórica</i>	24
1.7.2. <i>Justificación Metodológica</i>	26
1.7.3. <i>Justificación Práctica</i>	27
1.8. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS	28
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	31
2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	31
2.1.1. <i>Antecedentes internacionales</i>	31
2.1.2. <i>Antecedentes nacionales</i>	33

2.2. BASES TEÓRICAS	34
2.2.1. <i>Contaminación ambiental y el transporte</i>	34
2.2.2. <i>Componentes orgánicos contaminantes del pavimento</i>	35
2.2.3. <i>Contaminación atmosférica por óxidos de nitrógeno</i>	36
2.2.4. <i>Mezclas asfálticas en caliente</i>	37
2.2.4.1. <i>Agregados.....</i>	38
2.2.4.2. <i>Granulometría.....</i>	39
2.2.4.3. <i>Cemento asfáltico.....</i>	41
2.2.5. <i>Diseño Marshall</i>	42
2.2.5.1. <i>Parámetros volumétricos en mezclas asfálticas</i>	44
2.2.6. <i>Dióxido de titanio (TiO₂)</i>	51
2.2.6.1. <i>Fotocatálisis</i>	53
2.2.6.2. <i>Propiedades fotocatalíticas</i>	54
2.2.6.3. <i>Autolimpieza</i>	55
2.2.6.4. <i>Purificación del aire</i>	57
2.2.7. <i>Propiedades mecánicas</i>	59
2.2.7.1. <i>Estabilidad</i>	59
2.2.7.2. <i>Flujo</i>	60
2.2.7.3. <i>Ensayo Marshall para estabilidad y flujo</i>	60
2.2.7.4. <i>Módulo resiliente</i>	61
2.2.7.5. <i>Ensayo según para determinación del módulo resiliente</i>	61
2.2.7.6. <i>Resistencia a la tensión</i>	62
2.2.7.7. <i>Ensayo para determinación de la resistencia a la tensión</i>	63
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	64
3.1. IDENTIFICACIÓN DE LAS VARIABLES DE INVESTIGACIÓN	64
3.1.1. <i>Definición conceptual</i>	64
3.1.1.1. <i>Variable independiente</i>	64
3.1.1.2. <i>Variable dependiente</i>	64
3.1.1.3. <i>Unidad de análisis.....</i>	64
3.1.1.4. <i>Ámbito geográfico.....</i>	64
3.1.1.5. <i>Periodo</i>	64

3.1.2. Definición operacional.....	65
3.2. CLASIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	66
3.2.1. Tipo de investigación.....	66
3.2.2. Nivel de investigación.....	66
3.2.3. Diseño de investigación.....	66
3.3. POBLACIÓN Y MUESTRA.....	67
3.3.1. Población	67
3.3.2. Muestra	68
3.4. RECOLECCIÓN DE DATOS.....	68
3.4.1. Técnicas de recolección de datos	68
3.4.2. Instrumentos de recolección de datos.....	69
3.5. PROCESO DE PRUEBA DE HIPÓTESIS Y ANÁLISIS DE DATOS	69
CAPÍTULO IV. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN...	70
4.1. CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO MEDIANTE EL MÉTODO MARSHALL.....	70
4.1.1. Parámetros de diseño	70
4.1.2. Evaluación de los agregados.....	71
4.1.2.1. Durabilidad Al Sulfato De Magnesio.....	72
4.1.2.2. Abrasión los ángeles	73
4.1.2.3. Adherencia	73
4.1.2.4. Índice de durabilidad de agregado grueso.....	74
4.1.2.5. Partículas chatas y alargadas.....	75
4.1.2.6. Caras fracturadas	75
4.1.2.7. Sales solubles totales	76
4.1.2.8. Peso específico y absorción de agregado grueso	77
4.1.2.9. Equivalente de arena	78
4.1.2.10. Angularidad del agregado fino	79
4.1.2.11. Azul metileno	80
4.1.2.12. Índice de plasticidad (malla N°40).....	81
4.1.2.13. Índice de plasticidad (malla N°200).....	82
4.1.2.14. Índice de durabilidad de agregado fino	83
4.1.2.15. Gravedad específica y absorción de agregado fino	84
4.1.3. Selección de la granulometría.....	86

4.1.3.1. Cantidad de material fino (malla N°200)	86
4.1.3.2. Análisis granulométrico	86
4.1.3.3. Gradación.....	87
4.1.4. Evaluación del cemento asfáltico	88
4.1.4.1. Penetración de materiales bituminosos	88
4.1.4.2. Ductilidad de materiales bituminosos	88
4.1.5. Elaboración de probetas de mezcla asfáltica en caliente.....	89
4.1.6. Determinación de los parámetros volumétricos	95
4.1.7. Ensayo de estabilidad y flujo Marshall	96
4.1.8. Selección del contenido óptimo de asfalto.....	98
4.2. ELABORACIÓN DE MUESTRAS MODIFICADAS CON DIÓXIDO DE TITANIO	99
4.2.1. Descripción del dióxido de titanio empleado	99
4.2.2. Procedimiento de elaboración de muestras modificadas	100
4.2.3. Propiedades volumétricas de la mezcla modificada	101
4.2.3.1. Densidad máxima teórica	102
4.3. ENSAYOS DE PROPIEDADES FOTOCATALÍTICAS	104
4.3.1. Ensayo de autolimpieza.....	104
4.3.2. Ensayo de purificación del aire	108
4.4. ENSAYOS DE PROPIEDADES MECÁNICAS	113
4.4.1. Ensayo de estabilidad y flujo Marshall de la mezcla modificada.....	113
4.4.2. Ensayo de tracción indirecta para determinación del módulo resiliente	115
4.4.3. Ensayo Lottman modificado para determinación de la resistencia a la tensión	118
CAPÍTULO V. RESULTADOS	121
5.1. DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL	121
5.1.1. Evaluación de los agregados.....	121
5.1.1.1. Durabilidad al sulfato de magnesio agregado grueso.....	122
5.1.1.2. Abrasión los ángeles agregado grueso	122
5.1.1.3. Adherencia agregado grueso.....	123
5.1.1.4. Partículas chatas y alargadas.....	123
5.1.1.5. Índice de durabilidad agregado grueso	125

5.1.1.6. Caras fracturadas agregado grueso.....	125
5.1.1.7. Sales solubles total agregado grueso	125
5.1.1.8. Absorción de agregado grueso	126
5.1.1.9. Equivalente de arena agregado fino	126
5.1.1.10. Angularidad del agregado fino	126
5.1.1.11. Azul de metileno agregado fino.....	127
5.1.1.12. Durabilidad al sulfato de magnesio agregado fino	127
5.1.1.13. Sales solubles totales agregado fino.....	127
5.1.1.14. Absorción de agregado fino.....	128
5.1.2. Resultado de la selección de la granulometría.....	128
5.1.2.1. Análisis granulométrico agregado grueso.....	128
5.1.2.2. Análisis granulométrico agregado fino	129
5.1.2.3. Determinación de la dosificación.....	130
5.1.3. Resumen de datos para determinación de parámetros volumétricos	133
5.1.4. Ensayo de gravedad específica teórica máxima	133
5.1.5. Gravedad específica de la mezcla.....	134
5.1.6. Ensayo Marshall estabilidad y flujo	135
5.1.7. Resultados diseño de mezcla asfáltica convencional	136
5.1.8. Porcentaje óptimo de asfalto	137
5.2. RESULTADOS DEL DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA CON DIÓXIDO DE TITANIO (TiO ₂)	145
5.2.1. Dosificación de pobretas por porcentaje de TiO ₂ añadido.....	145
5.2.2. Características de los especímenes ensayados para los diferentes porcentajes de dióxido de titanio (TiO ₂).....	147
5.2.3. Gravedad específica teórica máxima para los diferentes porcentajes de adición de TiO ₂	147
5.2.4. Gravedad específica de la mezcla con adición de dióxido de titanio (TiO ₂)	148
5.3. EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FOTOCATALÍTICAS	149
5.3.1. Evaluación de la propiedad de autolimpieza	149
5.3.2. Evaluación de la propiedad de purificación de aire.....	150
5.3.2.1. Estimación de resultados de laboratorio en condiciones reales de campo.....	151
5.4. EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS	152

5.4.1. Estabilidad y flujo Marshall de mezclas con adición de TiO_2	152
5.4.2. Obtención del porcentaje óptimo de TiO_2	154
5.4.2.1. Parámetros volumétricos de la mezcla con adición de dióxido de titanio (TiO_2).....	154
5.4.2.2. Determinación del porcentaje óptimo de TiO_2	155
5.4.3. Obtención del módulo resiliente	160
5.4.4. Obtención de la resistencia a la tensión	166
CAPÍTULO VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	171
6.1.1. Estabilidad y flujo de una mezcla asfáltica en caliente con adición de dióxido de titanio	171
6.1.2. Módulo resiliente de una mezcla asfáltica en caliente con adición de dióxido de titanio	172
6.1.3. Resistencia a la tensión de una mezcla asfáltica en caliente con adición de dióxido de titanio	174
6.1.4. Eficiencia de autolimpieza de una mezcla asfáltica en caliente con adición de dióxido de titanio	175
6.1.5. Capacidad de purificación del aire de una mezcla asfáltica en caliente con adición de dióxido de titanio	176
6.2. VALIDACIÓN DE LAS HIPÓTESIS.....	177
CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	178
7.1. CONCLUSIONES	178
7.2. RECOMENDACIONES	180
CAPÍTULO VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	182
CAPÍTULO IX. ANEXOS	188

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Cuadro de operacionalización de variables.....	65
Tabla 2 Valores de parámetros para el diseño Marshall	70
Tabla 3 Requerimientos para agregados Gruesos	71
Tabla 4 Requerimientos para agregados finos	72
Tabla 5 Gradaciones de agregados para mezclas asfálticas en caliente método Marshall.....	87
Tabla 6 Resumen del método de obtención de los parámetros volumétricos	96
Tabla 7 Resumen de características del TiO ₂ empleado	99
Tabla 8 Resumen de resultados agregado grueso Morro Blanco	121
Tabla 9 Resumen de resultados agregado fino Morro Blanco	121
Tabla 10 Resumen de resultados agregado fino Combapata.....	122
Tabla 11 Resistencia al sulfato de magnesio para agregado grueso cantera Morro Blanco	122
Tabla 12 Abrasión lo Ángeles para agregado grueso Morro Blanco – Gradación tipo B	122
Tabla 13 Adherencia agregado grueso para agregado grueso cantera Morro Blanco.....	123
Tabla 14 Porcentaje de partículas chatas según cantidad.....	123
Tabla 15 Porcentaje de partículas alargadas según cantidad.....	124
Tabla 16 Determinación porcentaje de partículas chatas y alargadas agregado grueso Morro Blanco	124
Tabla 17 Índice de durabilidad para agregado grueso cantera Morro Blanco	125
Tabla 18 Caras fracturadas agregado grueso cantera Morro Blanco	125
Tabla 19 Sales solubles totales agregado grueso cantera Morro Blanco	125
Tabla 20 Gravedad específica y absorción agregado grueso Morro Blanco.....	126
Tabla 21 Equivalente de arena agregado fino Morro Blanco y Combapata	126
Tabla 22 Angularidad agregado fino Morro Blanco y Combapata.....	126
Tabla 23 Azul de metileno agregado fino Morro Blanco y Combapata	127
Tabla 24 Durabilidad al sulfato de magnesio agregado fino cantera Combapata.....	127
Tabla 25 Sales solubles totales agregado fino cantera Combapata.....	127
Tabla 26 Gravedad específica y absorción agregado fino Morro blanco.....	128
Tabla 27 Gravedad específica y absorción agregada fino Combapata.....	128
Tabla 28 Material que pasa la malla N°200 agregado grueso cantera Morro Blanco.....	128
Tabla 29 Granulometría agregado grueso Morro Blanco.....	129
Tabla 30 Material que pasa la malla N°200 agregado fino cantera Morro Blanco.....	129

Tabla 31 Material que pasa la malla N°200 agregado fino cantera Combapata	129
Tabla 32 Granulometría agregado fino Morro Blanco.....	130
Tabla 33 Granulometría agregado fino Combapata	130
Tabla 34 Dosificación granulométrica según MAC - 2	131
Tabla 35 Resumen de datos de especímenes ensayados para determinación de parámetros volumétricos	133
Tabla 36 Gravedad específica teórica máxima (Gmm).....	133
Tabla 37 Gravedad específica de las muestras.....	134
Tabla 38 Estabilidad y flujo Marshall para las muestras asfálticas.....	135
Tabla 39 Resultados ensayo Marshall.....	136
Tabla 40 Resultados de parámetros obtenidos entre el 6% a 6.5%	140
Tabla 41 Parámetros de diseño Marshall	141
Tabla 42 Validación de resultados diseño de mezcla asfáltica convencional	145
Tabla 43 Dosificación de la mezcla con 0% de dióxido de titanio (TiO ₂).....	145
Tabla 44 Dosificación de la mezcla con 2% de dióxido de titanio (TiO ₂).....	145
Tabla 45 Dosificación de la mezcla con 4% de dióxido de titanio (TiO ₂).....	146
Tabla 46 Dosificación de la mezcla con 6% de dióxido de titanio (TiO ₂).....	146
Tabla 47 Dosificación de la mezcla con 8% de dióxido de titanio (TiO ₂).....	146
Tabla 48 Datos de las probetas con adición de dióxido de titanio (TiO ₂).....	147
Tabla 49 Gravedad específica teórica máxima para cada porcentaje de adición de dióxido de titanio (TiO ₂).....	147
Tabla 50 Gravedad específica de la mezcla para cada porcentaje de adición de dióxido de titanio (TiO ₂)	148
Tabla 51 Resultados de ensayo de autolimpieza.....	149
Tabla 52 Ensayo de purificación de aire para 1 hora de exposición	150
Tabla 53 Ensayo de purificación de aire para 2 hora de exposición	150
Tabla 54 Estabilidad y flujo Marshall para cada porcentaje de adición de dióxido de titanio (TiO ₂)	152
Tabla 55 Parámetros volumétricos para las mezclas con adición de TiO ₂	154
Tabla 56 Parámetros de diseño de mezcla con adición de TiO ₂ - porcentaje óptimo de 2%	160
Tabla 57 Módulo resiliente grupo de briquetas con mezcla convencional	162
Tabla 58 Módulo resiliente grupo de briquetas modificadas con dióxido de titanio (TiO ₂)	163

Tabla 59 Ensayo Lottman modificado	168
Tabla 60 Estadístico ensayo Lottman.....	168
Tabla 61 Matriz de consistencia.....	189

INDICE DE FIGURAS

Figura. 1	Diagrama de fases masa - volumen en una mezcla asfáltica	45
Figura. 2	Distribución de agregados, asfalto y vacíos de aire.....	45
Figura. 3	Esquema de funcionamiento del TiO ₂ en pavimentos	54
Figura. 4	Fraccionamiento del agregado.....	90
Figura. 5	Calentamiento de materiales y equipos de compactación	90
Figura. 6	Mezclado de los materiales.....	91
Figura. 7	Temperatura vs viscosidad cinemática	92
Figura. 8	Control de la temperatura de mezclado	93
Figura. 9	Compactado de probetas.....	94
Figura. 10	Enfriamiento de los especímenes a temperatura ambiente	95
Figura. 11	Probetas desmoldadas y numeradas.....	95
Figura. 12	Toma de datos de cada espécimen a ensayar.....	97
Figura. 13	Temperado de las muestras a 60°C.....	97
Figura. 14	Rotura de briquetas en el equipo Marshall	97
Figura. 15	Dosificación de mezclas de asfalto con adición de TiO ₂	100
Figura. 16	Pesado de muestras con asfalto.....	100
Figura. 17	Mezclado de agregados con adición de TiO ₂	101
Figura. 18	Desmolado de probetas con adición de TiO ₂	101
Figura. 19	Probetas de mezcla asfáltica con adición de TiO ₂ resultantes	101
Figura. 20	Equipo empleado para la elaboración del ensayo Rice	103
Figura. 21	Ensayo Rice a las probetas con adición de TiO ₂	104
Figura. 22	Aplicación de rodamina B a las probetas de asfalto y exposición a radiación UV-A.....	106
Figura. 23	Concentración de rodamina B para lectura en espectrofotómetro.....	107
Figura. 24	Lectura de absorbancia	107
Figura. 25	Cámara hermética de acero inoxidable.....	109
Figura. 26	Colocación de probetas en cámara hermética.....	111
Figura. 27	Detector de gases NO ₂ AQ-300	111
Figura. 28	Linterna de emisión UV-A con longitud de onda 365nm.....	112
Figura. 29	Registro de datos de las probetas con adición de TiO ₂	114
Figura. 30	Acondicionamiento de probetas en baño maría a 60°C.....	114

Figura. 31 Probetas de mezcla asfáltica convencional para determinación de módulo resiliente	116
Figura. 32 Probetas de mezcla asfáltica con adición de 2% de TiO_2 para determinación de módulo resiliente	117
Figura. 33 Ensayo para determinación de módulo resiliente – equipo triaxial	117
Figura. 34 Ensayo Lottman para tracción indirecta condición seca.....	120
Figura. 35 Curva granulométrica dosificada en función a la MAC - 2.....	132
Figura. 36 Peso específico de la muestra vs porcentaje de cemento asfáltico	137
Figura. 37 Porcentaje de vacíos vs porcentaje de cemento asfáltico	137
Figura. 38 Vacíos llenados con asfalto vs porcentaje de cemento asfáltico	138
Figura. 39 Vacíos en el agregado mineral vs porcentaje de cemento asfáltico.....	138
Figura. 40 Estabilidad vs porcentaje de cemento asfáltico	139
Figura. 41 Flujo vs porcentaje de cemento asfáltico.....	139
Figura. 42 Vacíos en el agregado mineral vs porcentaje óptimo de asfalto.....	142
Figura. 43 Vacíos llenados con asfalto vs porcentaje óptimo de asfalto	142
Figura. 44 Peso específico de la muestra vs porcentaje de óptimo asfalto	143
Figura. 45 Flujo vs porcentaje óptimo de asfalto	143
Figura. 46 Vacíos en la mezcla total vs porcentaje óptimo de asfalto	144
Figura. 47 Estabilidad vs porcentaje de óptimo asfalto	144
Figura. 48 Concentración de NO_2 para la ciudad del Cusco - UNSAAC	151
Figura. 49 Estimación degradación de NO_2 en condiciones de campo	152
Figura. 50 Peso específico de la mezcla vs porcentaje de dióxido de titanio (TiO_2)	155
Figura. 51 Vacíos de aire en la mezcla (V_a) vs porcentaje de dióxido de titanio (TiO_2)	155
Figura. 52 vacíos en el agregado mineral vs porcentaje de dióxido de titanio (TiO_2) ..	156
Figura. 53 Vacíos llenados con asfalto vs porcentaje de dióxido de titanio (TiO_2	156
Figura. 54 Flujo vs porcentaje de dióxido de titanio (TiO_2).....	157
Figura. 55 Estabilidad vs porcentaje de dióxido de titanio (TiO_2)	157
Figura. 56 Comparación de resistencia a la tensión con adición de TiO_2 y sin adición de TiO_2	169

CAPÍTULO I. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Planteamiento del problema

La contaminación ambiental representa una de las mayores preocupaciones de la sociedad, ya que es uno de los factores principales en el deterioro de la salud pública y el medio ambiente, ciudades en desarrollo presentan esta problemática debido a la propia actividad humana, mediante la generación de desechos, uso intensivo de combustibles fósiles y actividad industrial.

La ciudad del Cusco, siendo un importante centro turístico y cultural del país, no es ajena a esta realidad. El incremento del parque automotor y uso indiscriminado de combustibles, generan preocupación por los niveles de contaminación que rosan o en algunos casos sobre pasan los límites máximos permisibles. Zonas de alto tránsito vehicular, registraron concentraciones de dióxido de nitrógeno (NO_2) superiores a los límites horarios de $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ establecidos por el MINAM, especialmente en horas de mayor congestión vehicular (Olarte, 2024).

Contaminantes como los óxidos de nitrógeno (NO_x), compuestos orgánicos volátiles (COVs) y material particulado fino (PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$) no solo afectan la calidad del aire y salud de las personas, sino que también se depositan en las superficies aledañas como pavimentos, generando una superficie sucia, oscura y envejecida, afectando su durabilidad y funcionalidad.

Frente a esta problemática, el uso de tecnologías sostenibles toma una gran relevancia a fin de minimizar el impacto negativo de la contaminación en el medio ambiente. Una alternativa sostenible es el uso del dióxido de titanio (TiO_2), estudiado ampliamente en países de Europa y Asia, por su capacidad de inducir reacciones fotocatalíticas bajo radiación ultravioleta, degradando contaminantes como los óxidos de nitrógeno (NO_x) y compuestos

orgánicos volátiles (COVs), y contribuyendo en el proceso de autolimpieza superficial de contaminantes orgánicos y partículas adheridas a las superficies de pavimentos.

Actualmente este material sostenible no contempla estudios específicos para el contexto de la ciudad del Cusco, sobre todo su uso en pavimentos flexibles, impidiendo tomar decisiones informadas sobre tecnologías que mejoren la calidad del aire y contribuyan al mantenimiento y conservación de la estética del espacio urbano.

En el Perú, el dióxido de titanio (TiO_2) se encuentra disponible a través de distribuidores locales de insumos químicos ubicados principalmente en la ciudad de Lima, comercializándose en presentaciones de sacos de 25 kg y en envases menores de 1 kg para aplicaciones de laboratorio, con costos que se sitúan entre S/ 24 y S/ 30 por kg, dependiendo de tipo y pureza del material.

Por tal motivo, se plantea evaluar mediante pruebas experimentales las propiedades fotocatalíticas de mezclas asfálticas en caliente con adición de dióxido de titanio (TiO_2), enfocándonos en sus propiedades de autolimpieza y purificación del aire, asimismo, evaluar su compatibilidad con las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas bajo condiciones representativas de la ciudad del Cusco, con la finalidad de determinar su viabilidad y plantear su aplicación técnica para el contexto urbano, climático y ambiental de la ciudad del Cusco.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿Cuáles son las propiedades fotocatalíticas y mecánicas de una mezcla asfáltica en caliente con adición de dióxido de titanio para la carpeta de un pavimento flexible en la ciudad de Cusco?

1.2.2. Problemas específicos

PE-1: ¿Cómo varían la estabilidad y flujo de una mezcla asfáltica en caliente por la adición de dióxido de titanio en la carpeta de un pavimento flexible en la ciudad de Cusco?

PE-2: ¿Cuál es el módulo resiliente de una mezcla asfáltica en caliente con adición de dióxido de titanio en la carpeta de un pavimento flexible en la ciudad de Cusco?

PE-3: ¿Cuál es la resistencia a la tensión de una mezcla asfáltica en caliente con adición de dióxido de titanio en la carpeta de un pavimento flexible en la ciudad de Cusco?

PE-4: ¿Cuál es el nivel de autolimpieza de una mezcla asfáltica en caliente con adición de dióxido de titanio en la carpeta de un pavimento flexible en la ciudad de Cusco?

PE-5: ¿Cuál es la capacidad de purificación del aire de una mezcla asfáltica en caliente con adición de dióxido de titanio en la carpeta de un pavimento flexible en la ciudad de Cusco?

1.3. Alcance de la investigación

El alcance de la investigación comprende el estudio de las propiedades fotocatalíticas y mecánicas de una mezcla asfáltica en caliente modificada con dióxido de titanio, considerando únicamente su comportamiento en laboratorio. El trabajo abarca la caracterización de materiales, la elaboración de mezclas con diferentes proporciones del aditivo y la ejecución de ensayos físicos, mecánicos y fotocatalíticos establecidos por la normativa vigente, limitando su aplicación a condiciones controladas y sin evaluar su desempeño en campo.

1.3.1. Alcance geográfico

Esta investigación se encuentra enmarcada en las condiciones climáticas y medioambientales de la ciudad del Cusco, debido a que la investigación se realiza en esta ciudad, considerando:

- Temperatura media anual, que oscila entre 5 °C y 15 °C.
- Clima frío.
- Altitud entre 2500 a 3500 msnm.

1.3.2. Alcance del estudio

En referencia a los estudios a realizar, se encuentran delimitados los estudios de:

- Caracterización de los agregados finos y gruesos, para mezclas asfálticas en caliente.
- Diseño de una mezcla asfáltica en caliente mediante el método Marshall.
- Diseño de una mezcla asfáltica en caliente con adición de dióxido de titanio mediante el método Marshall.
- Comparación de las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica en caliente y una mezcla asfáltica en caliente con adición de dióxido de titanio.
- Determinación de las propiedades fotocatalíticas en muestras de mezclas asfálticas en caliente con adición de dióxido de titanio.

1.3.3. Insumos principales

Para los diseños, pruebas y ensayos se consideran los siguientes materiales:

- Agregados gruesos, provenientes de la cantera de Morro Blanco ubicada en el Distrito de San Salvador, de tipo canto rodado triturado.
- Agregado fino, proveniente de la cantera de Morro Blanco ubicada en el Distrito de San Salvador, de tipo canto rodado triturado.
- Arena fina, proveniente de la cantera de Combapata ubicada en el Distrito de Combapata, de tipo canto rodado triturado.
- Cemento asfáltico PEN 120 – 150, de consistencia media usado en climas de temperatura media anual entre 5°C y 15°C, según el Manual EG-2013, Tabla 415-01.
- Dióxido de titanio (TiO₂), de grado técnico.
- Rodamina B, para ensayo de autolimpieza según norma italiana UNI 11259-2016.
- Dióxido de Nitrógeno, obtenido mediante la reacción química del cobre con ácido nítrico, para ensayo de purificación del aire según norma ISO 22197-1:2016.

1.3.4. Alcance de pruebas y ensayos

Las pruebas y ensayos a realizar se encuentran indicados en la Sección 423 Pavimento de Concreto Asfáltico en Caliente, de la Norma EG-2013.

Ensayos para agregados gruesos:

- Durabilidad (al sulfato de magnesio) MTC E 209.
- Abrasión los Ángeles MTC E 207.
- Adherencia MTC E 517.
- Índice de durabilidad MTC E 214.
- Partículas chatas y alargadas en agregados MTC E 223.
- Caras fracturadas MTC E 210.
- Sales Solubles totales MTC E 219.
- Absorción MTC E 206.

Ensayos para agregados finos:

- Equivalente de arena MTC E 114.
- Angularidad del agregado fino MTC E 222.
- Azul de metileno AASTHO TP 57.
- Índice de plasticidad (malla N°40) MTC E 111.
- Índice de plasticidad (malla N°200) MTC E 111.
- Durabilidad (al sulfato de magnesio) MTC E 209.
- Índice de durabilidad MTC E 214.
- Sales solubles totales MTC E 219.
- Absorción MTC E 205.

Ensayos mezcla asfáltica:

- Contenido de asfalto y granulometría MTC E 502.
- Ensayo Marshall MTC E 504.

- Porcentaje de vacíos de aire en mezclas asfálticas compactadas densas y abierta MTC E 505.

Ensayos para determinar las propiedades mecánicas:

- Ensayo de módulo resiliente según norma AASHTO TP-31 “Método estándar para determinar el módulo resiliente de mezclas bituminosas mediante tensión indirecta”.
- Ensayo para determinación de la tensión según norma AASTHO T 283 “Método estándar de ensayo para la resistencia de mezclas asfálticas compactadas (HMA) al daño inducido por humedad”.

Ensayos para determinar las propiedades fotocatalíticas:

- Ensayo según la norma italiana UNI 11259-2016 “Determinación de la actividad fotocatalítica de las aglutinantes hidráulico – Método de prueba de Rodamina”.
- Ensayo según la norma ISO 22197-1:2016 “Método de ensayo para el rendimiento de purificación del aire de materiales fotocatalíticos semiconductores – parte 1: Eliminación de óxido nítrico (NO).

1.4. Limitaciones de la investigación

Para el desarrollo de la investigación se prevé la existencia de diversas limitaciones asociadas principalmente a la disponibilidad de equipos, insumos y condiciones de ensayo en los laboratorios de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC) y laboratorios externos de la ciudad. Estos factores afectan el desarrollo óptimo de las etapas mecánicas y fotocatalíticas del estudio, por lo que es necesario identificarlos previamente para planificar alternativas y garantizar la viabilidad del proyecto.

Entre las limitaciones previstas se tiene:

- Falta de equipo especializado para el ensayo de Módulo Resiliente, los laboratorios de la ciudad del cusco, incluido el laboratorio de la UNSAAC, no cuentan con el equipo

especializado para este ensayo, lo que obligó a gestionar el envío de las muestras a un laboratorio especializado en la ciudad de Lima.

- Ausencia de comercialización local de gas NO_2 en la ciudad del Cusco, lo que hará necesario fabricarlo en laboratorio siguiendo procedimientos controlados.
- Carencia de cámaras herméticas adecuadas en los laboratorios de la UNSAAC para los ensayos fotocatalíticos, por lo que será indispensable diseñar y construir una cámara hermética que permita cumplir con las condiciones experimentales requeridas.

1.5. Objetivos de la investigación

1.5.1. Objetivo general

Evaluar las propiedades fotocatalíticas y mecánicas de una mezcla asfáltica en caliente con adición de dióxido de titanio en la carpeta de un pavimento flexible en la ciudad de Cusco.

1.5.2. Objetivos específicos

OE-1: Determinar la estabilidad y flujo de una mezcla asfáltica en caliente con adición de dióxido de titanio en la carpeta de un pavimento flexible en la ciudad de Cusco.

OE-2: Analizar el módulo resiliente de una mezcla asfáltica en caliente con adición de dióxido de titanio en la carpeta de un pavimento flexible en la ciudad de Cusco.

OE-3: Medir la resistencia a la tensión de una mezcla asfáltica en caliente con adición de dióxido de titanio en la carpeta de un pavimento flexible en la ciudad de Cusco.

OE-4: Mejorar la eficiencia de autolimpieza de una mezcla asfáltica en caliente con adición de dióxido de titanio en la carpeta de un pavimento flexible en la ciudad de Cusco.

OE-5: Verificar la capacidad de purificación del aire de una mezcla asfáltica en caliente con adición de dióxido de titanio en la carpeta de un pavimento flexible en la ciudad de Cusco.

1.6. Formulación de las hipótesis

1.6.1. Hipótesis general

Las propiedades fotocatalíticas y mecánicas de una mezcla asfáltica en caliente se mejoran con la adición de dióxido de titanio en la carpeta de un pavimento flexible en la ciudad de Cusco.

1.6.2. Hipótesis específicas

HE-1: La estabilidad y flujo de una mezcla asfáltica en caliente se mejora por la adición de dióxido de titanio en la carpeta de un pavimento flexible en la ciudad de Cusco.

HE-2: El módulo resiliente de una mezcla asfáltica en caliente se incrementa por la adición de dióxido de titanio en la carpeta de un pavimento flexible en la ciudad de Cusco.

HE-3: La tensión de una mezcla asfáltica en caliente se favorece por la adición de dióxido de titanio en la carpeta de un pavimento flexible en la ciudad de Cusco.

HE-4: La autolimpieza de una mezcla asfáltica en caliente se mejora por la adición de dióxido de titanio en la carpeta de un pavimento flexible en la ciudad de Cusco.

HE-5: La capacidad de purificación del aire de una mezcla asfáltica en caliente se comprueba con la adición de dióxido de titanio en la carpeta de un pavimento flexible en la ciudad de Cusco.

1.7. Justificación de la investigación

1.7.1. Justificación Teórica

La contaminación atmosférica causada por la emisión de gases tóxicos es un problema global que afecta negativamente en la salud humana y la calidad de vida. Estudios realizados han demostrado una relación directa entre contaminantes atmosféricos, como los óxidos de nitrógeno (NO₂), con enfermedades cardiovasculares y respiratorias (OMS, 2021). Debido a esta problemática, es indispensable optar por soluciones efectivas que mitiguen estos contaminantes a fin de proteger el medio ambiente y la salud pública.

La ciudad del Cusco no es ajena a esta realidad, donde el incremento continuo del parque automotor viene intensificando la emisión de gases contaminantes, gases como los óxidos de nitrógeno (NO_x), óxidos de azufre (SO_x), óxidos de carbono (CO_x) y material particulado ($\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10}), representan los mayores responsables del deterioro de la calidad del aire (Poblete, y otros, 2024). Frente a este escenario se deben considerar medidas alternativas y sobre todo sostenibles, abordando el problema desde un punto de vista constructivo y urbano, promoviendo el uso de tecnologías que contribuyan a reducir la carga contaminante existente.

Una alternativa a considerar viene a ser el uso de materiales fotocatalíticos. La fotocatalisis se refiere al proceso fotoquímico donde un material expuesto a luz UV, genera una reacción química que descompone compuestos orgánicos e inorgánicos contaminantes, convirtiéndolos en compuestos menos nocivos como nitratos o agua (Fujishima, Zhang, & Tryk, 2008).

Los materiales comúnmente utilizados para aplicaciones fotocatalíticas son los compuestos de titano, como el dióxido de titanio (TiO_2), compuesto inorgánico es altamente eficiente en la absorción de luz solar, para generar reacciones químicas que facilitan la degradación de compuestos orgánicos y oxidar contaminantes en la atmosfera. Este compuesto ha demostrado ser muy eficaz en la degradación de contaminantes atmosféricos como los óxidos de nitrógeno (NO_x), y viene siendo aplicado en superficies expuestas como fachadas y pavimentos (Dalton, Janes, Nicholson, Hallam, & Allen, 2002).

Por lo tanto, la presente investigación busca destacar la capacidad del dióxido de titanio (TiO_2) para actuar como catalizador en reacciones químicas bajo la acción de la luz, transmitiendo estas propiedades fotocatalíticas a las mezclas asfálticas en caliente, para elaborar un pavimento asfáltico fotocatalítico, generando así una superficie auto limpiante

que, al estar expuesta a la contaminación, pueda degradar los gases y compuestos orgánicos contaminantes.

Asimismo, se buscará mejorar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas en caliente, ya que, de acuerdo a investigaciones anteriores, el dióxido de titanio puede interactuar con los agregados en mezclas asfálticas, mejorando la adherencia y la resistencia a la abrasión de la mezcla asfáltica, lo que resulta en una mayor durabilidad y resistencia a los daños mecánicos. Además, el dióxido de titanio también puede actuar como un agente de ligazón y aglutinante, lo que mejoraría la cohesión y la estabilidad de la mezcla asfáltica.

1.7.2. Justificación Metodológica

La investigación se enfocará en cómo la adición de dióxido de titanio puede aportar propiedades fotocatalíticas a la mezcla asfáltica y mejorar también las propiedades mecánicas de la mezcla. Se empleará el método Marshall para determinar las proporciones óptimas de agregados y asfalto, a su vez, se determinará como la adición del dióxido de titanio en diferentes proporciones, influye en las propiedades fotocatalíticas y mecánicas de la mezcla asfáltica, la evaluación de estas propiedades será de suma importancia para comprender su potencial en la construcción de carreteras.

La evaluación de las propiedades fotocatalíticas está referida a la determinación de la autolimpieza y purificación del aire, la evaluación de estas propiedades se efectuará mediante ensayos de laboratorio normalizados de medición de actividad fotocatalítica. La evaluación de la autolimpieza se realizará según la norma italiana UNI 11259-2016 mediante el cual se determina la degradación de la rodamina B (colorante orgánico que se emplea como modelo de contaminante orgánico) en presencia de luz ultravioleta. Para la evaluación de la purificación del aire se cuenta con la norma ISO 22197-1:2016, la cual sirve para determinar la purificación del aire mediante la oxidación de gases NO_x en condiciones controladas.

Para la evaluación de las propiedades mecánicas, se efectuarán ensayos a muestras de mezcla asfáltica en caliente con adición de dióxido de titanio en diferentes proporciones. Se hará uso del aparato Marshall, que es un método estandarizado y ampliamente utilizado para evaluar la estabilidad y flujo de las mezclas asfálticas. Método que consiste en someter las muestras a una serie de cargas y evaluar la estabilidad y flujo de la mezcla. Donde la estabilidad se refiere a la capacidad de la mezcla para resistir la deformación bajo carga, mientras que el flujo se refiere a la capacidad de la mezcla para deformarse bajo carga. Ambos parámetros son indicativos de la resistencia y la durabilidad de la mezcla asfáltica y son cruciales para garantizar la durabilidad y la seguridad de las carreteras y otros pavimentos. Asimismo, para la determinación del módulo resiliente y resistencia a la tensión, se emplearán ensayos de tracción indirecta siguiendo los lineamientos de las normas AASHTO TP 31 Y AASHTO T 283 respectivamente.

La elección de los métodos utilizados para evaluar las propiedades fotocatalíticas y mecánicas de la mezcla asfáltica se basó en su capacidad para proporcionar una evaluación rigurosa y precisa de las propiedades de la mezcla. Además, los métodos elegidos tienen una amplia aceptación en la literatura y se han utilizado previamente en investigaciones similares.

1.7.3. Justificación Práctica

Esta investigación contribuirá a las investigaciones posteriores en el área de materiales fotocatalíticos y su aplicación en la construcción de pavimentos flexibles, lo que puede llevar a una mejora en la calidad y durabilidad de las carreteras y una reducción en su impacto ambiental.

Los resultados obtenidos a través del diseño Marshall permitirán tomar decisiones informadas sobre la selección y diseño de la mezcla asfáltica, incluyendo la proporción de dióxido de titanio más óptima para asegurar un correcto desempeño de la mezcla asfáltica en caliente.

La adición de dióxido de titanio a la mezcla asfáltica en caliente, puede tener un impacto significativo en la autolimpieza y purificación del aire mediante la degradación y reducción de gases y compuestos contaminantes presentes en la atmósfera, lo que puede contribuir a la mitigación de los efectos del cambio climático y la contaminación del aire.

Además de la capacidad para degradar de compuestos y gases contaminantes, la adición de dióxido de titanio también puede tener un impacto positivo en la estabilidad y flujo Marshall de las mezclas asfálticas en caliente, actuando como refuerzo en la mezcla, mejorando su resistencia a la deformación y la fractura.

Asimismo, el dióxido de titanio puede mejorar la resistencia química de la mezcla asfáltica, lo que puede ayudar a prevenir la degradación de la mezcla asfáltica debido a la exposición a contaminantes y otros factores ambientales. Todo esto puede resultar en un pavimento más duradero y resistente.

1.8. Definición de términos básicos

- **Absorbancia:** Representa una magnitud que mide la cantidad de luz absorbida por una solución cuando un haz de radiación atraviesa la muestra, mediante la absorbancia se determina la propiedad fotocatalítica de la autolimpieza.
- **Autolimpieza:** Una de las propiedades fotocatalíticas, referida a la eliminación o degradación de material contaminante de las superficies mediante la acción de la luz solar y el agua.
- **Catálisis:** Proceso químico en la que una sustancia denominada catalizador, acelera la velocidad de la reacción sin consumirse en dicha reacción.
- **Degradación:** Es el resultado global del proceso, que incluye una o varias reacciones (oxidación, ruptura de enlaces, reacciones intermedias) que transforman o eliminan el contaminante.

- **Dióxido de titanio (TiO_2):** Material inorgánico que actúa como catalizador con acción de la radiación ultra violeta para descomponer material contaminante.
- **Ensayo ISO 22197-1:** Norma internacional estándar usada para determinar la eficiencia de un material fotocatalítico bajo condiciones controladas de laboratorio, para degradar gases contaminantes como los óxidos de nitrógeno (NO_x).
- **Ensayo UNI 11259:** Norma italiana que sirve para evaluar la capacidad auto limpiante de materiales fotocatalíticos, mediante la decoloración de la rodamina B expuesta a luz ultra violeta.
- **Espectrofotómetro:** Equipo que mide la cantidad de luz absorbida o transmitida (absorbancia o transmitancia) por una muestra líquida a una determinada longitud de onda.
- **Espectrofotometría:** Técnica analítica que permite medir la cantidad de luz que una sustancia absorbe o transmite a determinadas longitudes de onda del espectro electromagnético, con el fin de identificar o cuantificar compuestos presentes en una muestra.
- **Fotocatálisis:** Proceso mediante el cual el dióxido de titanio (u otro material fotocatalítico), actúa como catalizador de reacciones químicas al ser expuesto a radiación ultra violeta, degradando compuestos orgánicos o contaminantes atmosféricos.
- **Material fotocatalítico:** Compuesto que posee la capacidad de acelerar reacciones químicas en su superficie al ser expuesto a radiación ultra violeta, descomponiendo materiales contaminantes del aire o el agua.

- **Módulo resiliente:** Indicador clave del comportamiento elástico del pavimento, ya que, representa la capacidad de una mezcla asfáltica de recuperar su forma inicial luego de ser sometida a cargas repetidas.
- **Dióxido de nitrógeno (NO₂):** Gas contaminando perjudicial para la salud humana y el medio ambiente, proviene de la quema de combustibles fósiles, principalmente del tráfico vehicular.
- **Oxidación:** Reacción química específica, en la que una sustancia pierde electrones, generalmente por acción de especies oxidantes.
- **Purificación del aire:** Propiedad de los materiales fotocatalíticos, como el dióxido de titanio, para degradar o reducir agentes contaminantes del medio ambiente, como los óxidos de nitrógeno (NO_x), óxidos de azufre (SO_x), compuestos orgánicos volátiles (COV_s), entre otros.
- **Radiación ultra violeta:** Tipo de energía presente en la luz solar, también producida artificialmente, con la capacidad de activar la fotocatálisis en materiales como el dióxido de titanio.
- **Rodamina B:** Colorante orgánico empleado como indicador de actividad fotocatalítica, mediante su decoloración ante el contacto con el dióxido de titanio y la exposición a radiación ultra violeta, midiendo de esta forma la eficiencia de la auto limpieza.
- **Tensión indirecta:** Propiedad mecánica de una mezcla asfáltica, que mide la resistencia ante esfuerzos de tracción, simulando condiciones de carga bajo tránsito vehicular.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. Antecedentes internacionales

- Rivera, Cruz, & Vega, (2023). “Modificación de la mezcla asfáltica por vía seca mediante la incorporación de dióxido de titanio”. (Artículo Científico), Ingeniería, Revista de la Universidad de Costa Rica. Esta investigación fue planteada con el objetivo de determinar las propiedades mecánicas y fotocatalíticas del asfalto modificado con dióxido de titanio mediante ensayos Marshall y degradación de rodamina B. Emplearon una metodología aplicada, con un diseño experimental y enfoque cuantitativo. Como población se tuvieron 24 especímenes en total: 6 muestras para cada porcentaje de adición de dióxido de titanio (0%, 2%, 4% y 8%). Concluyeron que la adición de dióxido de titanio para el 2%, 4% y 8% incrementaron la estabilidad con respecto a la muestra patron, evaluando que la adición de 2% representa la mejor opción, ya que, a pesar que las adiciones de 4% y 8% mejoran más la estabilidad, un incremento excesivo reduce la durabilidad del asfalto; en cuanto el flujo, la adición del 2% de dióxido de titanio incremento el flujo en un 1.07% siendo aceptable al estar dentro del rango permitido por norma.
- Diniz, (2020). “*Titanium dioxide as a modifier in asphalt mixtures: Mechanical behavior under aging conditions*”. (Tesis de maestría). Universidad Federal de Goiás, Brasil. En este estudio evaluaron el efecto de agregar dióxido de titanio (TiO₂) a mezclas asfálticas en caliente, como reemplazo parcial y total del filler, en proporciones de 2% y 3% en peso de la mezcla. Realizaron ensayos de resistencia indirecta a la tracción (ITS), susceptibilidad al daño por humedad, módulo resiliente, resistencia a la abrasión, vida a fatiga y resistencia a la

deformación permanente. Para evaluar el efecto del envejecimiento sobre la resistencia mecánica de las mezclas, aplicaron el protocolo de envejecimiento en horno a corto plazo. Según los resultados concluyeron que la adición de 2% y 3% de TiO₂ mejoró la ITS en un 7.41%. En cuando al módulo resiliente, observaron un aumento del 12% con la proporción de 2% de TiO₂, mientras que la proporción del 3% redujo este parámetro en un 19%.

- Rocha Segundo, (2021). “*Ecological, photocatalytic, superhydrophobic and self – cleaning asphalt pavement surfaces*”. (Tesis Doctorado), Universidade do Minho. Los autores enfocaron la investigación en la necesidad de desarrollar pavimentos asfálticos más sostenibles y funcionales para mejorar la calidad del aire urbano. Con este objetivo, investigaron mezclas asfálticas recicladas funcionalizadas con la incorporación de TiO₂ y ZnO, aplicadas mediante dos métodos: revestimiento pulverizado e incorporación por volumen de mezcla. Evaluaron las fotocatalíticas, superhidrofóbicas y autolimpiantes, analizando la capacidad de degradación de agentes contaminantes y mantener su superficie limpia. Con los resultados obtenidos, indicaron que la adición de TiO₂ y ZnO mejoraron la eficiencia fotocatalítica, permite la repulsión de agua y facilita la autolimpieza sin comprometer su desempeño estructural.
- Wang, Leng, Huben, & Oeser, (2017). “*Durability of epoxy – bonded TiO₂ – modified aggregate as a photocatalytic coating layer for asphalt pavement under vehicle tire polishing*”. (Artículo científico), RWTH Aachen, Germany. Centrarón la investigación en el desarrolló de pavimentos asfálticos fotocatalíticos purificadores de aire recubiertos con agregado modificado con TiO₂, evaluando su viabilidad y rendimiento. Aplicaron dos métodos para producir el agregado modificado con TiO₂: el recubrimiento superficial y el relleno de poros.

Investigaron y compararon su eficiencia fotocatalítica y el rendimiento mecánico bajo el pulido de neumáticos de vehículos, aplicado mediante una máquina de pulido de Aachen (APM). Concluyeron que es factible construir pavimientos fotocatalíticos duraderos utilizando el nuevo enfoque y proceso de esparcimiento de materiales reportados en este estudio. Ambos métodos de modificación con TiO_2 proporcionaron al agregado esparcido excelentes y comparables tasas de degradación de NO antes del pulido, sin embargo, el método de relleno de poros ofreció una mejor eficiencia de degradación de NO a largo plazo.

2.1.2. Antecedentes nacionales

- Cruz & Zaga, (2024). “Influencia del dióxido de titanio al 3%, 5%, 7% con respecto a las propiedades mecánicas y fotocatalíticas de la mezcla asfáltica en caliente con agregados de Abancay – Apurímac 2023”. (Título Profesional), Universidad Tecnológica de los Andes. La tesis se planteó como finalidad mejorar tanto las propiedades mecánicas como las fotocatalíticas de mezclas asfálticas en caliente mediante la adición de dióxido de titanio. Para ello, los autores desarrollaron un enfoque cuantitativo bajo un diseño experimental, trabajando con una muestra conformada por 72 especímenes de mezcla asfáltica, alguno elaborados con adición de dióxido de titanio y otros sin adición, utilizados como mezcla patrón. La adición del dióxido de titanio a la mezclas asfáltica en caliente fue realizada por vía seca, dosificándolo en función al agregado fino. Posteriormente llevaron a cabo pruebas de laboratorio con el fin de obtener los resultados necesarios para evaluar el comportamiento mecánico y fotocatalítico de los especímenes. Como parte de las conclusiones, los autores indican que la adición del 3% de dióxido de titanio generó mejores resultados de estabilidad superando a la mezcla patrón. En cambio, la incorporación del 5% produjo un

decremento del -7.11% en dicha propiedad. Asimismo, observaron que el flujo paso de 3.95mm a 5.4mm con la adición de 3% de dióxido de titanio, quedando fuera del rango de 2 – 4mm según su diseño en función al DG-2013.

- Paitampoma, (2023), “Alteraciones del focalizador dióxido de titanio en las características mecánicas en la mezclas asfálticas tanto en frio como caliente en la Av. Javier Prado Lima”. (Título Profesional), Universidad Peruana de Los Andes. Esta tesis tiene el propósito de comparar los efectos del fotocatalizador dióxido de titanio en las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas, para mezclas frías y calientes, en la avenida Leoncio Prado de Lima. El estudio presentó una metodología aplicada, con una muestra de 66 briquetas, con adición de 1%, 2% y 3% de dióxido de titanio, diseñadas por método Marshall para determinar sus propiedades mecánicas, asimismo, realizaron la prueba de degradación de rodamina B para la evaluación de la propiedad fotocatalítica. Una de sus conclusiones indica el cumplimiento de las propiedades fotocatalíticas para el ensayo de descomposición de rodamina B, el porcentaje óptimo de 2% de dióxido de titanio para mezclas en caliente dio valores de 38.16% y 96.09% para R4 y R26 respectivamente, asegurando la propiedad fotocatalítica ya que se tiene un R4 mayor al 20% y R26% mayor al 50%.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Contaminación ambiental y el transporte

La contaminación ambiental comprende una mezcla diversa de partículas sólidas, gotas líquidas y gases, que tienen distintas procedencias, como la quema de combustibles, actividad industrial, quemas a cielo abierto, escapes de vehículos y otros.

Por otra parte, para las zonas urbanas especialmente en desarrollo, el incremento del parque automotor presenta una gran relevancia en la contaminación ambiental, debido al uso

intensivo de vehículos motorizados, que generan la emisión de agentes contaminantes, que a su vez no presentan mecanismos sostenibles de mitigación, afectando directamente la calidad del aire y salud humana.

El sector transporte representa uno de los principales emisores de agentes contaminantes, como los óxidos de nitrógeno (NO_x), material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}) y compuestos orgánicos volátiles (COVs), los cuales afectan directamente al deterioro de la salud pública y contribuyen al cambio climático. En América Latina, la presencia de contaminantes en áreas urbanas en desarrollo ha alcanzado niveles críticos, generando la necesidad de optar por tecnologías limpias y materiales innovadores en los sistemas viales, el uso de materiales fotocatalíticos pueden contribuir a reducir los contaminantes atmosféricos y mejorar la recuperación climática de las ciudades (Calatayud, y otros, 2023).

Según un estudio desarrollado en los distritos de Cusco y Santiago, evaluando la contaminación atmosférica desde una perspectiva social y ambiental, se identificó una concentración elevada de dióxido de nitrógeno (NO₂), material particulado (PM_{2.5} y PM₁₀) y monóxido de carbono (CO), siendo la principal fuente el tránsito vehicular y la escasa vegetación urbana. Por otra parte, se evidencio una perspectiva social negativa sobre la contaminación, con énfasis en las enfermedades respiratorias (Poblete, y otros, 2024).

Debido a esta realidad, el uso de tecnologías limpias y sostenibles es de vital importancia para contribuir a la mitigación ambiental, el uso de mezclas asfálticas con adición de dióxido de titanio (TiO₂) representa un alternativa innovadora y viable, gracias a sus propiedades fotocatalíticas que promueven la purificación del aire y su potencial efecto en la autolimpieza de superficies viales.

2.2.2. Componentes orgánicos contaminantes del pavimento

Los componentes orgánicos contaminantes del pavimento corresponden a sustancias de origen orgánico que se depositan y acumulan sobre la superficie de los pavimentos,

principalmente en entornos urbanos con alta intensidad vehicular. Estos contaminantes provienen de la interacción entre el tránsito y el ambiente, incluyendo residuos de combustión incompleta, evaporación de combustibles y lubricantes, desgaste vehicular y la propia exposición del asfalto a la radiación solar y a temperaturas elevadas. Bajo condiciones actuales de servicio, dichos compuestos orgánicos se adhieren al polvo superficial del pavimento y pueden persistir en el tiempo, contribuyendo a la degradación estética de la superficie y a la generación de contaminación secundaria en el entorno urbano (Kumar, Goel, & Mishra, 2020).

Esta contaminación orgánica acumulada sobre los pavimentos urbanos tiene implicancias directas en la sociedad, ya que actúa como una fuente secundaria de emisión de contaminantes hacia el aire, especialmente bajo condiciones de alta radiación solar y tránsito intenso. Estos compuestos pueden contribuir al deterioro de la calidad del aire, incrementar la exposición de la población a sustancias potencialmente nocivas y afectar la percepción ambiental del entorno urbano, al favorecer la acumulación de suciedad y manchas visibles en la infraestructura vial. En conjunto, esta situación refuerza la necesidad de estrategias que mitiguen la presencia y persistencia de contaminantes orgánicos en los pavimentos, particularmente en ciudades con alta actividad vehicular.

2.2.3. Contaminación atmosférica por óxidos de nitrógeno

Los óxidos de nitrógeno (NO_x), principalmente el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂), son contaminantes atmosféricos generados mayoritariamente por procesos de combustión a altas temperaturas, como los producidos por el tránsito vehicular, motores diésel, centrales térmicas y actividades industriales. En entornos urbanos, el NO₂ es considerado el compuesto más relevante desde el punto de vista ambiental y sanitario, ya que participa en la formación de ozono troposférico y material particulado secundario, además de contribuir a fenómenos como la lluvia ácida. Debido a sus efectos adversos, los NO_x son

utilizados como indicadores clave de calidad del aire en normativas y sistemas de monitoreo ambiental (OMS, 2021).

La contaminación por óxidos de nitrógeno representa un problema significativo en áreas urbanas y zonas con tráfico intenso debido a que estos gases no solo afectan directamente la salud respiratoria de la población, sino que, al interactuar con otros contaminantes, favorecen la formación de ozono a nivel del suelo y partículas finas que penetran profundamente en los pulmones. En consecuencia, el NO_2 y otros NO_x se consideran indicadores clave de la calidad del aire y objetivos prioritarios en políticas ambientales destinadas a reducir la exposición humana y proteger la salud pública, especialmente en centros urbanos densamente poblados donde las emisiones vehiculares son predominantes.

2.2.4. Mezclas asfálticas en caliente

Consisten en una mezcla uniforme de agregados pétreos y ligantes asfálticos con fluidez y trabajabilidad en la mezcla, estos componentes deben ser previamente calentados a altas temperaturas; de ahí el nombre de mezclas asfálticas en caliente (CPA, 1985). Este tipo de mezclas es ampliamente usado en la construcción de carreteras gracias a su resistencia, durabilidad y comportamiento ante solicitudes de tráfico, pueden ser elaboradas en plantas móviles o fijas.

El tipo de agregado empleado debe ser de canto rodado triturado, los agregados retenidos en la malla N°4 son denominados agregados gruesos, mientras que, los que pasan la malla N°4 se denominan agregados finos o arena, a su vez, puede emplearse material filler y aditivos para mejorar las propiedades mecánicas de la mezcla, la proporción correcta de los agregados, filler y ligante asfáltico definen las propiedades mecánicas de la mezcla (Menéndez, 2016).

Para la presente investigación la mezcla asfáltica en caliente representa la base para la evaluación de la incorporación de dióxido de titanio a dicha mezcla, analizando su efecto en las propiedades mecánicas, así como, incorporando los beneficios de autolimpieza y purificación del aire.

2.2.4.1. Agregados

Los agregados corresponden a todo material granular de composición mineral, como grava, arena, filler o escoria, de procedencia natural o manufacturada y que combinados junto a un ligante forman mezclas de concreto o asfalto (Xiao, Punith, Amirkhanian, & Shen, 2012). Los agregados comprenden el mayor porcentaje en peso de una mezcla asfáltica, entre el 90% y 95% aproximadamente o en volumen entre el 75% a 85%; sus propiedades físicas son las que influyen directamente en el comportamiento mecánico del pavimento (Menéndez, 2016).

Los agregados para pavimentos flexibles deben poseer un alto grado de resistencia al desprendimiento de la película de asfalto en presencia de agua, denominado hidrófobos, las dolomitas, basaltos y calizas son usualmente agregados con mayor grado de resistencia al desprendimiento de la capa asfáltica (CPA, 1985).

Los agregados para el uso en las mezclas asfálticas en caliente se clasifican en:

- Agregado grueso.
- Agregado fino.
- Filler.

2.2.4.1.1. Agregado grueso

Material granular retenido en el tamiz N°4 (4.75mm), influye directamente en la resistencia estructural y estabilidad de la mezcla asfáltica, los agregados gruesos deben ser duros, limpios y de forma angular de modo que se tenga una buena adherencia entre el agregado y el asfalto.

La procedencia del agregado grueso deberá ser de roca o grava triturada o la combinación de ambos, deberán presentar una superficie limpia libre de polvo, tierra, arcilla o cualquier sustancia que limite su adherencia con el asfalto, se deberá evitar el exceso de partículas planas, alargadas y blandas (MTC, 2013).

2.2.4.1.2. Agregado fino

Porción de agregado que pasa el tamiz N°04 (4.75mm) y es retenido por el tamiz N°200 (0.075mm), rellena los espacios entre los agregados gruesos, contribuye a la trabajabilidad de la mezcla y mejora la cohesión con el asfalto.

Constituye la arena triturada o la mezcla de la misma con arena natural, sus granos deberán tener una consistencia dura, limpia y tener una superficie angular y rugosa, asimismo, deberá estar libre de cualquier sustancia que limite su adherencia con el asfalto (MTC, 2013).

2.2.4.1.3. Filler

Al igual que los agregados, el filler es un componente esencial de las mezclas asfálticas, representa el material muy fino que pasa por tamiz N°200 (0.075mm) y su función es principalmente rellenar los vacíos entre agregados gruesos, mejorando la cohesión y aportando en las características mecánicas de la mezcla.

Además de su función como material de relleno de vacíos, el filler influye en la viscosidad del cemento asfáltico y en la adherencia de los componentes de la mezcla, su proporción y tipo influyen significativamente en las propiedades volumétricas y mecánicas de la mezcla, como la estabilidad y flujo Marshall, resistencia al agua y módulo resiliente (Xiao, Punith, Amirkhanian, & Shen, 2012)

2.2.4.2. Granulometría

Se refiere a la distribución de los agregados en distintos tamaños de partículas, se determina mediante un proceso de tamizado, dicha distribución debe estar comprendida en un

rango granulométrico específico, dependiendo de la norma utilizada, la finalidad es generar una curva granulométrica debidamente distribuida que permita obtener una estabilidad, flujo, densidad y porcentaje de vacíos óptima, requerida por el método de diseño.

La granulometría de una muestra de agregado da como resultado el porcentaje de cada uno de los tamaños de partículas existentes de dicha muestra, la distribución de tamaños de partículas influye directamente en el comportamiento y desempeño de la mezcla asfáltica. (Menéndez, 2016).

Para el diseño de mezclas asfálticas, existen distintos tipos de granulometría:

- Densa; presenta una gradación amplia, permitiendo un grado de compactación alto y una baja permeabilidad.
- Abierta; con mayor cantidad de partículas gruesas y menos finos, obteniéndose una mezcla más porosa y permeable
- Discontinua; con ausencia de ciertas fracciones intermedias, influyendo en su comportamiento mecánico y es su textura superficial.

La distribución de los agregados es representada gráficamente mediante la curva granulométrica, que expresa el porcentaje de agregado que pasa por cada tamiz en función de su abertura. Mediante esta curva se puede comparar la granulometría obtenida con los límites especificadas por norma. Por ejemplo, para el método de diseño Marshall, se emplean intervalos de granulometrías establecidos, como la MAC-1, MAC-2 y MAC-3 (MTC, 2013).

Aunque el método Marshall es uno de los más empleados en la normativa peruana, otros métodos de diseño, como el Superpave o Haveem, presentan rangos granulométricos específicos, que están en función al tipo de tránsito, clima y materiales. (Roberts, Kandhal, Brown, Lee, & Kennedy, 1996).

Para todos los casos, la elección de una adecuada granulometría es fundamental para garantizar el desempeño y optimizar las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica, logrando cumplir con los requisitos de resistencia, durabilidad y funcionalidad del pavimento.

2.2.4.3. *Cemento asfáltico*

El asfalto se refiere al ligante hidrocarbonado que mantiene unidos los agregados pétreos de la mezcla asfáltica, proporcionando cohesión, permeabilidad y flexibilidad. Es de origen natural o refinado del petróleo, su característica principal es ser viscoso y termoplástico.

Para su uso en mezclas asfálticas en caliente, el cemento asfáltico debe cumplir con parámetros específicos de penetración, punto de ablandamiento, viscosidad y ductilidad (ASTM D946, 2020).

La temperatura influye directamente en el comportamiento del cemento asfáltico, altas temperaturas disminuyen su viscosidad, facilitando su mezcla con los agregados, por otro lado, bajas temperaturas aumentan su rigidez, lo que puede generar fisuras. Su interacción con el dióxido de titanio puede modificar sus propiedades adhesivas y reológicas (Jalili, Moghaddam, & Goli, 2020).

El comportamiento del cemento asfáltico se define mediante parámetros como la viscosidad (ASTM D4402 y D2171), penetración (ASTM D5), punto de ablandamiento (ASTM D36), destilación (ASTM D402) y punto de inflamación (ASTM D92), mediante estos ensayos se puede determinar el grado de consistencia, estabilidad térmica y seguridad en la manipulación (Roberts, Kandhal, Brown, Lee, & Kennedy, 1996).

Para este trabajo de investigación, el cemento asfáltico actuará como medio de dispersión del dióxido de titanio, evaluando como la interacción entre ambos aportará a la mezcla asfáltica propiedades fotocatalíticas, así como, influirá en las propiedades mecánicas de la mezcla, bajo condiciones climáticas de la ciudad del Cusco.

2.2.5. Diseño Marshall

Consiste en un método de dosificación de mezclas asfálticas en caliente, teniendo como propósito lograr una óptima gradación de agregados y el ligante asfáltico, obteniendo un equilibrio entre resistencia, ductilidad y durabilidad. Mediante este diseño se pretende obtener una mezcla estable capaz de resistir deformaciones plásticas, con fluencia y manejabilidad adecuada para su construcción y puesta en servicio.

Según normas técnicas, el método Marshall se basa en la elaboración de probetas cilíndricas con dimensiones normalizadas y distintos porcentajes de ligante asfáltico, las cuales son ensayadas a temperatura controlada, determinando su estabilidad (máxima carga que soporta la probeta antes de fallar) y su flujo (deformación resultante de la carga máxima aplicada), adicionalmente para determinar el contenido óptimo de asfalto se deberán definir los parámetros volumétricos de vacíos en la mezcla, vacíos en el agregado mineral y vacíos llenos de asfaltos. El porcentaje óptimo de asfalto resultará del análisis de la intersección de los criterios de estabilidad, flujo, contenido de vacíos y vacíos llenos de asfalto, eligiendo el porcentaje de asfalto que satisfaga simultáneamente cada parámetro (Menéndez, 2016).

Para el desarrollo de esta investigación, el diseño Marshall permitirá determinar de forma eficiente el porcentaje óptimo de dióxido de titanio (TiO_2) como sustitución parcial del filler, analizando su influencia en el contenido óptimo de asfalto, compactabilidad, estabilidad y flujo de la mezcla. Los posibles cambios en la densificación, propiedades volumétricas o interacción ligante – agregado, podrán ser identificados y atribuidos al TiO_2 , diferenciándolo de las variaciones propias de la gradación o tipo de agregado. De tal forma, se garantiza que la evaluación de las propiedades fotocatalíticas se realice sobre mezclas con propiedades mecánicas equivalentes, asegurando la compatibilidad de los resultados.

Proceso del Diseño Marshall:

- **Selección de Agregados y Ligantes:** Se eligen cuidadosamente los agregados y el ligante asfáltico según las especificaciones del proyecto.
- **Mezclado y Compactación:** Se prepara la mezcla asfáltica en caliente y se compacta en moldes cilíndricos a diferentes niveles de densidad y contenido de ligante.
- **Ensayos de Estabilidad y Flujo:** Se realizan ensayos de estabilidad y flujo en las probetas compactadas para evaluar la resistencia y la deformación de la mezcla.
- **Determinación de Parámetros:** Se determinan parámetros como la estabilidad, flujo, vacíos de aire y densidad máxima para seleccionar la mezcla óptima.
- **Análisis y Ajustes:** Se analizan los resultados y se realizan ajustes en la composición de la mezcla para cumplir con los requisitos de resistencia y durabilidad.

El diseño Marshall es una herramienta fundamental en la ingeniería de pavimentos, ya que permite optimizar la composición de las mezclas asfálticas para garantizar la calidad y el rendimiento de los pavimentos construidos con este material (Raposerias, Movilla, Vargas, Bilbao, & Cifuentes, 2017).

Beneficios del diseño Marshal en el cemento asfáltico:

- **Optimización de la Composición de la Mezcla:**

El diseño Marshall permite determinar la proporción óptima de cemento asfáltico y agregados en la mezcla asfáltica; esto asegura que la mezcla tenga las propiedades mecánicas adecuadas para resistir las cargas del tráfico.

- **Evaluación de la Resistencia y Deformación:**

A través de los ensayos de estabilidad y flujo, el diseño Marshall evalúa la resistencia a la deformación y la capacidad de soportar cargas de la mezcla asfáltica; esto permite seleccionar la mezcla más adecuada para las condiciones de tráfico y clima del proyecto.

- **Control de Calidad:**

El diseño Marshall es una herramienta fundamental para el control de calidad de las mezclas asfálticas en caliente; permite verificar que la mezcla fabricada en planta cumpla con los requisitos de resistencia y durabilidad establecidos.

- **Simplicidad y Rapidez:**

El diseño Marshall se caracteriza por ser un método sencillo y rápido, tanto para el diseño como para el control de las mezclas asfálticas en el laboratorio; esto lo convierte en un método ampliamente utilizado a nivel mundial durante décadas.

2.2.5.1. Parámetros volumétricos en mezclas asfálticas

Los parámetros volumétricos representan un conjunto de indicadores que describen la relación de los componentes de una mezcla asfáltica (agregados, asfalto, aire), en función a su densidad y distribución interna. Estos parámetros están establecidos comúnmente mediante el método Marshall o Superpave, calculados mediante ensayos estandarizados y expresados en porcentajes o valores de densidad (ASTHO, 2019).

Los criterios empleados en el diseño de una mezcla asfáltica están en relación al volumen, sin embargo, no es muy práctico determinar los volúmenes en mediciones de laboratorio, por lo que se emplea el criterio del peso específico, que permite obtener fácilmente datos de volumen conociendo previamente la masa y peso específico.

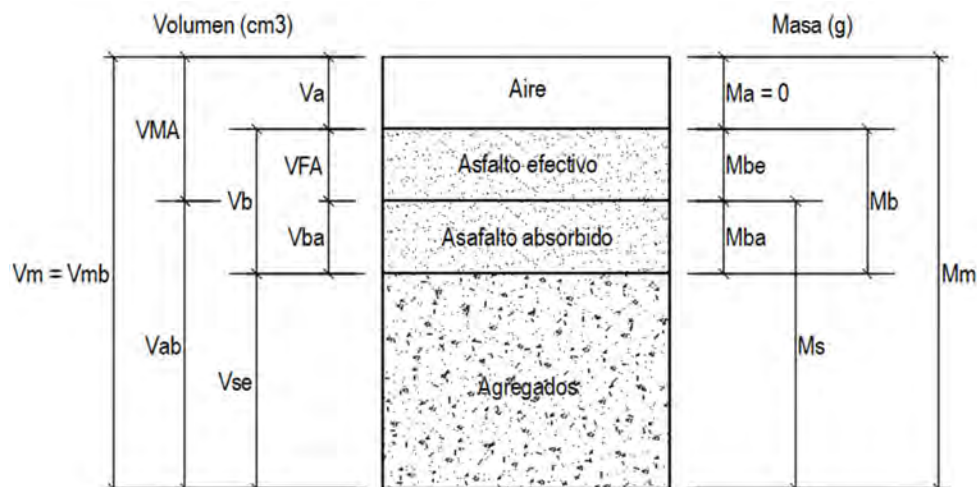
$$V = \frac{M}{G * \rho_w}$$

Donde: V = Volumen del componente; M = Masa del componente; G = Peso específico del componente; ρ_w = Densidad del agua (1 gr/cm³).

Una representación de la relación masa – volumen, se aprecia en la Figura 1.

Figura. 1

Diagrama de fases masa - volumen en una mezcla asfáltica

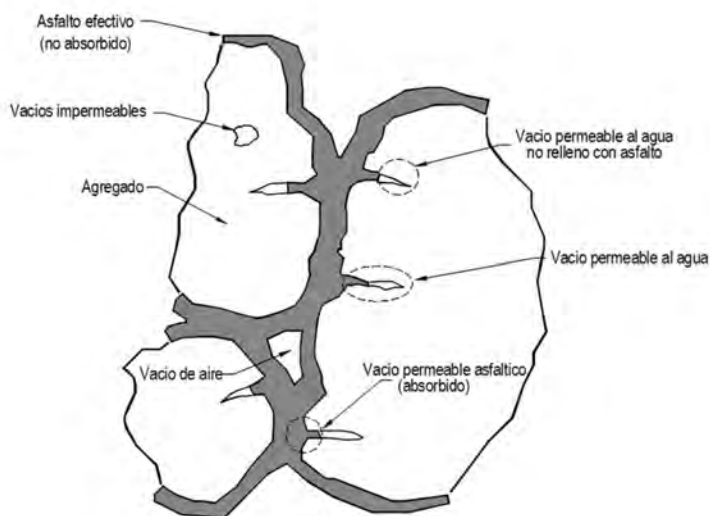


Nota. Fuente: Adaptado de *Ingeniería de Pavimentos* (J. Menéndez, 2016, ICG).

El peso específico de algunos áridos considera el volumen de los vacíos permeables al agua, mientras que otros solo la fracción de dichos vacíos libres de asfalto, esto se debe a que el agua posee una viscosidad menor que el asfalto, por lo tanto, puede penetrar con más facilidad en los vacíos de agregados, como se aprecia en la **Figura. 2**.

Figura. 2

Distribución de agregados, asfalto y vacíos de aire



Nota. Fuente: Adaptado de *Asphalt Mix Design Methodos* (Asphalt Institute, 2007, Asphalt Institute).

El peso específico de cada componente de la mezcla asfáltica puede determinarse directamente o mediante ensayos de laboratorio, de lo cual se derivaron ecuaciones que permiten calcular cada parámetro volumétrico sin necesidad de emplear el diagrama de fases.

2.2.5.1.1. Gravedad específica bulk de los agregados combinados (G_{sb})

Este valor representa la relación entre la masa total de los agregados (agregado grueso, agregado fino, filler) y el volumen total que ocupan, considerando los vacíos permeables presentes. Debido a que cada fracción de agregado presenta una gravedad específica distinta, el valor combinado se obtiene por medio del promedio ponderado considerando los porcentajes de masa de cada fracción de agregado presente en la mezcla.

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \frac{P_3}{G_3} + \dots + \frac{P_n}{G_n}}$$

Donde: G_{sb} = gravedad específica bulk de los agregados combinados; P_n = porcentajes específicos de la masa de cada agregado; G_n = gravedades específicas de cada agregado.

2.2.5.1.2. Gravedad específica efectiva del agregado (G_{se})

Representa la relación de la masa seca del agregado y el volumen que ocupa, considerando solo los vacíos permeables al agua que no son llenados con asfalto. Para el cálculo de la gravedad específica mediante la máxima gravedad específica (G_{mm}), el volumen del agregado se obtiene restando al volumen total el volumen del asfalto y los vacíos de aire.

Para el diseño de la mezcla asfáltica este parámetro permite determinar el contenido de asfalto efectivo, afecta la durabilidad y resistencia.

$$G_{se} = \frac{1 - P_b}{\frac{1}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}}$$

Donde: G_{sb} = gravedad específica efectiva del agregado; G_{mm} = máxima gravedad específica de la mezcla; P_b = porcentaje de asfalto de la masa total; G_b = gravedad específica del asfalto.

2.2.5.1.3. Gravedad específica aparente (G_{sa})

Corresponde a la relación entre la masa seca del agregado (secada al horno) entre el volumen sólido que ocupa, excluyendo los vacíos permeables, los que absorben agua y los que absorben asfalto.

Su cálculo principalmente sirve como referencia en estudios de absorción y caracterización de agregados, siendo siempre mayor que la gravedad específica bulk (G_{sb}) y que la gravedad específica efectiva (G_{se}), ya que el volumen considerado siempre será menor.

$$G_{sa} = \frac{M}{V}$$

Donde: G_{sa} = gravedad específica aparente; M = masa del agregado secada al horno; V = volumen del agregado sin vacíos permeables.

$$G_{sa} \geq G_{se} \geq G_{sb}$$

2.2.5.1.4. Gravedad específica bulk de la mezcla compactada (G_{mb})

Se define como la relación entre la masa seca al aire y el volumen total, de una mezcla asfáltica compactada incluyendo los vacíos de aire.

La gravedad específica bulk tiene una gran importancia en el diseño Marshall, ya que, permite calcular el contenido de vacíos de aire (V_a), valores bajos de G_{mb} pueden indicar una mezcla mal compactada o un alto contenido de vacíos, reduciendo la resistencia y aumentando la susceptibilidad a la humedad.

$$G_{mb} = \frac{A}{B - C}$$

Donde: G_{mb} = gravedad específica bulk de la mezcla compactada; A = masa seca al aire; B = masa al aire de un espécimen de superficie seca saturada; C = masa en agua de un espécimen.

2.2.5.1.5. *Densidad máxima teórica o gravedad rice (G_{mm})*

Representa la relación entre la masa de una mezcla asfáltica no compactada y el volumen que ocupa, sin incluir el volumen de vacíos de aire. Para determinar la densidad máxima teórica se puede emplear el ensayo de acuerdo a la norma ASTM D2041 o AASTHO T209, también conocido como método Rice.

Este parámetro es esencial para determinar el contenido de vacíos de aire (V_a) de una mezcla asfáltica, así como, la gravedad efectiva del agregado (G_{se}) y la absorción del asfalto por el agregado.

$$G_{mm} = \frac{M}{V * \rho}$$

Donde: G_{mm} = densidad máxima teórica; M = masa de la mezcla asfáltica seca al aire; V = volumen de la mezcla asfáltica sin vacíos de aire; B = masa al aire de un espécimen de superficie seca saturada; ρ = densidad del agua a temperatura de ensayo.

También se puede determinar la densidad máxima teórica, conociendo la gravedad efectiva del agregado (G_{se}).

$$G_{mm} = \frac{P_{mm}}{\frac{P_s}{G_{se}} + \frac{P_b}{G_b}} = \frac{1}{\frac{1 - P_b}{G_{se}} + \frac{P_b}{G_b}}$$

Donde: G_{mm} = densidad máxima teórica; P_{mm} = porcentaje en masa de mezcla (100%), sin compactar; P_s = porcentaje del agregado combinado de la masa total de la mezcla; P_b = porcentaje de asfalto de la masa total de la mezcla; G_{se} = gravedad específica efectiva del agregado combinado; G_b = gravedad específica del asfalto.

2.2.5.1.6. Contenido de asfalto (P_b)

Proporción de asfalto presente en la mezcla asfáltica, determinada tanto en masa como en volumen, influye directamente en la estabilidad, durabilidad, vacíos de aire (V_a) y vacíos llenados con asfalto (VFA).

$$P_b = 100 * \left(\frac{M_b}{M_s + M_b} \right)$$

Donde: P_b = contenido total de asfalto, expresado en porcentaje; M_b = masa de asfalto en la mezcla asfáltica; M_s = masa total del agregado.

2.2.5.1.7. Asfalto absorbido (P_{ba})

Se refiere a la masa de asfalto que penetra en los poros internos de los agregados, quedando retenida en la estructura del agregado. No es recomendable el uso de agregados con un alto porcentaje de absorción, ya que disminuye el ligante asfáltico disponible, comprometiendo la durabilidad de la mezcla asfáltica.

$$P_{ba} = 100 * \left(\frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{se} * G_{sb}} \right) * G_b$$

Donde: P_{ba} = porcentaje de asfalto absorbido; G_{se} = gravedad específica efectiva del agregado; G_{sb} = gravedad específica de los agregados combinados; G_b = gravedad específica del asfalto.

2.2.5.1.8. Asfalto efectivo (P_{be})

Representa la masa de asfalto que no es absorbida por los agregados, por lo tanto, queda libre para recubrir las partículas de agregado y llenar los vacíos de la mezcla. Debe ser determinado con precisión ya que, controla el espesor de la película de asfalto sobre el agregado, contribuye a la resistencia al envejecimiento, humedad e influye en la estabilidad de la mezcla.

$$P_{be} = P_b - \frac{P_{ba}}{100} * P_s$$

Donde: P_{be} = porcentaje de asfalto efectivo; P_{ba} = porcentaje de asfalto absorbido.

P_b = porcentaje de asfalto total; P_s = contenido de agregado en porcentaje total de la masa de la mezcla.

2.2.5.1.9. Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA)

Es el volumen de espacios vacíos entre las partículas de agregado de una mezcla asfáltica compactada, que incluye los vacíos ocupados por el asfalto efectivo y el aire atrapado en la mezcla. Corresponde a un parámetro fundamental para el método de diseño Marshall, ya que guarda relación directa con la funcionabilidad mecánica de la mezcla asfáltica. Un VMA muy bajo indica que la mezcla no cuenta con volumen suficiente para retener el ligante, lo que genera mezclas poco durables y vulnerables a la humedad, mientras que mezclas con VMA alto requieren más ligante pudiendo generar exudación y deformación plástica.

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb} * P_s}{G_{sb}}$$

$$VMA (\%) = \left(1 - \frac{G_{mb} * (1 - P_b)}{G_{sb}} \right) * 100$$

Donde: VMA = porcentaje de vacíos en el agregado mineral; G_{sb} = gravedad específica del agregado combinado; G_{mb} = gravedad específica de la mezcla compactada; P_b = porcentaje de asfalto total; P_s = contenido de agregado en porcentaje total de la masa de la mezcla.

2.2.5.1.10. Vacíos de aire en la mezcla total compactada (Va)

Corresponde al porcentaje de volumen de aire existente en la mezcla asfáltica luego de su compactación, con respecto al volumen total de la mezcla. Este parámetro es fundamental para el diseño de mezclas asfálticas, ya que, valores bajos pueden generar exudación del ligante y deformaciones plásticas, mientras que valores altos contribuyen a la permeabilidad, generando riesgo de daño por humedad y deterioro de la carpeta asfáltica.

$$VTM = Va = \left(1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}}\right) * 100$$

Donde: VTM = vacíos en la mezcla compactada; G_{mm} = máxima gravedad específica de la mezcla; G_{mb} = gravedad específica de la mezcla compactada.

2.2.5.1.11. Vacíos llenados con asfalto (VFA)

Representan el porcentaje del volumen de vacíos en el agregado mineral (VMA) ocupado por el asfalto efectivo en la mezcla compactada. Parámetro clave para el diseño de mezclas asfálticas, un VFA bajo implica que no hay suficiente ligante recubriendo los agregados, mientras que un VFA alto indica demasiado ligante asfáltico. Un porcentaje adecuado de vacíos llenados con asfalto contribuye a la durabilidad y resistencia al daño por humedad de la mezcla asfáltica.

$$VFA = \frac{100 * (VMA - V_s)}{VMA}$$

Donde: VFA = Vacíos llenados con asfalto; VMA = Vacíos de agregado mineral; V_s = Vacíos en la mezcla compactada en porcentaje del volumen total.

2.2.6. Dióxido de titanio (TiO_2)

Es un compuesto inorgánico de color blanco de origen natural, con una alta estabilidad química, empleado ampliamente en diversas industrias, se caracteriza por su alta opacidad, índice de refracción elevado y su capacidad para reflejar y absorber radiación ultravioleta.

El dióxido de titanio es un óxido blanco, insoluble en agua, empleado como pigmento y como agente fotocatalítico, se presenta en fase de anastasa, rutilo y brookita, siendo los dos primeros los más usados en fotocátalisis (Chen & Mao, 2007).

Para la presente investigación, el dióxido de titanio se incorpora a la mezcla asfáltica en caliente, buscando transmitir las propiedades fotocatalíticas del dióxido de titanio a la mezcla asfáltica, especialmente la auto limpieza y la purificación del aire.

El dióxido de titanio (TiO_2) presenta varias características importantes:

- **Blancura:** Es importante que el TiO_2 no amarillee y que tenga un brillo adecuado.
- **Dispersabilidad:** Debe ser de fácil incorporación al sistema.
- **Opacidad:** Debe tener un excelente poder cubritivo.
- **Absorción de aceite:** Debe ser la más baja posible.
- **Punto de fusión y ebullición:** Son extremadamente altos, lo que se encuentra en estado sólido en la naturaleza y es insoluble en agua hasta en forma de partícula.
- **Formas convencionales:** Las formas más comunes son la de RUTILO, utilizada a nivel mundial, y la ANATASE, más utilizada en la industria farmacéutica, cosmética y alimenticia.
- **Procesos de producción:** Existen dos métodos para producir TiO_2 : un proceso de sulfato y un proceso de cloruro.
- **Tratamientos superficiales:** Los tratamientos comúnmente utilizados son Inorgánicos con Alúmina, Sílice ó Zinc, que mejoran sus propiedades de dispersabilidad, poder cubriente, compatibilidad con superficies y menor absorción de aceite.
- **Uso en alimentos:** Se utiliza como colorante alimentario (E171) para dar un color blanco brillante y opaco a los alimentos, sin aportar valor nutricional.
- **Uso en cosmética:** Se utiliza en productos como protectores solares, polvos de maquillaje y cremas, debido a su capacidad para absorber la luz ultravioleta y proteger la piel.
- **Uso en medicamentos:** Se utiliza en la capa que recubre las pastillas.
- **Uso en plásticos:** Se utiliza en plásticos, como en muebles o artículos resistentes a los efectos de la luz solar.
- **Uso en pinturas:** Se utiliza en pinturas o esmaltes de cerámica.

- Uso en productos de cuidado personal: Se utiliza en productos de cuidado personal, como en la producción de papeles, productos farmacéuticos, alimentos y cosméticos, entre otros.
- Efectos sobre la salud: Ha generado preocupaciones sobre su seguridad, ya que algunas investigaciones han sugerido posibles riesgos para la salud, lo que ha llevado a su prohibición en la Unión Europea en ciertos productos alimenticios.

2.2.6.1. Fotocatálisis

La fotocatálisis puede definirse como el proceso por el cual un componente catalizador, como el dióxido de titanio, absorbe la luz ultra violeta para generar reacciones químicas que degradan agentes contaminantes presentes en el aire o el agua, transformándolos en compuesto menos nocivos.

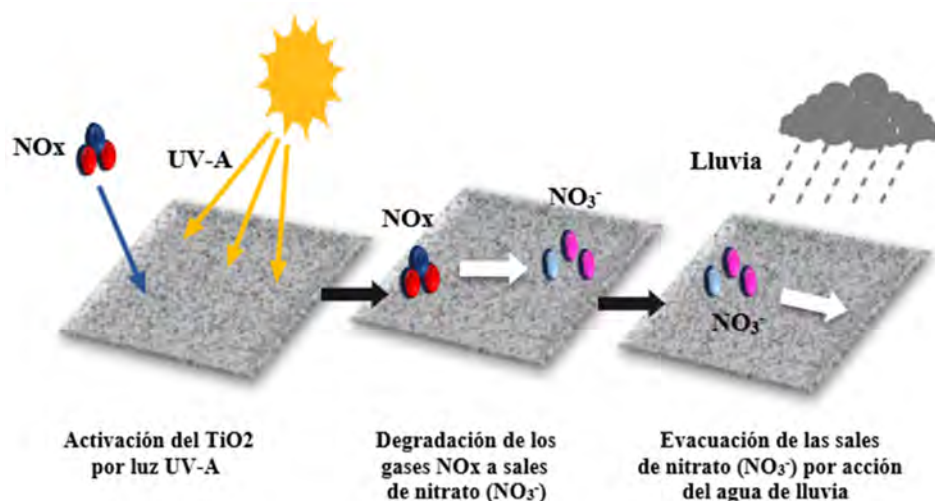
Es un proceso avanzado de oxidación que utiliza al dióxido de titanio (catalizador) y la radiación ultra violeta para generar reacciones químicas que degradan y mineralizan contaminantes (Guarín & Mera, 2011).

La activación de un fotocatalizador depende de sus propiedades, para el dióxido de titanio (TiO_2), esta activación ocurre en presencia de luz UV-A, que representa alrededor del 5% de la luz solar, de esta forma el dióxido de titanio ha demostrado una amplia funcionabilidad en la eliminación de contaminantes mediante procesos de oxidación, así como, la desinfección y esterilización de superficies. En la industria de la construcción, diversos estudios evidencian que los materiales combinados con el dióxido de titanio, bajo radiación solar, son capaces de oxidar contaminantes que se encuentran en contacto con su superficie, especialmente compuestos orgánicos volátiles (COVs) y óxidos de nitrógeno (NO_x), siendo estos últimos de gran importancia debido a que su presencia en el aire generan efectos negativos en la salud (Asociación Ibérica de la Fotocatálisis, 2024).

Este mecanismo es fundamental para la presente investigación, la adición de dióxido de titanio a mezclas asfálticas dotar al pavimento de capacidad fotocatalítica, al estar expuesta a radiación UV, la superficie vial degradaría los contaminantes atmosféricos, como los óxidos de nitrógeno (NO_x) o material orgánico, contribuyendo de esta manera a la purificación del aire y al mantenimiento superficial, sin la necesidad de alterar su funcionabilidad estructural.

Figura. 3

Esquema de funcionamiento del TiO_2 en pavimentos



Nota. Fuente: Adaptado de ICOPAL, citado en Nox - Activ® y la fotocatalísis:

Soluciones de cubierta que descontaminan (BIM Group, 2021).

2.2.6.2. Propiedades fotocatalíticas

Las propiedades fotocatalíticas de los materiales a base de dióxido de titanio (TiO_2) comprenden funciones como la purificación del aire, mediante la oxidación de gases contaminantes como los óxidos de nitrógeno (NO_x) u otros compuestos volátiles; la purificación del agua, a través de la degradación de materia orgánica y contaminantes presentes en medios acuosos; la autolimpieza de superficies, ya que la reacción fotocatalítica descompone suciedad y contaminantes adheridos, facilitando su remoción; y en algunos casos

una función antibacteriana o desinfectante, derivada de la generación de especies reactivas de oxígeno bajo irradiación, capaces de destruir microorganismos (Wei, Meng, Wu, Bai, & Zhang, 2023).

El enfoque de la investigación se centra en las propiedades de autolimpieza y purificación del aire, que puede desarrollar una mezcla asfáltica en caliente modificada con dióxido de titanio (TiO_2), evaluando su capacidad para reducir la acumulación de suciedad en la superficie y degradar contaminantes atmosféricos.

2.2.6.3. Autolimpieza

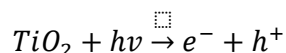
Escobar et al. (2021) indica que la autolimpieza de fotocatalíticos se refiere a la capacidad de ciertos materiales, como el dióxido de titanio (TiO_2) fotocatalítico, para descomponer y eliminar la suciedad, contaminantes y microorganismos presentes en las superficies expuestas a la luz ultravioleta. Este proceso se activa cuando los fotocatalizadores, como el TiO_2 , son estimulados por la radiación UV, generando radicales libres altamente reactivos que descomponen y oxidan la suciedad y los contaminantes orgánicos e inorgánicos. La autolimpieza fotocatalítica permite mantener las superficies limpias de forma autónoma, ya que los radicales generados por la fotocatálisis descomponen y eliminan la suciedad de manera efectiva, contribuyendo a la purificación ambiental y a la conservación de la estética y durabilidad de los materiales expuestos.

La fotocatálisis con dióxido de titanio (TiO_2) es especialmente eficaz para la degradación de compuestos orgánicos volátiles (COVs) y material orgánico presente en la superficie. Al ser expuesto a radiación UV, el TiO_2 se activa y genera especies reactivas que descomponen estas sustancias orgánicas en compuestos más simples, principalmente dióxido de carbono (CO_2) y agua (H_2O). Durante este proceso, el TiO_2 actúa como catalizador y no se consume, lo que permite que la reacción se repita continuamente mientras exista radiación

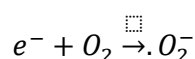
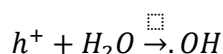
UV disponible. Este mecanismo reduce la acumulación de suciedad orgánica y explica la capacidad auto limpiante de los materiales fotocatalíticos.

La reacción para describir el proceso fotocatalítico de auto limpieza, es el siguiente:

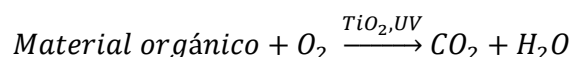
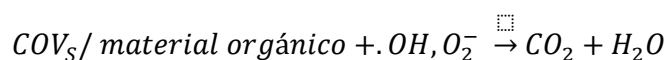
Activación del fotocatalizador:



Formación de especies reactivas:



Oxidación de material orgánico (COVs)



Donde; TiO_2 = dióxido de titanio fotocatalítico; $h\nu$ = energía de la radiación ultravioleta incidente (fotón); e^- = electrón excitado generado en la banda de conducción del TiO_2 ; h^+ = hueco positivo generado en la banda de valencia del TiO_2 ; O_2 = oxígeno molecular presente en el aire; CO_2 = Dióxido de carbono producto final de la oxidación del material orgánico; H_2O = agua, producto final de la reacción de degradación; UV = radiación ultravioleta necesaria para activar el TiO_2 .

Finalmente, la radiación UV induce en el TiO_2 un fenómeno de superhidrofilicidad (el TiO_2 no tiene afinidad con el agua), mediante el cual la superficie reduce su ángulo de contacto con el agua, permitiendo que esta se distribuya como una película continua en lugar de gotas. En mezclas asfálticas, donde el asfalto presenta un comportamiento hidrofóbico, este efecto facilita el arrastre de polvo y residuos orgánicos acumulados en la superficie, complementando la acción fotocatalítica y reforzando el mecanismo de autolimpieza del pavimento.

2.2.6.3.1. Ensayo para determinar la autolimpieza

La norma italiana UNI 11259-2016 “Determinación de la actividad fotocatalítica de las aglutinantes hidráulico – Método de prueba de Rodamina”, es un procedimiento estandarizado utilizado para evaluar la actividad fotocatalítica de materiales, como el dióxido de titanio (TiO_2), en la descomposición de contaminantes y la purificación ambiental. El ensayo consiste en realizar pruebas con muestras de material fotocatalítico para determinar su capacidad de descomponer y eliminar sustancias orgánicas e inorgánicas en presencia de luz ultravioleta. Los resultados de este ensayo proporcionan información sobre la eficacia del material en procesos de descontaminación y desinfección, así como en la autolimpieza de superficies expuestas a la luz solar (UNI, 2016).

2.2.6.4. Purificación del aire

Chirinos & Aquiese, (2022) indican que la purificación de aire mediante fotocatálisis se basa en el uso de materiales fotocatalíticos, como el dióxido de titanio (TiO_2), que son capaces de generar especies altamente reactivas cuando son activados por radiación ultravioleta. la purificación del aire ocurre cuando el TiO_2 activado por luz UV oxida contaminantes provenientes de emisiones vehiculares (principalmente NO_x , SO_x y otros gases), transformándolos en compuestos menos nocivos, como nitratos, que quedan retenidos en la superficie del material o pueden ser removidos posteriormente por acción del agua. El TiO_2 no se consume durante el proceso, actuando únicamente como catalizador.

Los principales aspectos de esta tecnología de purificación de aire son:

- **Proceso Fotocatalítico:**

La radiación UV excita los electrones del TiO_2 , generando pares electrón-hueco, estos pares reaccionan con el oxígeno y el agua presentes en el aire, produciendo radicales hidroxilos ($\text{OH}\bullet$) y superóxido ($\text{O}_2\bullet^-$), que son especies oxidantes muy reactivas.

- **Eliminación de Contaminantes:**

Los radicales generados oxidan contaminantes atmosféricos, principalmente óxidos de nitrógeno (NO_x) y compuestos orgánicos volátiles (COVs), transformándolos en productos más estables y de menor impacto ambiental, como nitratos, dióxido de carbono y agua. Este proceso reduce la concentración de gases contaminantes en el aire circundante sin consumir el TiO₂, que actúa únicamente como catalizador.

2.2.6.4.1. Ensayo para determinar la purificación del aire

La norma ISO 22197-1:2016 “Método de ensayo para el rendimiento de purificación del aire de materiales fotocatalíticos semiconductores – parte 1: Eliminación de óxidos de nitrógeno (NO_x)”, consiste en el ensayo de fotocatálisis que se centra en la evaluación de la actividad fotocatalítica de materiales mediante la descomposición de contaminantes orgánicos en presencia de luz ultravioleta. Este ensayo proporciona un método estandarizado para medir la eficacia de los materiales fotocatalíticos en la eliminación de sustancias contaminantes y en la purificación del aire. La norma establece los procedimientos y requisitos para llevar a cabo este tipo de ensayo, asegurando la consistencia y fiabilidad de los resultados obtenidos en la evaluación de la actividad fotocatalítica de los materiales. (ISO, 2016)

El objetivo del ensayo es: Evaluar la actividad fotocatalítica de materiales, como el dióxido de titanio (TiO₂), en la descomposición de contaminantes y la purificación del aire. Específicamente, la norma establece un método de ensayo estandarizado para determinar el rendimiento de purificación del aire de materiales que contienen un fotocatalizador o tienen películas fotocatalíticas, generalmente hechas de óxidos metálicos semiconductores como el dióxido de titanio. El ensayo se realiza mediante la exposición continua de una muestra del material a un contaminante modelo (en este caso, acetaldehído) bajo la iluminación de luz

ultravioleta (UV-A). Esto permite medir la capacidad del material fotocatalítico para descomponer y eliminar dicho contaminante del aire.

Por lo tanto, el objetivo principal de este ensayo es evaluar la eficacia de los materiales fotocatalíticos en la purificación del aire, lo que es relevante para aplicaciones como la construcción y el tratamiento de superficies.

2.2.7. Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica comprenden el conjunto de comportamientos que presenta la mezcla frente a las cargas del tránsito y a los efectos ambientales, definiendo su capacidad para resistir esfuerzos, deformarse y recuperar su estado original. Estas propiedades permiten evaluar la resistencia estructural, la rigidez, la durabilidad y la susceptibilidad a la deformación permanente, y constituyen la base para determinar el desempeño del pavimento a lo largo de su vida útil. A través de parámetros como estabilidad, deformabilidad, resistencia a la tracción y rigidez elástica, se puede caracterizar de manera integral cómo responderá la mezcla ante condiciones reales de servicio (Institute, 2014).

La investigación se centra en evaluar las propiedades mecánicas de estabilidad, flujo, módulo resiliente y resistencia a la tensión, de una mezcla asfáltica modificada con dióxido de titanio (TiO_2).

2.2.7.1. Estabilidad

Chavéz et al. (2011) indican que la estabilidad es una de las propiedades mecánicas más importantes evaluadas en el ensayo Marshall para mezclas asfálticas en caliente.

Se define como, la carga máxima que resiste la probeta de mezcla asfáltica compactada cuando se somete a un ensayo de compresión a una temperatura de 60°C.

En otras palabras, la estabilidad Marshall mide la resistencia de la mezcla asfáltica a la deformación bajo carga, lo que es fundamental para garantizar la capacidad de la mezcla de soportar las cargas del tráfico sin presentar deformaciones permanentes.

Un valor de estabilidad Marshall más alto indica una mezcla más resistente y con mayor capacidad de soportar las solicitaciones del tráfico sin fallar. Este parámetro, junto con el flujo Marshall, son utilizados para diseñar y seleccionar la composición óptima de la mezcla asfáltica que cumpla con los requisitos de resistencia y durabilidad establecidos para la construcción de pavimentos.

2.2.7.2. Flujo

Adrianzen et al. (2022) indican que el flujo es una propiedad mecánica fundamental evaluada en el ensayo Marshall para mezclas asfálticas en caliente. Se define como la deformación plástica total que experimenta la probeta de mezcla asfáltica cuando se somete a carga durante el ensayo de compresión a una temperatura específica. En otras palabras, el flujo de Marshall representa la capacidad de la mezcla asfáltica para deformarse sin romperse bajo carga, lo que es crucial para evaluar su comportamiento frente a las solicitaciones del tráfico y su resistencia a la deformación permanente. Un valor adecuado de flujo de Marshall es indicativo de la capacidad de la mezcla para soportar las cargas del tráfico y mantener su integridad estructural sin sufrir deformaciones excesivas.

2.2.7.3. Ensayo Marshall para estabilidad y flujo

Procedimiento utilizado para evaluar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas, específicamente la estabilidad y el flujo. El ensayo consiste en someter una probeta cilíndrica de dimensiones específicas, a una carga aplicada de manera controlada, a una temperatura de 60°C, mediante un equipo específico conocido como prensa Marshall (ASTM, 2019).

Debido a su simplicidad y reproducibilidad, el método Marshall se ha consolidado como uno de los ensayos más utilizados para la caracterización de mezclas asfálticas. Este ensayo permite analizar la respuesta de la mezcla asfáltica frente a condiciones de carga similares a las que se presentan durante el servicio de los pavimentos, constituyéndose en una herramienta fundamental tanto para el diseño de mezclas como para el control de calidad durante su producción y colocación.

2.2.7.4. Módulo resiliente

El módulo resiliente (M_r) se entiende como la proporción entre el esfuerzo cíclico aplicado a un material y la deformación elástica que este recupera tras cada carga. Este parámetro refleja el comportamiento elástico del material ante solicitaciones dinámicas, emulando el efecto del tránsito vehicular sobre el pavimento.

El módulo resiliente se entiende como la capacidad que posee una carpeta asfáltica para retornar a su forma original después de recibir cargas repetidas, reflejando su respuesta elástica frente a las solicitaciones típicas que actúan sobre un pavimento en funcionamiento. Este parámetro resulta esencial en el diseño estructural, pues permite valorar la rigidez del material y su comportamiento frente a la deformación acumulada generada por el tránsito. La evaluación del módulo mediante la aplicación de cargas cíclicas en un entorno controlado asegura una representación fiel del desempeño real de la mezcla bajo condiciones de servicio (AASHTO, 2017).

2.2.7.5. Ensayo según para determinación del módulo resiliente

La norma AASHTO TP 31 “Método estándar para determinar el módulo resiliente de mezclas bituminosas mediante tensión indirecta”, establece el procedimiento para medir la rigidez elástica de las mezclas asfálticas bajo condiciones de carga repetitiva, simulando el comportamiento del pavimento frente al tráfico vehicular. El ensayo se realiza aplicando pulsos de carga a una probeta cilíndrica de mezcla asfáltica, midiendo las deformaciones

horizontales y verticales inducidas, y calculando el módulo resiliente como la relación entre la carga aplicada y la deformación recuperable. Este parámetro es fundamental para el diseño de pavimentos flexibles, ya que permite evaluar la capacidad de la mezcla para resistir deformaciones permanentes y fatiga (AASHTO, 2017).

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r}$$

Donde: M_r = módulo resiliente (Pa); σ_d = esfuerzo desviador aplicado (Pa); ϵ_r = deformación elástica recuperable promedio en cada ciclo.

2.2.7.6. Resistencia a la tensión

La resistencia a la tensión puede entenderse como un indicador de la capacidad del material para mantener su integridad estructural bajo solicitaciones que tienden a separarlo o deformarlo, reflejando la interacción entre el ligante asfáltico y los agregados. Además, esta propiedad está estrechamente vinculada con la resistencia a la humedad, ya que las mezclas con mayor capacidad de resistir esfuerzos de tracción presentan menor susceptibilidad a la pérdida de adhesión y a la formación de grietas cuando están expuestas a agua. Por ello, evaluar la resistencia a la tensión no solo permite predecir la aparición de fisuras por tráfico y temperatura, sino que también contribuye a garantizar la durabilidad y desempeño del pavimento bajo condiciones climáticas adversas, siendo un parámetro clave en el diseño, selección de materiales y control de calidad de mezclas asfálticas para pavimentos flexibles.

La resistencia a la tensión en mezclas asfálticas es una propiedad mecánica que indica la capacidad de la mezcla para resistir esfuerzos de tracción sin fracturarse, reflejando su cohesión interna y estabilidad frente a cargas externas. Esta propiedad es fundamental para evaluar la durabilidad y el comportamiento estructural del pavimento, especialmente frente a la aparición de grietas por tracción inducidas por el tránsito vehicular, variaciones térmicas o la presencia de humedad. En laboratorio, la resistencia a la tensión se determina comúnmente mediante el ensayo de compresión diametral o tensión indirecta, en el cual se aplica una carga

vertical sobre un cilindro de mezcla compactada y se calcula la tensión máxima en el plano medio del espécimen (AASTHO, 2017).

2.2.7.7. Ensayo para determinación de la resistencia a la tensión

Según la norma AASTHO T 283 “Método estándar de ensayo para la resistencia de mezclas asfálticas compactadas (HMA) al daño inducido por humedad”, establece un método estandarizado para evaluar la susceptibilidad de las mezclas asfálticas en caliente a la degradación causada por la humedad, conocida también como daño por humedad. La norma determina cómo preparar probetas de mezcla asfáltica compactada, someterlas a ciclos de saturación e inmersión en agua a temperatura controlada, y medir la resistencia a la tensión indirecta (ITS, *Indirect Tensile Strength*) antes y después del tratamiento con agua (AASTHO, 2017).

El resultado se expresa generalmente como Índice de Retención de Tensión (TRI o TSR, *Tensile Strength Ratio*), que indica el porcentaje de resistencia que mantiene la mezcla después de la exposición a humedad comparado con la resistencia inicial. Este parámetro permite predecir la durabilidad y desempeño de la mezcla frente a condiciones de humedad y tránsito, asegurando mezclas más resistentes y confiables.

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Identificación de las variables de investigación

3.1.1. Definición conceptual

La mezcla asfáltica en caliente con adición de dióxido de titanio es una modificación de la mezcla asfáltica convencional que incluye la adición de dióxido de titanio (TiO_2) en cantidades específicas, generalmente entre 2% y 8%, durante el proceso de mezcla en caliente. Esta modificación tiene como objetivo mejorar las propiedades mecánicas y adicionar propiedades fotocatalíticas de la mezcla asfáltica, lo que la convierte en una alternativa más resistente y duradera para la construcción de pavimentos flexibles.

La adición de dióxido de titanio en la mezcla asfáltica en caliente mejora significativamente las propiedades mecánicas, como la estabilidad, el flujo, el módulo resiliente y la resistencia a la tensión. Además, el dióxido de titanio también exhibe propiedades fotocatalíticas como la autolimpieza y purificación del aire, lo que permite degradar contaminantes y mejorar la calidad del aire en los espacios interiores y exteriores.

3.1.1.1. Variable independiente

X1: Mezcla asfáltica en caliente con adición de dióxido de titanio (TiO_2).

3.1.1.2. Variable dependiente

Y1: Propiedades fotocatalíticas.

Y2: Propiedades mecánicas.

3.1.1.3. Unidad de análisis

Carpeta asfáltica de pavimentos flexibles.

3.1.1.4. Ámbito geográfico

El presente estudio se encuentra geográficamente en la ciudad del Cusco.

3.1.1.5. Periodo

Año 2022.

3.1.2. Definición operacional

Tabla 1

Cuadro de operacionalización de variables

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIONES	INDICADORES
Independiente X1	Mezcla asfáltica en caliente con adición de dióxido de titanio	Contaminación ambiental	Contaminantes atmosféricos
			Contaminantes orgánicos en pavimentos
			Contaminación por óxidos de nitrógeno
		Mezcla asfáltica en caliente	Agregados
			Granulometría
			Asfalto
Dependiente Y1	Propiedades fotocatalíticas	Diseño Marshall	Parámetros volumétricos
		Dióxido de titanio	Fotocatálisis
Dependiente Y2	Propiedades mecánicas	Autolimpieza	Norma UNI 11259:2016 “Determinación de la actividad fotocatalítica de las aglutinantes hidráulico – método de prueba de Rodamina”.
		Purificación del aire	Norma ISO 22197 – 1:2016 “Método de ensayo para el rendimiento de purificación del aire de materiales fotocatalíticos semiconductores – parte 1: Eliminación de óxido nítrico (NO).
Dependiente Y2	Propiedades mecánicas	Estabilidad y Flujo	Norma Técnica MTC E504 “Resistencia de mezclas bituminosas empleando el aparato Marshall”.
		Módulo resiliente	Norma AASTHO TP31 “Método estándar para determinar el módulo resiliente de mezclas bituminosas mediante tensión indirecta”.
		Tensión	Norma AASTHO T283 “Método estándar de ensayo para la resistencia de mezclas asfálticas compactadas (HMA) al daño inducido por humedad.

3.2. Clasificación de la investigación

3.2.1. Tipo de investigación

La presente investigación parte del conocimiento científico existente, el uso del dióxido de titanio como material fotocatalítico, aplicado a una situación práctica y específica, que es mejorar el diseño de una mezcla asfáltica en caliente para pavimentos, evaluando la influencia de la adición del dióxido de titanio en las propiedades fotocatalíticas y mecánicas de dicha mezcla.

Por lo que se plantea una investigación aplicada. Tipo de investigación que se realiza con el propósito de resolver problemas prácticos, enfocándose en la aplicación de los conocimientos adquiridos para mejorar una situación específica, diseñar soluciones o tomar decisiones (Sampieri, Collado, & Lucio, 2022).

3.2.2. Nivel de investigación

La investigación busca explicar cómo la adición del dióxido de titanio en distintas proporciones afecta tanto las propiedades fotocatalíticas como las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas. Por tanto, nuestro objetivo es explicar los efectos de una variable independiente (TiO_2) sobre múltiples variables dependientes (propiedades fotocatalíticas y mecánicas).

El nivel de la investigación será explicativo. Ya que se orienta a responder por qué ocurre un fenómeno y en qué condiciones se da, o por qué dos o más variables están relacionadas (Sampieri, Collado, & Lucio, 2022).

3.2.3. Diseño de investigación

La investigación manipula intencionalmente la variable independiente (mezcla asfáltica en caliente con adición de dióxido de titanio), con el objetivo de evaluar su influencia en las propiedades fotocatalíticas (autolimpieza y purificación del aire) y mecánicas (estabilidad, flujo, módulo resiliente y tensión). Se elaborarán probetas de mezcla

asfáltica en caliente con adición de dióxido de titanio en porcentajes definidos, controlados y reproducibles. Permitiéndonos así, establecer relaciones de causa – efecto aproximadas entre el contenido de TiO_2 y las propiedades evaluadas.

Se tiene un diseño cuasi – experimental. Donde el investigador manipula deliberadamente una variable independiente, pero no asigna aleatoriamente a los participante o unidades experimentales a los grupos (Sampieri, Collado, & Lucio, 2022).

3.3. Población y muestra

3.3.1. Población

Para la presente investigación, la población está conformada por el conjunto de mezclas asfálticas en caliente elaboradas con el porcentaje de asfalto obtenidas mediante el diseño Marshall convencional, en las que se adiciona el dióxido de titanio (TiO_2) como filler (relleno mineral) en distintos porcentajes. Dichas mezclas asfálticas comprenden un rango ilimitado de dosificaciones posibles, considerando siempre el rango máximo de material filler permitido en el diseño de mezclas asfálticas, aún en el rango permitido el porcentaje de TiO_2 añadido como material filler puede variar ampliamente en función de la necesidad del diseño, las condiciones de servicio, los costos o los requerimientos de desempeño fotocatalítico y mecánico.

De esta forma, la población incluye todas las variantes teóricas de mezclas asfálticas en caliente que puedan fabricarse bajo dicha condición, dichas mezclas, en su conjunto, son susceptibles a ser evaluadas tanto en las propiedades fotocatalíticas como en las propiedades mecánicas.

Por la extensión y amplitud de las combinaciones posibles, la población es de carácter conceptual y no cuantificable en su totalidad, ya que sería poco práctico fabricar y ensayar todas las dosificaciones posibles de TiO_2 dentro del rango máximo permitido de adición de material filler.

3.3.2. *Muestra*

La muestra de la investigación está constituida por las mezclas asfálticas en caliente elaboradas en laboratorio con cinco niveles de adición de TiO_2 (0%, 2%, 4%, 6% y 8%), considerando cada porcentaje como una muestra. Para garantizar la confiabilidad de los resultados, se fabricaron tres probetas por nivel como réplicas técnicas para los ensayos de propiedades fotocatalíticas (autolimpieza y purificación del aire) y mecánicas (estabilidad y flujo mediante ensayo Marshall), sumando un total de 45 probetas físicas en la primera etapa, correspondientes a 5 muestras conceptuales.

Con base en estos ensayos se determinó el porcentaje óptimo de TiO_2 , que mantiene las propiedades mecánicas dentro de los límites normativos y proporciona actividad fotocatalítica adecuada. Para la segunda etapa, destinada a los ensayos de módulo resiliente y resistencia a la tensión, se fabricaron 18 probetas adicionales: seis para módulo resiliente (una muestra con TiO_2 y otra sin TiO_2 , tres réplicas cada una) y doce para tensión (una muestra con TiO_2 y otra sin TiO_2 , en condiciones húmeda y seca, tres réplicas cada combinación).

De esta manera, la unidad de análisis conceptual corresponde al porcentaje de TiO_2 o a la condición evaluada, resultando en 11 muestras conceptuales (5 de la primera etapa y 6 de la segunda), mientras que el total de probetas físicas utilizadas para los ensayos experimentales es de 63 unidades.

3.4. **Recolección de datos**

3.4.1. *Técnicas de recolección de datos*

Para los ensayos fotocatalíticos:

- Autolimpieza: se evalúa la capacidad de degradación de contaminantes, siguiendo el procedimiento detallado en la norma UNI 11259:2016.
- Purificación del aire: su evaluación está basada en el método estandarizado en la norma ISO 22179-1, que permite cuantificar la capacidad de reducción de óxidos

de nitrógeno (NOx) en condiciones controladas de flujo gaseoso y radiación UV-A.

Para los ensayos mecánicos:

- Estabilidad y flujo: basado en la metodología establecida en la norma MTC E – 504, que mide la resistencia a la deformación plástica bajo carga inducida.
- Módulo resiliente: conforme a lo indicado en la norma AASTHO TP 31, que mide la respuesta elástica de la mezcla asfáltica sometida a cargas repetidas de compresión axial.
- Resistencia a la tensión: según lo indicado en la norma AASTHO T 283, determinando la capacidad de la mezcla para resistir esfuerzos de tracción indirecta aplicado a temperatura controlada.

3.4.2. Instrumentos de recolección de datos

Herramientas metodológicas requeridas y diseñadas para registrar, organizar y sistematizar la información obtenida en la investigación.

Los instrumentos para la recolección de datos empleados son:

Formatos de registro, usados para anotar los resultados de los ensayos.

Listas de verificación, para controlar el cumplimiento del procedimiento según norma.

Software de análisis (plantillas Excel).

3.5. Proceso de prueba de hipótesis y análisis de datos

Con los datos registrados en la instrumentación se realiza el procesamiento de la información. Se organizó la información en hojas de cálculo para su análisis y procesamiento, presentando la comparación de resultados entre las mezclas con adición de TiO₂ y sin adición de TiO₂.

CAPÍTULO IV. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

4.1. Contenido óptimo de asfalto mediante el método Marshall

4.1.1. Parámetros de diseño

Para el diseño de la mezcla asfáltica en caliente se empleó el método Marshall, siguiendo lo establecido en la norma ASTM D6927-15, Método de ensayo estándar para la estabilidad y el flujo Marshall de mezclas asfálticas, complementado con la norma AASHTO R12-85 (2002) T245, Práctica recomendada estándar para el diseño de mezclas bituminosas utilizando los procedimientos Marshall y Hveem.

Para la determinación de los parámetros de diseño se consideran las condiciones geográficas y de tráfico de la ciudad de Cusco, lugar donde se prevé la aplicación del diseño de mezcla asfáltica en caliente con adición de TiO_2 .

Según el Manual de Carreteras – Especificaciones Técnicas Generales para Construcción (EG-2013) del MTC, para asegurar que la mezcla asfáltica cumpla con los requisitos de estabilidad y durabilidad, se deben contemplar los siguientes parámetros y valores de referencia de diseño:

Tabla 2

Valores de parámetros para el diseño Marshall

Parámetro	Valor de referencia	Referencia
Golpes de compactación	75	EG-2013 MTC
Temperatura de mezcla	135°C - 165°C	The Aphlat Institute
Temperatura de compactación	140°C - 175°C	The Aphlat Institute
Estabilidad (KN)	Mínima 8,15	EG-2013 MTC
Flujo, 0.01 pulgadas	8 – 14	EG-2013 MTC
Vacíos en la mezcla total	3 – 5	EG-2013 MTC
Vacíos en el agregado mineral	15%	EG-2013 MTC

Nota: Adaptado de la norma EG-2013, MTC, 2013

4.1.2. Evaluación de los agregados

Los agregados empleados en el diseño de la mezcla asfáltica constituyen el componente mineral fundamental para la resistencia y durabilidad del pavimento. Para garantizar la calidad del material utilizado, se realizaron ensayos físicos y mecánicos conforme al Manual de Carreteras: Especificaciones Técnicas Generales para Construcción (EG-2013, MTC), verificando el cumplimiento de los requisitos técnicos establecidos y asegurando un desempeño adecuado de la mezcla asfáltica frente a las condiciones de servicio.

Para el diseño de la mezcla asfáltica en caliente se emplearon tres tipos de agregados:

- Agregado grueso de la cantera de Morro Blanco
- Agregado fino de la cantera de Morro Blanco
- Agregado fino de la cantera de Combapata

De acuerdo la normativa empleada, se verificaron los siguientes ensayos, para los tres tipos de agregados utilizados en el diseño de la mezcla:

Tabla 3

Requerimientos para agregados Gruesos

Ensayo	Normativa	Requisito	Función
Durabilidad al sulfato de magnesio	MTC E 209	< 15%	Resistencia a la intemperie
Abrasión Los Ángeles	MTC E 207	< 35%	Durabilidad y resistencia mecánica
Adherencia	MTC E 517	+ 95	Previene desprendimiento
Índice de Plasticidad	MTC E 214	> 35%	Evitar plasticidad arcillosa
Partículas chatas y alargadas	ASTM 4791	< 10%	Previene una inadecuada compactación y exceso de vacíos
Caras fracturadas	MTC E 210	90/70	Mejorar adherencia con asfalto
Sales solubles totales	MTC E 219	< 0.5%	Limitar reacciones químicas
Absorción	MTC E 206	< 1.0%	Cálculo volumétrico

Nota: Adaptado del EG-2013, MTC, 2013

Tabla 4*Requerimientos para agregados finos*

Ensayo	Normativa	Requisito	Función
Equivalente de arena	MTC E 114	70	Evitar finos arcillosos
Angularidad del agregado fino	MTC E 222	40	Garantizar entrelazamiento
Azul de metileno	AASTHO TP 57	< 8	Detectar finos activos
Índice de plasticidad malla N°40	MTC E 111	NP	Evitar plasticidad arcillosa
Durabilidad al sulfato de magnesio	MTC E 209	< 18%	Resistencia a la intemperie
Índice de durabilidad	MTC E 214	> 35	Asegura la resistencia al agua
Índice de plasticidad malla N°200	MTC E 111	NP	Evitar plasticidad arcillosa
Sales solubles totales	MTC E 219	< 0.5%	Limitar reacciones químicas
Absorción	MTC E 205	< 1.0%	Cálculo volumétrico

Nota: Adaptado del EG-2013, MTC, 2013

4.1.2.1. Durabilidad Al Sulfato De Magnesio

Norma MTC E 209, este ensayo se utiliza para evaluar la resistencia a la intemperie de los agregados, tanto fino como grueso, mediante su exposición a ciclos de humedad y secado utilizando una solución de sulfato de magnesio (MgSO_4) o sulfato de sodio (Na_2SO_4).

El procedimiento consiste en sumergir la muestra de agregado en una solución saturada de sulfato durante un período de 16 a 18 horas, a una temperatura controlada de entre 21 y 22 °C. Finalizado este periodo, la muestra se retira de la solución y se seca en un horno a una temperatura de 105 °C a 110 °C.

El proceso de inmersión y secado constituye un ciclo, y debe repetirse por un total de cinco ciclos consecutivos, según lo establece la norma MTC E 209.

Durante la etapa de secado, la muestra se pesa a intervalos de 2 a 4 horas, hasta alcanzar peso constante, lo cual se verifica cuando la variación entre pesadas sucesivas no supera el 1 % del peso.

Una vez concluidos los cinco ciclos, se realiza un análisis de la muestra mediante tamizado, con el fin de determinar la pérdida de masa causada por desintegración del agregado. Esta pérdida se expresa como un porcentaje respecto a la masa original de la muestra.

Una pérdida de masa baja indica que el agregado posee buena durabilidad y es apto para su uso en mezclas asfálticas en caliente. Por el contrario, una pérdida alta sugiere que el material es susceptible a la degradación bajo condiciones ambientales severas

4.1.2.2. Abrasión los ángeles

Norma MTC E 207, este método permite medir la degradación del agregado grueso como resultado del desgaste, la trituración y el impacto. Para ello, se utiliza un tambor de acero normado, en el cual se introduce una muestra de agregado junto con una cantidad determinada de esferas de acero. El tambor gira a una velocidad constante de 30 revoluciones por minuto (rpm) durante un total de 500 revoluciones.

Se procede a seleccionar la muestra a ensayar conforme a lo indicado en la norma. Posteriormente, se introduce la muestra en el tambor junto con las esferas de acero, tomando las precauciones necesarias para no dañar el material durante este proceso. Una vez colocados el agregado y las esferas dentro del tambor giratorio, se inicia la prueba, haciendo girar el tambor a una velocidad de 30 revoluciones por minuto (rpm) durante un total de 500 revoluciones. Finalizado el paso, la muestra triturada se tamiza mediante la malla N.º 12, y el material retenido se pesa para evaluar la pérdida de material, se compara la masa del material retenido con la masa inicial. Esta comparación permite calcular, en porcentaje, la cantidad de material degradado durante el ensayo.

4.1.2.3. Adherencia

Norma MTC E 517, este ensayo tiene como finalidad evaluar la capacidad del agregado para adherirse al ligante asfáltico utilizado en la preparación de la mezcla. A través

de este procedimiento, se determina si dicha adherencia presenta una resistencia adecuada frente a la acción del agua, lo cual es un factor crítico relacionado a las condiciones climáticas.

La muestra a ensayar se tamiza de manera que se obtenga un material que pase por la malla 3/8" y sea retenido por la malla 1/4". El 100 % del agregado resultante se lava con agua destilada y se seca en horno a una temperatura entre 135 °C y 149 °C. A partir de esta muestra, se separan 100 gramos de muestra y 5 gramos de ligante asfáltico, los cuales se mezclan cuidadosamente evitando pérdida alguna. Una vez realizada la mezcla, se deja secar durante 10 minutos, para luego sumergirla en agua destilada durante 24 horas. Transcurrido este tiempo, se procede a observar visualmente la muestra para verificar la presencia de películas de ligante asfáltico adheridas a la superficie del agregado. Se considera un umbral del 95 % de cobertura como criterio de aceptación.

4.1.2.4. Índice de durabilidad de agregado grueso

Norma MTC E 214, este procedimiento evalúa la capacidad del agregado grueso para resistir la generación de partículas finas perjudiciales cuando es sometido a desgaste mecánico, entre ellas principalmente la arcilla, Además, es de utilidad para analizar la calidad del yacimiento o lugar de origen del material.

La muestra de agregado se seca a una temperatura igual o inferior a 60 °C, con el propósito de facilitar su separación mediante el tamiz N° 4. Una vez obtenido el material retenido, se tamiza conforme a la gradación especificada por la norma y se coloca en un recipiente que contiene 7 ml de una solución de cloruro de calcio (Solución Stock). A continuación, se añade agua destilada hasta cubrir completamente el agregado, se sella el recipiente y se agita en una máquina calibrada para realizar 600 revoluciones en un lapso de 10 minutos. Tras este proceso, el material se retira y se somete a un lavado a través de la malla N° 200 durante 13 ciclos, recolectando el material que logra pasarla. El material

obtenido se transfiere a una probeta de ensayo, donde se agita nuevamente durante 40 segundos. Finalmente, se deja en reposo durante 20 minutos para registrar el nivel del asentamiento alcanzado en milímetros. Mediante la siguiente ecuación se obtiene el índice de durabilidad.

$$D_c = 30.3 + 28.8 \cot (0.29 + 0.15H)$$

Donde: D_c = índice de durabilidad y H = altura de sedimentación en milímetros.

4.1.2.5. Partículas chatas y alargadas

Norma MTC E 223, el propósito de este ensayo es determinar el porcentaje de partículas con formas no deseables, como aquellas que presentan geometría chata o alargada, dentro de una muestra de agregado grueso. Este tipo de partículas puede afectar negativamente las propiedades de la mezcla asfáltica, ya que su forma irregular dificulta la compactación y reduce la trabajabilidad, lo que, en última instancia, compromete la resistencia estructural de la mezcla.

La muestra se tamiza entre las mallas 3/8" y N°4 hasta obtener aproximadamente 100 partículas. Una vez separadas las fracciones correspondientes, se evalúa individualmente cada partícula, clasificándolas en tres grupos: a) partículas chatas, b) partículas alargadas, y c) ni chatas ni alargadas. Esta clasificación se realiza utilizando el dispositivo según lo detalla la norma. Posteriormente, se pesa cada grupo y se determina el porcentaje que representan las partículas chatas y alargadas respecto al peso total del material retenido en cada malla.

4.1.2.6. Caras fracturadas

Norma MTC E 210, este ensayo tiene como objetivo determinar el porcentaje de partículas de agregado grueso que presentan al menos una cara fracturada producto de procesos mecánicos de trituración. La presencia de estas caras angulosas es fundamental, ya que mejora la adherencia entre el agregado y el ligante en mezclas asfálticas, favoreciendo la estabilidad estructural y el comportamiento mecánico de la mezcla.

Se inicia el procedimiento separando únicamente el agregado grueso, utilizando para ello el tamiz N°4. Una vez obtenido el material retenido, se realiza el cuarteo para seleccionar una muestra representativa. Esta muestra se evalúa de forma cualitativa según el número de caras fracturadas, clasificando las partículas en tres categorías: con una cara fracturada, con dos caras fracturadas y con tres o más caras fracturadas. Finalmente, se pesa cada grupo clasificado y se determina el porcentaje que representa en relación con el total retenido en cada malla y con la masa inicial de la muestra.

$$P = \frac{F}{F + N} \times 100$$

Donde: P = es el porcentaje de partículas con el número especificado de caras fracturadas; F = masa o cantidad de partículas fracturadas con al menos el número especificado de caras fracturadas; N = Masa o cantidad de partículas en la categoría no fracturadas o que no entran en el criterio de partícula fracturada.

4.1.2.7. Sales solubles totales

Norma MTC E 219, este ensayo se realiza con el propósito de determinar la cantidad de sales solubles (cloruros y sulfatos) presentes en el agregado. La presencia excesiva de estas sales puede provocar problemas como la pérdida de adherencia entre capas y el desgaste prematuro.

Se toma una muestra previamente secada en horno hasta alcanzar un peso constante, registrando su masa como A. Luego, esta muestra se coloca en un vaso precipitado y se añade agua destilada hasta cubrirla completamente, asegurando un excedente mínimo de tres centímetros. A continuación, se lleva la mezcla a ebullición y, una vez alcanzado este punto, se agita durante un minuto, repitiendo esta operación cuatro veces en intervalos de 10 minutos. Tras la última agitación, se deja decantar por aproximadamente 10 minutos y el líquido sobrenadante se transfiere a otro vaso. Este proceso se repite hasta que no se detecte la presencia visible de sales. Una vez que los sobrenadantes se han enfriado, se vierten en un

matraz aforado y se completa con agua destilada hasta alcanzar el volumen final este volumen es registrado como B. Después a partir de esta solución, se extrae un volumen comprendido entre 50 y 100 mL, registrado como C. Esta porción se lleva al horno a 100 °C hasta alcanzar masa constante, anotando dicha masa como D.

$$\text{Sales Solubles}(\%) = \frac{1}{\frac{Cx A}{DxB} - 1} \times 100$$

4.1.2.8. Peso específico y absorción de agregado grueso

Norma MTC E 206, el objetivo de este ensayo es determinar tanto el peso específico como la capacidad de absorción de agua del agregado grueso. Estos parámetros son fundamentales para conocer la densidad del material y su comportamiento frente a la humedad, lo cual influye directamente y muy incidentemente en el diseño de mezclas asfálticas.

El procedimiento empieza con secar la muestra en horno a 110 °C hasta alcanzar peso constante y se deja enfriar; este valor se registra como peso seco (A). Luego, la muestra se sumerge completamente en agua durante al menos 24 horas para asegurar su saturación. Transcurrido ese tiempo, se retira del agua y se seca superficialmente con un paño absorbente, sin eliminar la humedad interna de las partículas, obteniendo así el estado saturado superficialmente seco (SSS), cuyo peso se registra como (B). Posteriormente, la muestra se pesa estando totalmente sumergida en agua, obteniéndose el peso sumergido (C). Con estos tres valores se calculan el peso específico seco (gravedad específica bulk seca), el peso específico en estado SSS (gravedad específica bulk s.s.s.), el peso específico aparente (gravedad específica aparente) y el porcentaje de absorción del agregado. Estos resultados permiten evaluar la calidad del agregado y su comportamiento en una mezcla asfáltica.

Peso específico de masa (gravedad específica bulk seca)

$$G_m = \frac{A}{B - C} \times 100$$

Peso específico de masa saturada superficialmente seca (gravedad específica bulk s.s.s.)

$$G_{SSS} = \frac{B}{B - C} \times 100$$

Peso específico aparente (gravedad específica aparente)

$$G_s = \frac{A}{A - C} \times 100$$

Absorción

$$A_b = \frac{B - A}{A} \times 100$$

Donde: A = peso de la muestra seca en el aire; B = peso de la muestra saturada superficialmente seca en el aire, C = peso en el agua de la muestra saturada.

4.1.2.9. Equivalente de arena

Norma MTC E 114, este ensayo tiene como objetivo determinar la proporción relativa de materiales finos no plásticos (arcilla) presentes en un agregado fino, los cuales podrían ser perjudiciales en la mezcla asfáltica. En otras palabras, busca medir qué tanto contenido de partículas finas, similares a la arcilla, contiene una muestra de arena, ya que estas pueden afectar negativamente la resistencia, durabilidad y trabajabilidad de la mezcla final.

Se inicia el procedimiento separando el material que atraviesa la malla N°4. Luego, se introduce una cantidad determinada de una solución preparada con cloruro de calcio en una probeta con marcas de medición. En esa misma probeta se añade la muestra de agregado fino, dejándola en reposo durante aproximadamente diez minutos para permitir que el material comience a interactuar con la solución. Transcurrido ese tiempo, se agita el contenido durante 30 segundos para asegurar una mezcla homogénea y se procede a enjuagar las paredes internas del recipiente con la misma solución, evitando así la adherencia de partículas. Finalmente, se deja que la mezcla repose por un periodo de veinte minutos, al término del cual se toman las lecturas necesarias sobre los niveles alcanzados por los distintos

componentes en suspensión y sedimentación, lo que permitirá obtener el valor del equivalente de arena (SE).

$$SE = \frac{\text{Lectura de arena}}{\text{Lectura de arcilla}} \times 100$$

4.1.2.10. Angularidad del agregado fino

Norma MTC E 222, este método permite determinar el porcentaje de vacíos de aire en los agregados finos pasantes la malla nro. 8 y retenido en la malla nro. 200.

Primeramente, se procede al tamizado del material, utilizando mallas específicas para garantizar la uniformidad del tamaño de las partículas. En este caso, se selecciona el material que pasa a través de la malla nro. 8 y queda retenido en la malla nro. 200, asegurando así que las partículas utilizadas se encuentran dentro de un rango de tamaño determinado y adecuado para la prueba.

Una vez obtenida la fracción deseada del material, se toma un cilindro de volumen conocido, el cual debe estar previamente limpio y seco. Este cilindro es pesado en vacío para registrar su masa inicial, dato fundamental para los cálculos posteriores. Posteriormente, el material tamizado se transfiere cuidadosamente a otro recipiente limpio, lo cual facilita su manipulación durante el llenado del cilindro.

A continuación, con la ayuda de un embudo que permite un llenado uniforme y controlado, se introduce el material en el cilindro hasta que este se encuentre completamente lleno, permitiendo incluso que el material sobrepase ligeramente el borde superior. Este paso busca evitar vacíos o huecos en el interior del cilindro que puedan alterar la medición del volumen real ocupado por el material.

Una vez que el cilindro ha sido llenado en su totalidad, se procede al enrasado del material, eliminando el exceso de partículas que sobresalen del borde superior del cilindro con una herramienta plana y recta, asegurando una superficie nivelada y uniforme. Finalmente, se vuelve a pesar el cilindro ya lleno, lo cual permite determinar con precisión la

masa del material contenido en el volumen conocido del cilindro. Con esta información se determina la densidad aparente del material y posteriormente la angularidad del agregado fino.

$$A^0 = \frac{V - \frac{W}{G_{sb}}}{V} \times 100$$

Donde: A^0 = angularidad del agregado fino; W = peso del agregado fino; G_{sb} = Gravedad específica del agregado fino.

4.1.2.11. Azul metileno

Norma AASTHO TP 57, este ensayo tiene como finalidad evaluar el nivel de reactividad del agregado fino que se emplea como componente en mezclas asfálticas. Dicha reactividad puede estar influenciada por la presencia de materiales indeseables como arcillas activas o sustancias orgánicas perjudiciales, los cuales pueden comprometer la estabilidad y durabilidad de la mezcla asfáltica. A través de este procedimiento se determina, de forma cuantitativa, la cantidad de dichos contaminantes presentes en la muestra de agregado.

El proceso se inicia con el tamizado de al menos 5 gramos del material que ha pasado por la malla número 200 (con una abertura de 75 micrones), asegurando que solo las partículas más finas sean utilizadas en el ensayo. Una vez separado este material, se somete a un proceso de secado en horno a una temperatura constante de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, hasta alcanzar masa constante, lo cual garantiza que el contenido de humedad no afecte los resultados del análisis.

Posteriormente, se toma una porción de exactamente 1 gramo del material seco y se coloca en un vaso precipitado con capacidad de 100 ml. A este se le añaden 30 ml de agua destilada, y la mezcla se agita cuidadosamente con el fin de dispersar completamente las partículas finas en el líquido.

Simultáneamente, se prepara una solución de azul de metileno en una concentración de 1:1000 en un matraz volumétrico, la cual será utilizada como reactivo indicador en el proceso de titulación. Esta solución se incorpora gradualmente a la mezcla del vaso precipitado en volúmenes de 0.5 ml por adición. Después de cada adición, se agita la mezcla durante un minuto para permitir que el azul de metileno reaccione con las partículas activas presentes, principalmente arcillas o materia orgánica.

El procedimiento de adición sucesiva de la solución se conoce como titulación. Para monitorear el progreso de la reacción, se utiliza una barra de vidrio para extraer una gota de la mezcla, la cual se deposita sobre un papel de filtro número 40. La prueba se considera finalizada en el momento en que la gota depositada deja un halo o borde de color azul cielo alrededor de su perímetro central. Este fenómeno indica que se ha alcanzado la saturación del material con el reactivo y, por lo tanto, se ha determinado la cantidad de compuestos reactivos presentes en la muestra.

4.1.2.12. Índice de plasticidad (malla N°40)

Norma MTC E 111, el objetivo de este ensayo es determinar el límite plástico de un suelo y el cálculo del índice de plasticidad del mismo conociéndose el límite líquido de este.

El procedimiento comienza con la selección de una muestra representativa del suelo que ha sido previamente secada al aire. Luego, esta muestra se tamiza utilizando la malla N° 40 con el fin de obtener la fracción más fina del suelo, que es la que presenta comportamiento plástico.

Se toma una porción suficiente de material y se le agrega agua en pequeñas cantidades, amasando manualmente hasta alcanzar una consistencia homogénea adecuada para realizar las pruebas de límite líquido y límite plástico.

Para determinar el límite líquido, se coloca una porción del suelo humedecido en el dispositivo de copa de Casagrande. Con la espátula se nivela el material dentro del recipiente

y se realiza una ranura con la herramienta estándar. Posteriormente, se acciona la manivela del equipo, dejando que la copa golpee contra la base hasta que la ranura se cierre en una longitud estándar. Se registra el número de golpes necesarios para el cierre y se repite el procedimiento con diferentes contenidos de humedad, generando así una curva que permite determinar el contenido de humedad, con la que la ranura se cerraría con 25 golpes.

Para establecer el límite plástico, se toma otra porción del mismo material y se forma una masa cilíndrica o "chorizo" delgado que se enrolla con las palmas de las manos sobre una superficie no adherente. Este cilindro se sigue moldeando hasta que alcanza un diámetro de aproximadamente 3 mm, momento en el cual se comienza a agrietar severamente. Se determina el contenido de humedad en este punto, el cual representa el límite plástico.

Finalmente, el índice de plasticidad se calcula restando el valor del límite plástico al del límite líquido:

$$I.P. = L.L. - L.P.$$

Donde: LL = límite líquido y LP = límite plástico. Este valor cuantifica la plasticidad del suelo y permite clasificarlo según su comportamiento mecánico, especialmente su capacidad para deformarse sin romperse cuando varía su humedad.

4.1.2.13. Índice de plasticidad (malla N°200)

Norma MTC E111, el ensayo de índice de plasticidad utilizando el material fino que pasa por la malla N°200 tiene como finalidad evaluar el grado de plasticidad de la fracción más fina del suelo, que es la que presenta una mayor influencia en el comportamiento mecánico del mismo.

El procedimiento es similar al ensayo realizado para la malla nro. 40. Con los valores obtenidos, se calcula el índice de plasticidad (IP) mediante la fórmula:

$$I.P. = L.L. - L.P.$$

Donde: LL = límite líquido y LP = límite plástico. Este índice indica el rango de humedad en el que el suelo presenta propiedades plásticas. Cuanto mayor es el valor del IP, más plástico y compresible es el suelo.

4.1.2.14. Índice de durabilidad de agregado fino

Norma MTC E 214, el propósito de este ensayo es determinar la resistencia del agregado fino a la desintegración cuando se somete a condiciones ambientales adversas, simuladas mediante ciclos controlados de humedecimiento y secado. A través de este procedimiento, se evalúa la durabilidad del material frente al desgaste provocado por la acción repetitiva de la humedad, lo cual es esencial para predecir su comportamiento a largo plazo en obras de infraestructura, especialmente en capas de base, subbase y mezclas asfálticas.

El resultado obtenido permite identificar la presencia de partículas débiles o frágiles dentro del agregado fino, que podrían comprometer la estabilidad estructural del material durante su uso en campo. Por tanto, este ensayo es fundamental para garantizar que el agregado utilizado cumpla con los estándares de calidad requeridos y sea apto para soportar condiciones de servicio exigentes sin deteriorarse prematuramente.

Se inicia el ensayo seleccionando una porción representativa del agregado fino que pasa por el tamiz N° 4 (4,75 mm), en una cantidad tal que, una vez secada en horno, pese $500 \pm 0,25$ gramos. La muestra debe secarse a una temperatura de 110 ± 5 °C hasta alcanzar masa constante y luego dejarse enfriar a temperatura ambiente.

Una vez lista, la muestra se coloca en un vaso mecánico de lavado, al que se le agregan 1000 ± 5 mL de agua destilada y desmineralizada. Se tapa el vaso, se deja reposar durante 10 minutos (600 ± 30 segundos) y luego se agita mecánicamente por un período de 2 minutos (120 ± 5 segundos).

Finalizada la agitación, el contenido del vaso se cuela cuidadosamente usando un tamiz N° 200 (75 µm), protegido con un tamiz N° 4. Se enjuagan el vaso y los tamices hasta que el agua pase completamente clara a través del tamiz. Si la muestra es muy arcillosa o limosa, puede ser necesario agregar más agua para fluidificarla y evitar el taponamiento del tamiz.

El material retenido en el tamiz se transfiere a un recipiente amplio para ser secado nuevamente a 110 ± 5 °C hasta peso constante. Durante esta etapa, el recipiente debe mantenerse inclinado para permitir el drenaje del agua clara antes del secado completo.

Una vez seco, se cuartea una porción del material hasta obtener una cantidad suficiente para llenar un tarro de 3 onzas (85 mL). El tarro se llena hasta el borde, se consolida golpeando suavemente su base, se enrasan los excedentes con una regla y se pesa.

Por último, se realiza un ensayo de equivalente de arena según la norma MTC E114, con la diferencia de que el cilindro con la muestra debe agitarse mecánicamente de manera continua durante 600 ± 15 segundos y se da lectura, determinando el valor del índice de durabilidad (Df).

$$Df = \frac{\text{Lectura de arena}}{\text{Lectura de arcilla}} \times 100$$

4.1.2.15. Gravedad específica y absorción de agregado fino

Norma MTC E 205, el objetivo de este ensayo es determinar la gravedad específica (G_{ss}), gravedad específica seca (G_m) y la gravedad específica aparente (G_s) así como el porcentaje de absorción del agregado finos.

La gravedad específica permite realizar el cálculo de las proporciones volumétricas de los componentes de la mezcla, tanto como el contenido de vacíos y la relación asfalto, agregado. Por otro lado, la absorción, determina la cantidad de agua que puede retener el agregado en sus poros, un valor elevado demanda una mayor cantidad de ligante asfáltico para garantizar el recubrimiento y la adhesión. En conjunto ambos parámetros son empleados

para el cálculo de los vacíos del agregado mineral (VMA), vacíos de aire (V_a) y vacíos llenos de asfalto (VFA), parámetros claves para el diseño Marshall.

El procedimiento para el ensayo inicia con la preparación de la muestra, se seca el agregado fino en horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta obtener un peso constante, determinando la masa seca en aire, se deja la muestra sumergida en agua durante un periodo de 24 horas, posteriormente se elimina el exceso de agua secando la superficie con un paño húmedo, sin permitir que el agua penetre en los poros, se coloca la muestra en el molde cónico y se golpea la superficie 25 veces con la varilla para apisonado, luego se levanta el molde, se debe hacer este proceso hasta que al retirar el cono el agregado se derrumbe, lo que indica que el agregado fino alcanzo la condición de superficie seca.

Obtenida la condición de superficie seca, se introducen 500 gramos de la muestra en un frasco graduado con agua hasta obtener la lectura de 500 cm³, se agita el frasco para eliminar burbujas de aire (se agita entre 15 a 20 minutos), luego de eliminar las burbujas se calibra el volumen hasta la marca indicada anteriormente y determinamos el peso de la muestra más el agua y el frasco, finalmente retiramos la muestra del frasco y la llevamos al horno a temperatura constante de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta obtener un peso constante.

Con las lecturas obtenidas, se realizan los siguientes cálculos:

Peso específico de masa (Pem):

$$Pem = \frac{W_o}{(V - V_a)} \times 100$$

Peso específico de masa saturada con superficie seca (Pe sss):

$$Pe\ sss = \frac{500}{(V - V_a)} \times 100$$

Peso específico aparente (Pea):

$$Pea = \frac{W_o}{(V - V_a) - (500 - W_o)} \times 100$$

Absorción (Ab):

$$Ab = \frac{500 - W_o}{W_o} \times 100$$

Donde: Pem = peso específico de la masa; Ab = absorción; Wo = peso en el aire de la muestra secada en el horno en gramos; V = volumen del frasco en cm; Va = peso en gramos o volumen en cm³ de agua añadida al frasco.

4.1.3. Selección de la granulometría

4.1.3.1. Cantidad de material fino (malla N°200)

Norma MTC E 202, el método sirve para determinar la cantidad de material fino presente en los agregados, específicamente la fracción que pasa el tamiz N°200 mediante lavado. El procedimiento consiste en someter una muestra de agregado a un proceso de lavado controlado para separar y remover las partículas finas adheridas, utilizando agua y el tamiz N°200 como elemento filtrante. Concluido el lavado, el material retenido es secado en el horno a $110 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta obtener peso constante y se determina la pérdida de peso respecto al peso inicial de la muestra. A partir de la muestra seca lavada se procede con el ensayo de granulometría según norma MTC E 204, para determinar la curva granulométrica del agregado.

4.1.3.2. Análisis granulométrico

Norma MTC E 204, método que sirve para determinar la distribución del tamaño de partículas de agregados mediante tamizado en seco, para lo cual se debe obtener una muestra secada en el horno a $110 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta alcanzar masa constante, luego pesar la muestra y someterla a tamices normalizados que permiten separar el material por fracciones granulométricas. Cada fracción retenida en los tamices es pesada y utilizada para calcular los porcentajes retenidos individuales, los acumulados y el porcentaje que pasa por cada abertura, información con la que se elabora la curva granulométrica del agregado.

4.1.3.3. Gradación

La granulometría representa uno de los parámetros más importantes en el diseño de mezclas asfálticas en caliente, debido a que controla la trabajabilidad, compactación y resistencia de la mezcla. La norma DG-2013 del MTC, establece las bandas granulométricas específicas para las mezclas asfálticas convencionales tipo MAC (Mezclas Asfálticas en Caliente), definidas en función del tamaño máximo nominal del agregado y de la aplicación estructural del pavimento, teniendo así en la siguiente tabla las gradaciones especificadas en la norma ASTM D 3515 e Instituto del Asfalto.

Tabla 5

Gradaciones de agregados para mezclas asfálticas en caliente método Marshall

Tamiz	Porcentaje que pasa		
	MAC – 1	MAC – 2	MAC – 3
25 mm (1")	100		
19mm (3/4")	80-100	100	
12.5 mm (1/2")	67-85	80-100	
9.5 mm (3/8")	60-77	70-88	100
4.75 mm (N°4)	43-54	51-68	65-87
2.00 mm (N°10)	29-45	38-52	43-61
425 µm (N°40)	14-25	17-28	16-29
180 µm (N°80)	8-17	8-17	9-19
75 µm (N°200)	4-8	4-8	5-10

Nota: Fuente EG-2013, MTC, 2013

La norma DG-2013, no establece específicamente las funciones de cada gradación presentada, sin embargo, para la determinación el tipo de granulometría, el Manual Series N°2 (Asphalt Institute, 2001), destaca que las mezclas densas son las más empleadas en pavimentos, debido a que han demostrado un comportamiento óptimo a diversas condiciones de tránsito y son recomendadas como una opción para las capas de rodadura.

La MAC 2 se utiliza como gradación intermedia o de uso general, diseñada para ofrecer equilibrio entre estabilidad, trabajabilidad y durabilidad. Su función práctica es servir

como mezcla densa estándar, adaptable a la mayoría de condiciones de servicio donde no se requiere ni la robustez extrema de la MAC 3 ni la textura más fina y cerrada de la MAC 1.

En base a ese criterio, la gradación MAC-2 puede considerarse como una mezcla densa intermedia que permite un balance óptimo entre agregados gruesos y finos, por lo cual empleamos esta gradación para la presente investigación.

4.1.4. Evaluación del cemento asfáltico

4.1.4.1. Penetración de materiales bituminosos

MTC E 304 ensayo de penetración de materiales bituminosos, tiene como objetivo principal evaluar la consistencia o dureza relativa de un asfalto al medir la profundidad que alcanza una aguja estandarizada al penetrar el material bajo condiciones específicas de carga, temperatura y tiempo. Esta prueba es clave para clasificar los asfaltos según su grado de penetración, lo cual permite seleccionar el tipo más adecuado para diferentes condiciones climáticas y estructurales en obras viales, garantizando así su desempeño y durabilidad

Para llevar a cabo el ensayo, se siguieron los lineamientos establecidos en la norma MTC E 304, se prepara una muestra de asfalto fundido en un recipiente metálico, la cual se enfría hasta alcanzar la temperatura estándar de ensayo (25 °C). Luego, se coloca la muestra bajo un penetrómetro, y se baja una aguja calibrada con una masa determinada, dejándola actuar durante 5 segundos. La profundidad alcanzada por la aguja, medida en décimas de milímetro, se registra como el valor de penetración. Este procedimiento se repite varias veces para obtener un promedio representativo, asegurando la precisión de los resultados.

4.1.4.2. Ductilidad de materiales bituminosos

Norma MTC E 30 ensayo de ductilidad, tiene como propósito determinar la capacidad de un material bituminoso para estirarse sin romperse, lo cual es una medida de su flexibilidad y cohesión interna. Esta propiedad es crucial para evaluar el comportamiento del asfalto bajo esfuerzos de tracción en condiciones reales, como el tránsito vehicular y las

variaciones térmicas. Una alta ductilidad indica que el material puede deformarse sin fracturarse, contribuyendo a una mayor durabilidad de las mezclas asfálticas.

El procedimiento comienza con la preparación de una muestra moldeada de asfalto, que se enfría y se coloca en un baño de agua a una temperatura constante, usualmente de 25 °C. Una vez estabilizada la temperatura, la muestra se somete a un estiramiento horizontal en una máquina de ductilidad a una velocidad constante, hasta que el filamento de asfalto se rompe. La distancia total que recorre la muestra antes de fracturarse, medida en centímetros, representa el valor de ductilidad. Se realizan varios ensayos para obtener un promedio confiable, asegurando así la validez del resultado.

4.1.5. Elaboración de probetas de mezcla asfáltica en caliente

Preparación inicial y seguridad

Antes de iniciar cualquier actividad relacionada con la manipulación de mezclas asfálticas en caliente, es fundamental garantizar condiciones adecuadas de seguridad. Para ello, se debe contar con el equipo de protección personal (EPP) correspondiente, que incluye guantes térmicos, lentes de seguridad, mandil y calzado de seguridad, debido a los riesgos asociados al manejo de ligante asfáltico a altas temperaturas. Asimismo, es necesario asegurar una adecuada ventilación del área de trabajo y que el personal conozca los procedimientos de emergencia, a fin de desarrollar las actividades en un entorno controlado y seguro.

Fraccionamiento del agregado por tamizado

El agregado mineral empleado en la mezcla asfáltica está constituido por una combinación de agregados finos y gruesos provenientes de distintas canteras, los cuales fueron dosificados en proporciones previamente definidas con el objetivo de cumplir la curva granulométrica establecida en el diseño de la mezcla. Una vez determinados los porcentajes correspondientes, cada fracción fue sometida a un proceso de secado en horno y

posteriormente tamizada mediante tamices normalizados, de acuerdo con lo establecido en el Manual de Ensayo de Materiales.

Figura. 4

Fraccionamiento del agregado



Calentamiento de materiales e instrumentos

Se realizó el precalentamiento de los materiales e instrumentos necesarios para la compactación. Los agregados y el ligante asfáltico fueron calentados de manera controlada hasta alcanzar las temperaturas y viscosidades requeridas según la carta de viscosidades, mientras que los moldes y martillos de compactación fueron acondicionados térmicamente para minimizar pérdidas de calor y asegurar una compactación uniforme.

Figura. 5

Calentamiento de materiales y equipos de compactación



Mezclado de Componentes

Una vez alcanzadas las temperaturas requeridas, se realiza el mezclado del ligante asfáltico, en este caso el asfalto PEN 120–150, con los agregados previamente calentados. Este proceso debe ejecutarse en un mezclador o en un recipiente metálico, de manera rápida y homogénea, garantizando que el ligante recubra completamente todas las partículas del agregado.

Durante el mezclado, es imprescindible mantener una temperatura constante dentro de los rangos establecidos por la curva de viscosidad del asfalto, ya que cualquier variación puede afectar la uniformidad y la fluidez del ligante. Además, un mezclado adecuado evita la formación de grumos, asegura una distribución equilibrada del ligante dentro de la masa y permite obtener una mezcla estable y cohesionada antes de su moldeo o manipulación.

Figura. 6

Mezclado de los materiales



Temperatura de mezclado y compactado

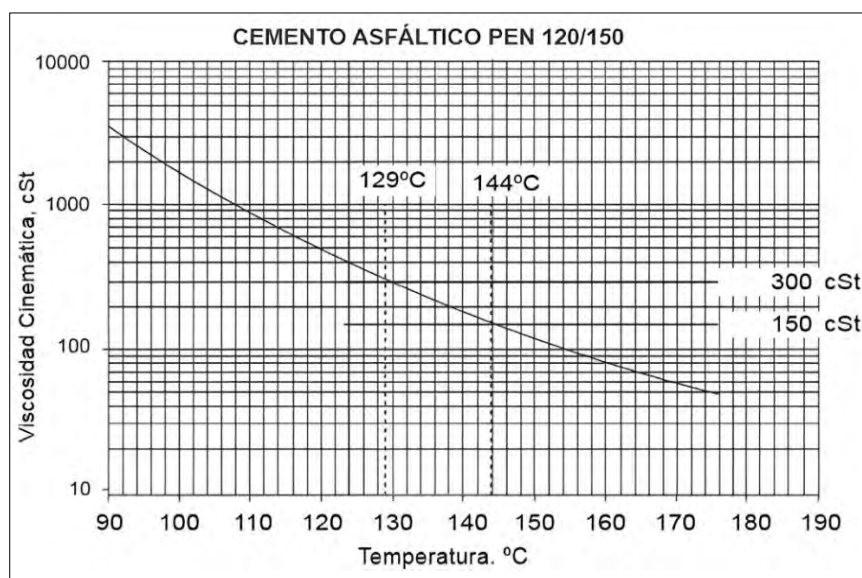
En el diseño Marshall y en la elaboración de la mezcla asfáltica, se controlaron cuidadosamente las temperaturas de mezcla y compactación, dado que estas influyen directamente en la trabajabilidad, el adecuado recubrimiento de los agregados y el correcto desarrollo de las propiedades mecánicas de la mezcla. Una temperatura inadecuada de

compactación dificulta la consolidación de las probetas bajo los golpes aplicados durante este proceso, generando una estructura interna deficiente; mientras que, si la temperatura de mezcla es inferior al valor establecido, el ligante asfáltico no alcanza la fluidez necesaria para recubrir uniformemente los agregados, dando lugar a mezclas heterogéneas y con baja adhesión entre sus componentes.

Las temperaturas específicas para el agregado, el ligante y la mezcla final se definieron a partir de la Carta de Temperatura vs. Viscosidad Cinemática proporcionada por la empresa proveedora del producto Petro Perú, lo que permitió asegurar que todas las etapas del proceso se desarrollaran dentro de los rangos óptimos recomendados. De este modo, se garantizó la obtención de una mezcla estable, homogénea y sin alteraciones en la consistencia del asfalto, estableciendo condiciones favorables para su adecuado desempeño mecánico durante su evaluación y servicio.

Figura. 7

Temperatura vs viscosidad cinemática



Nota: Fuente PETROPERU, 2023

En función a la **Figura. 7** se determina que la temperatura para el mezclado es de 144°C, mientras que para el compactado es de 129°C.

Figura. 8

Control de la temperatura de mezclado



Compactación de las Briquetas

La mezcla asfáltica en caliente fue vertida en moldes cilíndricos para su posterior compactación, siguiendo estrictamente el procedimiento establecido en la norma ASTM D1559. Cada muestra fue compactada mediante la aplicación de 75 golpes en cada una de las caras del espécimen, utilizando un martillo de compactación estandarizado, lo que permitió obtener probetas con dimensiones y densidad uniformes, garantizando la comparabilidad de los resultados.

Para el análisis, se elaboraron probetas correspondientes a cada uno de los contenidos de asfalto propuestos, considerando porcentajes de 4.0%, 4.5%, 5.0%, 5.5%, 6.0% y 6.5%, calculados en función del volumen total del espécimen. Para cada contenido de ligante se preparó un número adecuado de probetas, con el fin de asegurar la repetibilidad de los resultados y reducir la variabilidad experimental.

Este procedimiento permitió obtener una serie de probetas representativas y consistentes, necesarias para evaluar el comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica bajo las condiciones establecidas en el método Marshall. Asimismo, los resultados obtenidos sirvieron de base para el análisis comparativo de las diferentes dosificaciones y para la

determinación del contenido óptimo de ligante, de acuerdo con los criterios técnicos establecidos por dicho método.

Figura. 9

Compactado de probetas



Enfriamiento y Desmoldeo

Una vez compactadas, las briquetas deben dejarse enfriar a temperatura ambiente durante un período mínimo de 24 horas. Este paso es fundamental para permitir que el asfalto se endurezca de forma natural y evitar deformaciones por manipulación prematura. Tras el enfriamiento, se procede al desmoldeo cuidadoso de los especímenes, asegurando que las probetas conserven su geometría y no presenten daños que puedan alterar los resultados de los ensayos posteriores. Además, se verificó visualmente que cada briqueta cumpliera con la uniformidad superficial requerida y no presentara irregularidades. Este control previo garantiza que las muestras estén en condiciones adecuadas para continuar con los ensayos del método Marshall.

Figura. 10

Enfriamiento de los especímenes a temperatura ambiente

**Figura. 11**

Probetas desmoldadas y numeradas



4.1.6. Determinación de los parámetros volumétricos

Con el propósito de evaluar de manera integral el comportamiento volumétrico y estructural de las mezclas asfálticas diseñadas, se determinaron los principales parámetros físicos que describen la relación entre los agregados minerales y el ligante asfáltico dentro de la mezcla compactada. Estos parámetros permiten analizar aspectos fundamentales como la densificación, la distribución de vacíos y la efectividad del asfalto en el recubrimiento de los agregados, los cuales influyen directamente en el desempeño mecánico y la durabilidad del pavimento.

La determinación de dichos parámetros se realizó mediante ensayos normalizados y relaciones analíticas establecidas en la normativa técnica vigente, considerando tanto las propiedades individuales de los agregados (gruesos y finos) como las características de la mezcla asfáltica compactada y su estado máximo teórico. En la Tabla 6 se detallan los parámetros volumétricos evaluados, el método de obtención empleado y la norma o referencia correspondiente, garantizando la consistencia metodológica, la reproducibilidad de los ensayos y la confiabilidad de los resultados obtenidos. Estos resultados constituyen la

base técnica para la identificación del contenido óptimo de ligante asfáltico, conforme a los criterios del método Marshall y a las especificaciones establecidas en el EG-2013.

Tabla 6

Resumen del método de obtención de los parámetros volumétricos

Parámetro	Método de obtención	Norma / Referencia
Gravedad específica bulk de los agregados combinados (Gsb)	Ensayos de gravedad específica del agregado grueso y agregado fino, combinados según la proporción de la mezcla.	MTC E 207 y MTC E 205
Gravedad específica efectiva del agregado (Gsa)	Mediante fórmula, a partir del contenido de asfalto y gravedad específica Gmm y Gsb.	EG-2013
Gravedad específica aparente (Gsa)	Ensayos directos sobre los agregados (gruesos y finos), según su proporción.	MTC E 207 y MTC E 205
Gravedad específica bulk de la mezcla compactada (Gmb)	Ensayo de pesadas en aire, saturada y sumergida en agua sobre briquetas compactadas.	MTC E 209
Densidad máxima teórica o gravedad Rice (Gmm)	Ensayo de vacíos en mezcla suelta, eliminando el aire de la muestra.	MTC E 220
Contenido total de asfalto (Pb)	En función a la dosificación del asfalto, método Marshall.	EG 2013
Asfalto absorbido (Pba)	A partir de Gse y Gsb, refleja el asfalto retenido en los poros de los agregados.	EG 2013
Asfalto efectivo (Pbe)	Diferencia entre Pb – Pba.	EG 2013
Vacíos en el agregado mineral (VMA)	Mediante Gmb, Gsb y Pb.	EG 2013
Vacíos de aire en la mezcla compactada (Va)	Relación entre Gmm y Gmb.	EG 2013
Vacíos llenados con asfalto (VFA)	A partir de los valores de VMA y Va	EG 2013

4.1.7. Ensayo de estabilidad y flujo Marshall

Antes de realizar el ensayo en el equipo Marshall, se registran los datos de cada muestra, incluyendo el peso y las dimensiones, con el fin de determinar su densidad aparente, la cual está relacionada con la compacidad del material. Una vez obtenidos estos datos, los especímenes se acondicionan a una temperatura de 60 °C durante 30 minutos, conforme a lo

establecido en la norma EG-2013. Este proceso tiene como objetivo simular las condiciones reales a las que estará expuesto el pavimento. Transcurrido este tiempo, los especímenes se ensayan utilizando la prensa Marshall.

Figura. 12

Toma de datos de cada espécimen a ensayar



Figura. 13

Temperado de las muestras a 60°C

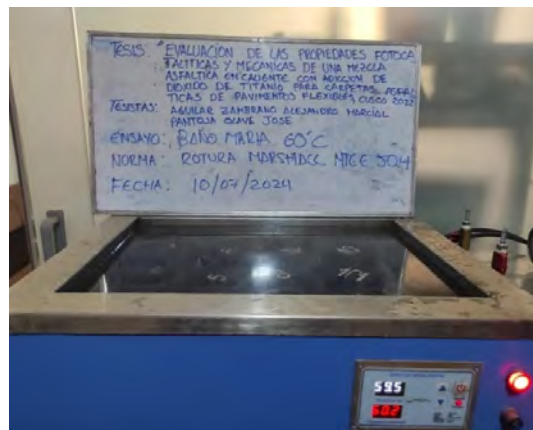


Figura. 14

Rotura de briquetas en el equipo Marshall



Finalmente, con las lecturas obtenidas, se procederá al procesamiento de datos para la determinación del contenido óptimo de asfalto.

4.1.8. Selección del contenido óptimo de asfalto

Para evaluar el contenido óptimo de asfalto, se evaluarán los parámetros volumétricos, estabilidad y flujo Marshall obtenidos previamente mediante los ensayos indicados, se toman las siguientes consideraciones:

- El peso unitario tiende a incrementarse según se aumente el contenido de asfalto, alcanzando un valor máximo, a partir del cual comienza a disminuir.
- La estabilidad Marshall presenta un comportamiento similar al peso unitario, sin embargo, su punto máximo suele presentarse con un contenido de asfalto ligeramente menor al del peso unitario.
- El flujo presenta una tendencia ascendente mientras se va incrementando el contenido de asfalto.
- Contrariamente el porcentaje de vacíos de aire (V_a) disminuye mientras se va incrementando el porcentaje de asfalto.
- Por otra parte, los vacíos en el agregado mineral (VMA) se elevan inicialmente hasta alcanzar un valor máximo y descienden al seguir incrementado el contenido de asfalto.

La selección del contenido óptimo de asfalto puede variar según la normativa aplicada, sin embargo, es recomendable considerar que, el contenido de asfalto proporcione la máxima estabilidad, produzca la máxima densidad y que el contenido de vacíos de aire este alrededor del 4% (Menéndez, 2016).

La elección del contenido óptimo de asfalto busca el equilibrio técnico que otorgue simultáneamente resistencia, durabilidad y estabilidad volumétrica a la mezcla asfáltica.

4.2. Elaboración de muestras modificadas con dióxido de titanio

4.2.1. Descripción del dióxido de titanio empleado

El dióxido de titanio (TiO_2) empleado en la investigación corresponde al grado 826 (grado técnico), suministrado por Oregon Chem Group, empresa distribuidora de materiales e insumos químicos con sede en la ciudad de Lima. Este material se caracteriza por su alta durabilidad, resistencia al calor, retención de brillo y propiedades ópticas que lo hacen idóneo para aplicaciones en recubrimientos industriales y plásticos. Según la ficha técnica (adjuntada en los anexos) se trata de un pigmento de TiO_2 con un grado de pureza del 93%, su producción cumple con las normas ASTM D 476, ISO 591-1:2000 y estándares NSF/ANSI 14/61.

El dióxido de titanio (TiO_2) empleado posee una alta pureza (93%) y tamaño de partícula de $0.2 \mu\text{m}$, estas características son fundamentales para la eficiencia en la degradación de contaminantes atmosféricos y autolimpieza de la superficie asfáltica, asimismo, la estabilidad térmica con la que cuenta el TiO_2 , permite mantener su estabilidad y actividad fotocatalítica incluso a las temperaturas que se alcanzan en las mezclas asfálticas en caliente (Armakovic, 2022).

En la Tabla 7 se presentan características principales extraídas de la ficha técnica proporcionada por el proveedor.

Tabla 7

Resumen de características del TiO_2 empleado

Característica	Valor
Pureza	93 %
Gravedad específica	4
Densidad aparente	0.8 kg/l
Tamaño de partícula (μm)	0.2
Estabilidad térmica	Hasta 600°C

Nota: Datos extraídos de la ficha técnica del TiO_2 proporcionado por Oregon Chem Group

4.2.2. Procedimiento de elaboración de muestras modificadas

La producción de briquetas de mezclas asfálticas con adición de dióxido de titanio se llevó a cabo siguiendo el mismo procedimiento empleado para la preparación de la mezcla convencional, diferenciándose principalmente en la variación de las proporciones de los componentes, las cuales fueron ajustadas en función del porcentaje de dióxido de titanio incorporado. El dióxido de titanio se añadió en proporciones de 0%, 2%, 4%, 6% y 8% en relación con el peso total de la mezcla, como parte del agregado mineral, considerándose como un cuarto tipo de agregado que interviene en la gradación del filler. Este material se incorporó al diseño como un reemplazo parcial de la arena fina de Combapata, con el objetivo de asegurar una adecuada dispersión y distribución homogénea del dióxido de titanio dentro de la mezcla, considerando que dicha arena aporta la mayor proporción de finos al sistema. Se garantizó la uniformidad de la mezcla y una adecuada interacción entre todos sus componentes.

Figura. 15

Dosificación de mezclas de asfalto con adición de TiO_2



Figura. 16

Pesado de muestras con asfalto

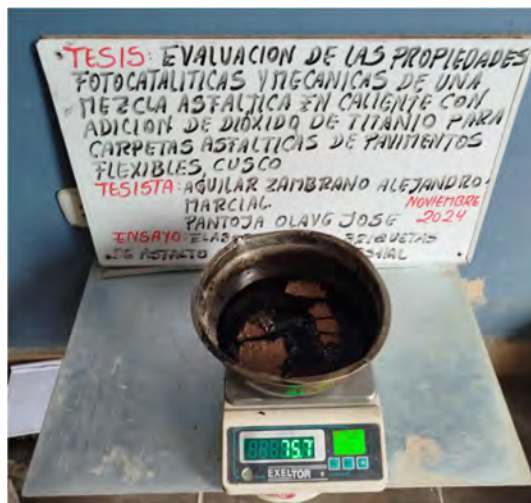


Figura. 17

Mezclado de agregados con adición de TiO_2

**Figura. 18**

Desmolado de probetas con adición de TiO_2

**Figura. 19**

Probetas de mezcla asfáltica con adición de TiO_2 resultantes



4.2.3. Propiedades volumétricas de la mezcla modificada

Las propiedades volumétricas analizadas en las mezclas asfálticas con adición de dióxido de titanio son las mismas que se estudian en una mezcla convencional. Sin embargo, en este caso, se mantiene constante el contenido de asfalto y se varía únicamente la proporción de dióxido de titanio añadido. Esta sustancia se incorpora como un agregado más, lo que implica que la gravedad específica neta del agregado combinado cambia en función

del contenido de dióxido de titanio. A diferencia del análisis anterior donde se modificaba el porcentaje de asfalto y se trabajaba con una gravedad específica del agregado constante, aquí la variable principal es la cantidad de dióxido de titanio.

Bajo esta premisa, se vuelven a evaluar todas las propiedades volumétricas para cada uno de los especímenes. Finalmente, se determina el porcentaje óptimo de dióxido de titanio en función del comportamiento observado en cada curva generada para los distintos parámetros analizados. Estos se comparan con los rangos establecidos para una mezcla asfáltica óptima, considerando indicadores clave como el contenido de vacíos de aire, los vacíos llenos de asfalto, la estabilidad y el flujo.

4.2.3.1. Densidad máxima teórica

Adicionalmente, al igual que en el diseño de la mezcla convencional, se preparó una muestra no compactada para cada proporción de dióxido de titanio, destinada a la ejecución del ensayo Rice.

Este procedimiento se realizó conforme a la norma MTC E-508, la cual establece el método para la determinación de la densidad máxima teórica de las mezclas asfálticas. Dicho valor resulta fundamental para el análisis volumétrico, ya que constituye la referencia necesaria para el cálculo del contenido de vacíos de aire, los vacíos llenos con asfalto y otros parámetros volumétricos esenciales que permiten evaluar el comportamiento y la calidad de la mezcla.

Asimismo, la obtención precisa de la densidad máxima teórica permite verificar la homogeneidad del proceso de mezclado y la adecuada incorporación del dióxido de titanio en la matriz asfáltica, reduciendo la variabilidad experimental.

De este modo, se facilita la comparación objetiva entre las distintas dosificaciones evaluadas y se aporta mayor confiabilidad a los resultados obtenidos en el diseño Marshall y en la evaluación del desempeño de las mezclas modificadas.

Figura. 20

Equipo empleado para la elaboración del ensayo Rice



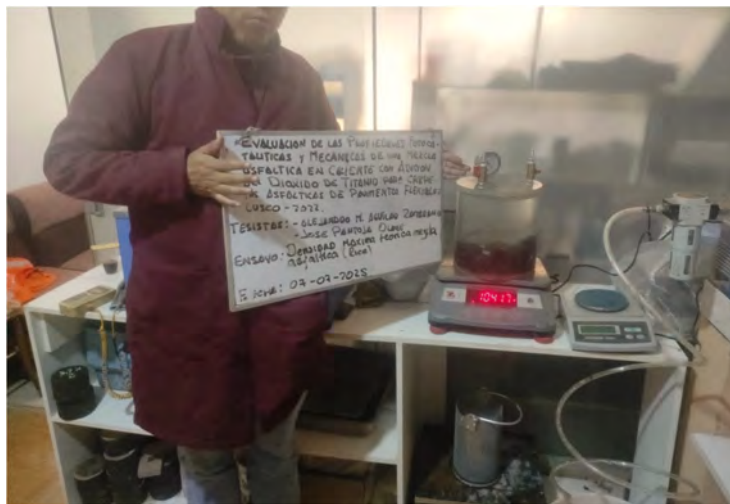
Empleando la bomba de vacío mostrada en la **Figura. 20**, la muestra de mezcla asfáltica en estado suelto es sometida a un proceso de desaireación, el cual tiene como finalidad remover el aire atrapado en los vacíos del material. Este procedimiento se desarrolla aplicando vacío de forma gradual, favoreciendo la liberación del aire ocluido y permitiendo que el agua penetre completamente en los poros de la mezcla, logrando así una saturación adecuada.

Una vez completado el proceso de desaireación, se procede al registro de la masa sumergida del matraz que contiene la mezcla completamente saturada. Este valor permite determinar el volumen verdadero del material, eliminando la influencia del aire contenido en los vacíos. A partir de la masa seca de la muestra y del volumen obtenido, se calcula el peso específico máximo teórico (Gmm) de la mezcla asfáltica, parámetro esencial para el análisis volumétrico y el cálculo de los vacíos de aire en el diseño Marshall.

El procedimiento descrito se repite de manera sistemática para cada una de las proporciones de dióxido de titanio incorporadas en la mezcla, asegurando la uniformidad del método de ensayo y permitiendo evaluar de forma comparativa la influencia del TiO_2 sobre las propiedades volumétricas de las mezclas asfálticas analizadas.

Figura. 21

Ensayo Rice a las probetas con adición de TiO_2



4.3. Ensayos de propiedades fotocatalíticas

4.3.1. Ensayo de autolimpieza

Para la determinación de la propiedad fotocatalítica de autolimpieza, se siguió el procedimiento establecido en la norma italiana UNI 11259:2016, titulada “Determinación de la actividad fotocatalítica de aglutinantes hidráulicos – Método de ensayo con Rodamina”. Esta metodología permite evaluar la capacidad de los materiales con propiedades fotocatalíticas para degradar compuestos orgánicos depositados sobre su superficie bajo la acción de radiación luminosa.

El ensayo se realizó sobre un total de 15 probetas, correspondientes a mezclas asfálticas con contenidos de dióxido de titanio (TiO_2) de 0%, 2%, 4%, 6% y 8%, elaborándose tres probetas por cada proporción, con el objetivo de evaluar de manera comparativa la actividad fotocatalítica de las distintas dosificaciones.

El desarrollo del ensayo se llevó a cabo en el laboratorio MC Química LAB, especializado en este tipo de evaluaciones, el cual proporcionó el soporte técnico necesario y cuenta con la instrumentación requerida para la correcta ejecución del procedimiento. La evaluación de la degradación del colorante Rodamina se realizó mediante espectrofotometría,

técnica que permite cuantificar la variación de la absorbancia del colorante a una longitud de onda característica, asociando dicha variación con la disminución de su concentración sobre la superficie de las probetas. Para el desarrollo del ensayo se procedió de la siguiente forma:

Preparación de las probetas:

Se elaboraron las probetas con adición de dióxido de titanio (TiO_2), como se indicó anteriormente, las probetas fueron etiquetadas según el porcentaje de TiO_2 incorporado, previo al inicio del ensayo, se acondicionaron a temperatura ($20 \pm 2^\circ\text{C}$) y humedad ($50 \pm 5\%$) controlada según lo indicado en la norma, de esta forma la película de rodamina B se mantendrá uniforme durante el procedimiento del ensayo.

Aplicación de la Rodamina B:

Cada probeta fue recubierta de manera uniforme con una solución acuosa de Rodamina B, empleada como compuesto orgánico modelo para la evaluación de la propiedad fotocatalítica de autolimpieza. La solución fue preparada a una concentración de 10 mg/L y se aplicó un volumen total de 10 mL sobre la superficie expuesta de cada probeta.

La aplicación se realizó mediante una pipeta automática, dosificando el volumen de forma controlada y distribuyéndolo homogéneamente sobre el área de evaluación.

Exposición a radiación UV:

Las probetas se colocaron dentro de una cámara de ensayo equipada con una lámpara de radiación UV-A con una longitud de onda de 365 nm, correspondiente al rango de activación fotocatalítica del dióxido de titanio. La lámpara se ubicó a una distancia constante de 30 cm respecto a la superficie expuesta de las probetas, con el fin de asegurar una irradiancia homogénea durante todo el ensayo.

La radiación UV-A se aplicó de manera continua y uniforme, manteniendo condiciones geométricas controladas entre la fuente de luz y los especímenes. La exposición se realizó en dos intervalos de tiempo, de 4 y 26 horas, lo que permitió evaluar la evolución

temporal de la actividad fotocatalítica y comparar el grado de degradación del compuesto orgánico modelo entre las distintas dosificaciones de TiO_2 .

Figura. 22

Aplicación de rodamina B a las probetas de asfalto y exposición a radiación UV-A

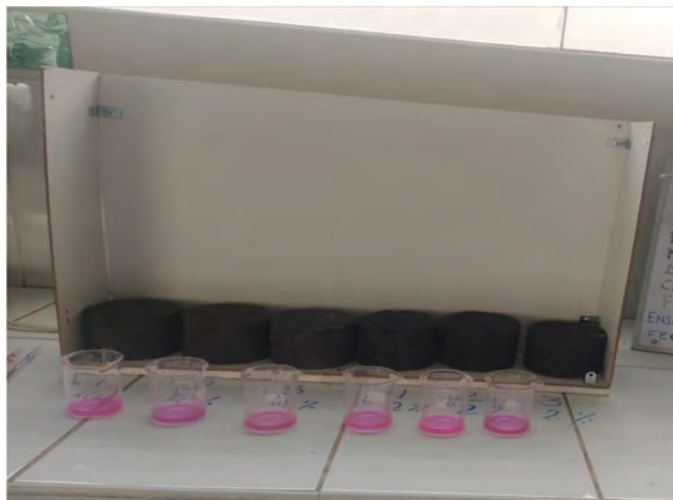


Medición de la degradación:

La medición de la degradación de la Rodamina B se realizó mediante espectrofotometría UV-Visible, registrando la absorbancia inicial (a_0) de la solución a una longitud de onda de 554 nm, correspondiente al máximo de absorción del colorante.

En una primera etapa, las probetas fueron expuestas a radiación UV-A durante 4 horas. Transcurrido este periodo, la solución de Rodamina presente sobre la superficie de cada probeta fue retirada cuidadosamente mediante una pipeta automática, evitando alterar la superficie del espécimen, y se procedió a la medición de la absorbancia en el espectrofotómetro, obteniéndose el valor a_4 .

Posteriormente, las probetas continuaron expuestas a radiación UV-A hasta completar un tiempo total de 26 horas, repitiéndose el mismo procedimiento de extracción y lectura para registrar la absorbancia correspondiente, a_{26} . La variación de los valores de absorbancia en función del tiempo de exposición permitió evaluar la eficiencia de autolimpieza de las mezclas asfálticas con distintos contenidos de TiO_2 .

Figura. 23*Concentración de rodamina B para lectura en espectrofotómetro***Figura. 24***Lectura de absorbancia***Registro y análisis de resultados:**

Finalmente, se determinó el porcentaje de degradación de la Rodamina B para cada probeta, con el fin de evaluar la actividad fotocatalítica de las mezclas asfálticas en función del contenido de TiO_2 y del tiempo de exposición a la radiación UV-A. De acuerdo con los criterios establecidos en la norma UNI 11259:2016, un material puede ser considerado fotocatalítico con propiedades de autolimpieza cuando la degradación del contaminante orgánico es superior al 20 % a las 4 horas de exposición y mayor al 50 % a las 26 horas,

parámetros que fueron empleados como referencia para el análisis y comparación de los resultados obtenidos.

$$R4 = \frac{a0 - a4}{a0} * 100 > 20\%$$

$$R26 = \frac{a0 - a26}{a0} * 100 > 50\%$$

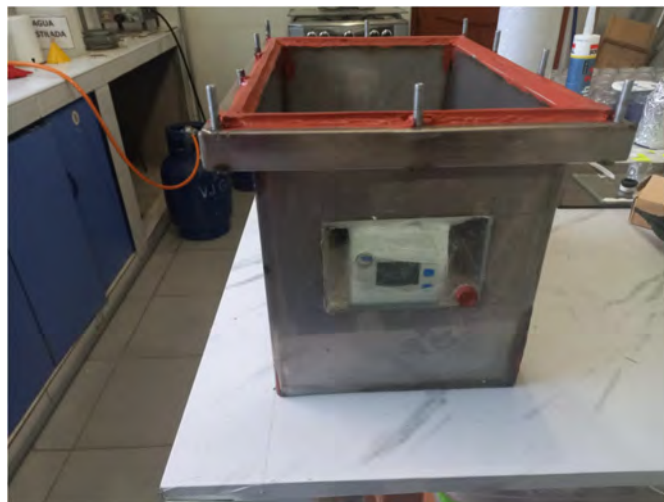
Donde: R4 = porcentaje de degradación a las 4 horas de exposición; R26 = porcentaje de degradación a las 26 horas de exposición; a0 = absorbancia inicial; a4 = absorbancia a las 4 horas de exposición; a26 = absorbancia a las 26 horas de exposición.

Cabe indicar que se debe cumplir ambas condiciones para ser considerado como material fotocatalítico con propiedad de autolimpieza.

4.3.2. Ensayo de purificación del aire

Para la determinación de la propiedad fotocatalítica de purificación de aire, se procedió según lo indicado en la norma ISO 22197-1 “Método de ensayo para el rendimiento de purificación del aire de materiales fotocatalíticos semiconductores – parte 1: Eliminación de óxido nítrico (NO)”, al igual que para el ensayo de autolimpieza, se realizaron a 15 probetas de asfalto con adición de TiO₂ en proporciones de 0%, 2%, 4%, 6%, 8% (3 probetas por proporción), asimismo, este ensayo fue elaborado en el laboratorio MC Química LAB, proporcionando el soporte técnico requerido y la instrumentación necesaria.

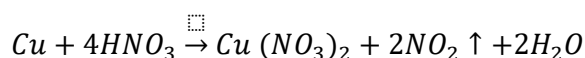
Previo a la ejecución del ensayo, se procedió a la fabricación de una cámara hermética de acero inoxidable de 27 x 45 x 27 cm, con una tapa de acero inoxidable de 1/8” de espesor y 10 orificios distribuidos para la sujeción mediante pernos y tuercas, en la abertura para la tapa se fijó un jebe de alta presión en todo el contorno, asegurando de esta forma la hermeticidad de la cámara. A dicha cámara se incorporó el equipo de detección de concentración de gas dióxido de nitrógeno (NO₂), el ventilador y la lampara de emisión UV-A de 365nm.

Figura. 25*Cámara hermética de acero inoxidable*

Luego de la fabricación de la cámara hermética, se procedió con el ensayo de la siguiente manera:

Generación de gas dióxido de nitrógeno (NO₂):

El gas NO₂ se generó in situ dentro de la cámara de ensayo mediante la reacción química controlada entre cobre metálico (Cu) y ácido nítrico (HNO₃), aprovechando el carácter oxidante de este último. La reacción produce nitrato de cobre (II), agua y dióxido de nitrógeno gaseoso, según la ecuación química balanceada:



Donde: Cu = Cobre metálico; HNO₃ = ácido nítrico, Cu (HNO₃)₂ = nitrato de cobre (II); NO₂↑ = dióxido de nitrógeno gaseoso; H₂O = agua.

Para garantizar una generación de NO₂ constante y detectable por el equipo lector de concentración de gases, se empleó una dosificación controlada de 0.005g de cobre y 50 µl de ácido nítrico al 32.5%. la selección de estas cantidades se estableció a partir de pruebas preliminares, realizadas con el objetivo de alcanzar una concentración inicial de NO₂ estable y reproducible dentro de la cámara de ensayo, la cual fue verificada mediante las lecturas

obtenidas con el detector de concentración de gases. Este procedimiento permitió asegurar condiciones controladas y comparables para la evaluación experimental.

Preparación de la muestra:

Cada probeta se ensayó individualmente, se fijó la probeta dentro de la cámara hermética, asegurando que se mantenga fija durante todo el ensayo.

Exposición a luz UV-A:

Para la activación del dióxido de titanio (TiO_2) se empleó una linterna de emisión UV-A con una longitud de onda de 365 nm, instalada en el interior de la cámara de ensayo de manera que garantizara una irradiación directa y uniforme sobre la superficie de las probetas. La irradiancia de la fuente fue ajustada a 10 W/m^2 , cumpliendo con los requisitos de la norma ISO 22197-1, para asegurar condiciones controladas y reproducibles de fotocatálisis. La radiación UV-A induce la activación fotocatalítica del TiO_2 , generando pares electrón-hueco en su superficie, los cuales promueven la formación de especies reactivas responsables de la degradación del NO_2 presente en el interior de la cámara.

Circulación del gas:

Para garantizar la homogeneidad de la concentración de NO_2 dentro de la cámara, se instaló un ventilador dentro, asegurando un funcionamiento constante de 2 horas, tiempo que dura el ensayo.

Medición del NO_2 :

La determinación de la concentración de dióxido de nitrógeno (NO_2) en el interior de la cámara de ensayo se realizó mediante un detector específico para este gas (medidor AQ-300), el cual permite efectuar mediciones en tiempo real. La primera medición se registró a los 15 minutos de iniciado el ensayo, intervalo en el cual la reacción química entre el cobre y el ácido nítrico alcanza su mayor generación de NO_2 y tiende a estabilizarse dentro de la cámara. Posteriormente, se realizaron mediciones adicionales a 1 y 2 horas de exposición

continua a radiación UV-A, con el propósito de evaluar la evolución temporal de la concentración de NO_2 y analizar la capacidad de reducción fotocatalítica del material evaluado. Estas mediciones permitieron observar la variación de la concentración del gas en función del tiempo de exposición y de la presencia del TiO_2 en la mezcla asfáltica.

Registro y análisis de datos:

Las variaciones en la concentración de dióxido de nitrógeno (NO_2) registradas durante los ensayos se emplearon como indicador de la actividad fotocatalítica de las probetas de mezcla asfáltica con adición de dióxido de titanio (TiO_2), comparando las concentraciones medidas en distintos intervalos de tiempo bajo exposición a radiación UV-A. Cada ensayo se ejecutó bajo condiciones controladas y reproducibles, garantizando la consistencia de los resultados y la adecuada comparación entre probetas con y sin TiO_2 . Según la norma ISO 22197-1, no se establece un valor mínimo de reducción de NO_x ; por ello, cualquier disminución detectable de NO_2 se interpretó como evidencia de actividad fotocatalítica y se empleó como parámetro comparativo de eficiencia.

Figura. 26

Colocación de probetas en cámara hermética



Figura. 27

Detector de gases NO2AQ-300



Figura. 28

Linterna de emisión UV-A con longitud de onda 365nm



Estimación de eficiencia de degradación en condición reales de campo

Los ensayos de actividad fotocatalítica realizados en laboratorio están bajo condiciones controladas, considerando concentraciones constantes de NO_2 , humedad relativa y temperatura estables, así como una irradiancia UV-A fija, lo que permite evaluar de manera reproducible la eficiencia fotocatalítica intrínseca del material. Sin embargo, dichas condiciones difieren de las que se presentan en un entorno urbano real, donde la radiación solar, la humedad relativa, la temperatura y el régimen de ventilación varían de forma continua. La norma ISO 22197-1, en su Anexo A, establece que los resultados obtenidos en laboratorio no pueden ser transferidos directamente a condiciones reales de campo.

No existe un método estandarizado o aprobado para proyectar la eficiencia fotocatalítica medida en laboratorio hacia condiciones de campo, debido a la variabilidad de irradiancia solar, condiciones ambientales y parámetros experimentales. Por ello, cualquier proyección se considera una estimación con incertidumbre inherente (Russell et al., 2021)

Con el fin de proyectar la eficiencia fotocatalítica medida en laboratorio hacia condiciones de campo, se realizará una estimación considerando la variabilidad de factores ambientales como la intensidad y el espectro de radiación solar, la nubosidad, la humedad, el viento y la exposición de las superficies. Para reflejar esta variabilidad, la proyección se efectuará dentro de un rango de eficiencia entre 10 % y 100 % del valor observado en laboratorio, permitiendo definir un rango de desempeño probable del material bajo

condiciones reales de exposición y facilitando la evaluación comparativa de la reducción de NO₂ en escenarios prácticos.

Es importante destacar que esta estimación se realiza únicamente con la finalidad de visualizar la posible eficiencia del material frente a las condiciones reales de concentración de NO₂ en la actualidad, utilizando como referencia los datos reportados por estudios recientes en Cusco. Esta aproximación no constituye un método normado ni garantiza valores exactos, sino que permite analizar de manera preliminar el comportamiento esperado del material bajo condiciones ambientales reales.

4.4. Ensayos de propiedades mecánicas

4.4.1. Ensayo de estabilidad y flujo Marshall de la mezcla modificada

Para la determinación de este ensayo, se fabricaron 15 probetas de mezcla asfáltica con adición de dióxido de titanio (TiO₂) en proporciones de 0%, 2%, 4%, 6% y 8%, elaborándose tres probetas por cada proporción, con el fin de obtener resultados representativos y comparables.

El procedimiento seguido fue el mismo que el aplicado en el diseño Marshall de la mezcla convencional sin adición de TiO₂, realizándose la caracterización de las probetas conforme a lo establecido en la norma EG-2013. Inicialmente, se registraron las dimensiones geométricas y los diferentes pesos de cada briqueta (en estado seco, sumergido en agua y superficialmente saturado), información necesaria para el cálculo de la gravedad específica de la mezcla asfáltica en cada caso.

Posteriormente, los especímenes fueron acondicionados mediante inmersión en un baño maría a una temperatura de 60 °C durante un periodo de 30 minutos, según lo indicado por la normativa vigente. Finalizado este acondicionamiento térmico, las probetas se ensayaron de manera individual en la prensa Marshall, obteniéndose los valores de estabilidad y flujo, los cuales constituyen parámetros fundamentales para la evaluación del

comportamiento mecánico y la comparación del desempeño de las mezclas asfálticas con diferentes contenidos de TiO_2 .

Figura. 29

Registro de datos de las probetas con adición de TiO_2

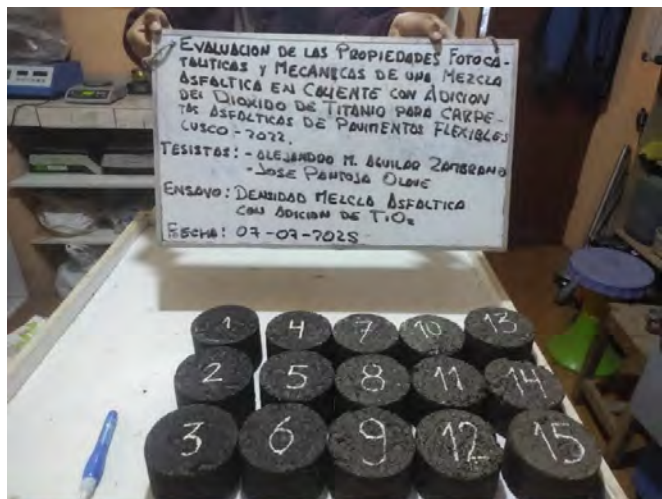


Figura. 30

Acondicionamiento de probetas en baño maría a 60°C



Posteriormente con los datos obtenidos del ensayo Marshall y complementando con los datos obtenidos en los ensayos determinantes de las propiedades fotocatalíticas, se determinará el porcentaje óptimo de dióxido de titanio (TiO_2), de esta forma obtendremos el diseño final de la mezcla y se procederá a evaluar los ensayos mecánicos complementarios de módulo resiliente y tensión de la mezcla.

4.4.2. Ensayo de tracción indirecta para determinación del módulo resiliente

El ensayo de Módulo Resiliente, descrito en la norma AASHTO TP-31 “Método estándar para determinar el módulo resiliente de mezclas bituminosas mediante tensión indirecta”, tiene como objetivo principal determinar la capacidad elástica recuperable de una mezcla asfáltica frente a cargas repetitivas, representadas por la acción del tránsito. A través de este procedimiento se mide la respuesta del material en términos de esfuerzo y deformación recuperable, lo cual permite cuantificar la rigidez de la mezcla y predecir su desempeño estructural en condiciones de servicio. Este parámetro es fundamental para el diseño y evaluación de pavimentos flexibles, ya que refleja la habilidad de la mezcla para soportar esfuerzos dinámicos sin acumular deformaciones permanentes que conduzcan a agrietamientos o ahuellamientos prematuros.

El cálculo del módulo resiliente (M_r) se obtiene mediante la siguiente relación:

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r}$$

Donde: σ_d = esfuerzo desvío aplicado (kPa o MPa); ε_r = deformación recuperable medida en dirección axial (adimensional).

El proceso de registro de cargas y deformaciones se realiza de manera automática mediante equipos triaxiales, los cuales aplican cargas repetitivas bajo condiciones controladas, simulando las sollicitaciones que experimenta la mezcla asfáltica en servicio. Los valores de carga y deformación recuperable se capturan mediante sensores de desplazamiento, permitiendo calcular el módulo resiliente como la relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación elástica. El resultado se expresa en mega pascales (MPa) y constituye un indicador directo de la rigidez de la mezcla.

Los valores de módulo resiliente en mezclas asfálticas presentan un rango amplio, dependiente del tipo de ligante, los agregados, el nivel de compactación y la temperatura del ensayo. De manera referencial, en mezclas densas en caliente los valores típicos oscilan entre

2 000 MPa y 6 000 MPa, pudiendo alcanzar valores mayores en mezclas de mayor rigidez. Valores bajos se asocian a mezclas más flexibles, mientras que valores elevados corresponden a mezclas más rígidas, con implicancias en la susceptibilidad a deformaciones permanentes o fisuración.

En este sentido, el ensayo de módulo resiliente permite caracterizar la respuesta mecánica de la mezcla asfáltica frente a cargas repetidas y aportar información relevante para el diseño estructural y la evaluación del desempeño de pavimentos flexibles. Asimismo, los resultados obtenidos pueden emplearse para analizar la influencia de variables como la composición granulométrica, el contenido de ligante y la incorporación de materiales modificantes, siendo especialmente útiles para comparar el comportamiento de mezclas convencionales y modificadas. El procedimiento se inicia con la elaboración de especímenes cilíndricos compactados bajo condiciones controladas, con dimensiones estandarizadas de 101,6 mm de diámetro y aproximadamente 63,5 mm de altura, asegurando uniformidad, repetibilidad y confiabilidad en los resultados del ensayo, así como una adecuada interpretación de los parámetros mecánicos obtenidos.

Figura. 31

Probetas de mezcla asfáltica convencional para determinación de módulo resiliente



Figura. 32

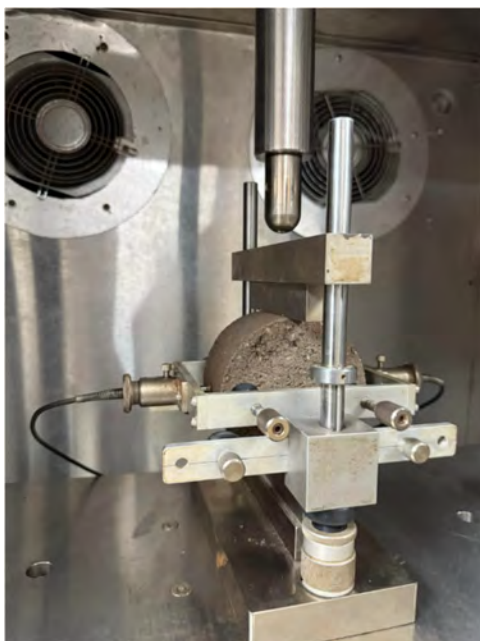
Probetas de mezcla asfáltica con adición de 2% de TiO_2 para determinación de módulo resiliente



Una vez acondicionados, los especímenes se colocan en una celda triaxial que aplica una presión confinante constante, representando las condiciones de confinamiento que experimenta el material en el pavimento real. Posteriormente, se aplican cargas repetidas en forma de pulsos de esfuerzo axial, con una duración y frecuencia establecidas en la norma.

Figura. 33

Ensayo para determinación de módulo resiliente – equipo triaxial



Durante cada ciclo de carga se registran, mediante transductores de desplazamiento, las deformaciones elásticas recuperables en direcciones axial y radial. Estos datos se procesan para calcular el módulo resiliente como la relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación recuperada en cada ciclo. De esta forma, el ensayo reproduce de manera controlada el efecto de las cargas vehiculares sobre la mezcla y proporciona un valor representativo de su capacidad de soportar esfuerzos dinámicos continuos. En conclusión, el método AASHTO TP-31 ofrece una caracterización precisa y confiable del comportamiento resiliente de las mezclas asfálticas, insumo esencial para el diseño y la evaluación estructural de pavimentos.

4.4.3. Ensayo Lottman modificado para determinación de la resistencia a la tensión

El ensayo Lottman modificado, establecido en la norma AASHTO T-283 “Método estándar de ensayo para la resistencia de mezclas asfálticas compactadas (HMA) al daño inducido por humedad”, tiene como propósito central determinar la resistencia a la tensión indirecta que presentan las mezclas asfálticas cuando son sometidas a cargas. Este parámetro resulta esencial porque refleja la capacidad del asfalto de soportar esfuerzos de tracción inducidos en servicio, los cuales están directamente asociados al inicio y propagación de fisuras en el pavimento. A partir de esta determinación primaria se evalúa, de manera secundaria, la susceptibilidad al daño por humedad, ya que la presencia de agua puede acelerar el debilitamiento de la mezcla y, por ende, reducir su desempeño estructural.

El valor más importante que se obtiene es el Índice de Retención de Resistencia (TSR, por sus siglas en inglés), el cual expresa en porcentaje la relación entre la resistencia a la tensión indirecta de probetas acondicionadas con humedad respecto a probetas secas. De forma complementaria, se obtiene la resistencia a la tracción indirecta (IDT) en ambas condiciones, lo que permite cuantificar con mayor detalle la capacidad de la mezcla para resistir esfuerzos de tensión antes de fallar. Cabe señalar que, aunque el asfalto no se diseña

para soportar tracción directa, este método reproduce indirectamente dichos esfuerzos y ofrece un panorama confiable sobre su estabilidad mecánica.

La resistencia a la tracción indirecta (IDT) se calcula mediante la siguiente expresión:

$$IDT = \frac{2P}{\pi \cdot D \cdot t}$$

Donde: P = carga máxima aplicada (N); D = diámetro de la probeta (mm); t = espesor de la probeta (mm).

Posteriormente, con los valores obtenidos de IDT en las condiciones seca y húmeda, se calcula el TSR (%) como:

$$TSR\% = \frac{IDT_{HUMEDO}}{IDT_{SECO}} \times 100$$

Donde: IDT húmedo corresponde a la resistencia promedio a la tensión indirecta de las probetas acondicionadas con humedad. IDT seco corresponde a la resistencia promedio de las probetas secas.

En cuanto al procedimiento experimental, se elaboraron seis probetas cilíndricas de mezcla asfáltica para cada tipo de mezcla: seis para la mezcla convencional y seis para la mezcla con adición de TiO_2 , compactadas cuidadosamente hasta alcanzar un contenido de vacíos de aire del $7 \pm 0.5 \%$, siguiendo los parámetros establecidos en el diseño Marshall. Una vez fabricadas, las probetas se dividieron en dos grupos para la evaluación de la resistencia a la tensión indirecta y la susceptibilidad al daño por humedad. El primer grupo, compuesto por tres probetas de cada mezcla, permaneció seco y se utilizó como grupo de control para comparar los efectos de la humedad. El segundo grupo se sometió a un acondicionamiento de humedad controlado, que incluyó una saturación parcial bajo vacío para asegurar la penetración del agua en los vacíos de la mezcla, seguida de un congelamiento mínimo de 16 horas a $-18^\circ C$, con el fin de simular los efectos de ciclos de congelación y descongelación. Finalmente, las probetas se acondicionaron en agua a $60^\circ C$

durante 24 horas, replicando las condiciones de humedad extrema que pueden presentarse en servicio y permitiendo evaluar el efecto de la humedad en la resistencia mecánica de la mezcla. Este procedimiento asegura que los ensayos reflejen tanto el comportamiento de la mezcla en condiciones ideales como su desempeño bajo estrés hídrico. Finalmente, todas las probetas, tanto secas como tratadas, se ensayan a compresión indirecta a 25 °C para determinar su resistencia a la tensión. Con los valores de carga máxima obtenidos se calcula el TSR, cuyo valor mínimo aceptable recomendado por la normativa es del 80 %, aunque puede variar según especificaciones locales o de proyecto.

Figura. 34

Ensayo Lottman para tracción indirecta condición seca



CAPÍTULO V. RESULTADOS

5.1. Diseño de mezcla asfáltica convencional

5.1.1. Evaluación de los agregados

Los resultados para los agregados empleados se resumen en las tablas 8, 9 y 10.

Tabla 8

Resumen de resultados agregado grueso Morro Blanco

Ensayo	Normativa	Requisito (%)	Resultado (%)
Durabilidad al sulfato de magnesio	MTC E 209	< 15	1
Abrasión Los Ángeles	MTC E 207	< 35	23.71
Adherencia	MTC E 517	> 95	> 95
Índice de Durabilidad	MTC E 214	> 35	36.04
Partículas chatas y alargadas	ASTM 4791	< 10	9.92
Caras fracturadas	MTC E 210	90/70	95/75
Sales solubles totales	MTC E 219	< 0.5	0.019
Absorción	MTC E 206	< 1.0	0.91

Tabla 9

Resumen de resultados agregado fino Morro Blanco

Ensayo	Normativa	Requisito (%)	Resultado (%)
Equivalente de arena	MTC E 114	70	53.91
Angularidad del agregado fino	MTC E 222	40	46.68
Azul de metileno	AASTHO TP 57	< 8	3.8
Índice de plasticidad malla N°40	MTC E 111	NP	NP
Durabilidad al sulfato de magnesio	MTC E 209	< 18	1
Índice de durabilidad	MTC E 214	> 35	51
Índice de plasticidad malla N°200	MTC E 111	NP	NP
Sales solubles totales	MTC E 219	< 0.5	0.019
Absorción	MTC E 205	< 1.0	0.37

Tabla 10*Resumen de resultados agregado fino Combapata*

Ensayo	Normativa	Requisito (%)	Resultado (%)
Equivalente de arena	MTC E 114	70	68.57
Angularidad del agregado fino	MTC E 222	40	56.81
Azul de metileno	AASTHO TP 57	< 8	2.3
Índice de plasticidad malla N°40	MTC E 111	NP	NP
Durabilidad al sulfato de magnesio	MTC E 209	< 18	3
Índice de durabilidad	MTC E 214	> 35	36.04
Índice de plasticidad malla N°200	MTC E 111	NP	NP
Sales solubles totales	MTC E 219	< 0.5	0.013
Absorción	MTC E 205	< 1.0	0.45

5.1.1.1. Durabilidad al sulfato de magnesio agregado grueso**Tabla 11***Resistencia al sulfato de magnesio para agregado grueso cantera Morro Blanco*

Retenido en tamiz	Peso seco (gr)	Peso luego del ensayo (gr)	Pérdida total (gr)	Pérdida (%)
Malla 1/2"	630.03	627.11	2.93	0.46
Malla 3/8"	370.02	369.01	1.01	0.27
Malla N°4	300.50	299.66	0.84	0.28
Total	1,300.55			1.02

5.1.1.2. Abrasión los ángeles agregado grueso**Tabla 12***Abrasión lo Ángeles para agregado grueso Morro Blanco – Gradación tipo B*

Descripción	Valor (gr)
Peso retenido malla 1/2" (a)	2,501.41
Peso retenido malla 3/8" (b)	2,501.06
Peso total de la muestra (d = a+b)	5,002.47
Peso que pasa la malla N°12 (e)	1,186.06
Abrasión Los Ángeles (Ab = e/d)	23.71%

5.1.1.3. Adherencia agregado grueso

Tabla 13

Adherencia agregado grueso para agregado grueso cantera Morro Blanco

Muestra	Superficie recubierta (%)	Observación visual
1	94	Desprendimiento puntual
2	96	Desprendimiento mínimo en bordes
3	95	Se aprecia un recubrimiento estable
Promedio	95	

5.1.1.4. Partículas chatas y alargadas

Tabla 14

Porcentaje de partículas chatas según cantidad

Tamiz	Cantidad	%	Cantidad Part. Chatas	% Part. Chatas	% Chatas corregido
Proporción 1:2					
Malla 1/2"	141	12.72	17	12.06	1.53
Malla 3/8"	152	13.71	14	9.21	1.26
Malla N°4	128	11.51	13	10.16	1.17
Total	421				3.97
Proporción 1:3					
Malla 1/2"	141	12.72	10	7.09	0.90
Malla 3/8"	152	13.71	11	7.24	0.99
Malla N°4	128	11.51	9	7.03	0.81
Total	421				2.71
Proporción 1:4					
Malla 1/2"	141	12.72	4	2.84	0.36
Malla 3/8"	152	13.71	5	3.29	0.45
Malla N°4	128	11.51	2	1.56	0.18
Total	421				0.99
Proporción 1:5					
Malla 1/2"	141	12.72	0	-	-
Malla 3/8"	152	13.71	2	1.32	0.18
Malla N°4	128	11.51	1	0.78	0.09
Total	421				0.27

Tabla 15*Porcentaje de partículas alargadas según cantidad*

Tamiz	Cantidad	%	Cantidad Part. Alargadas	% Part. Alargadas	% Alargadas corregido
Proporción 1:2					
Malla 1/2"	141	12.72	19	13.48	1.71
Malla 3/8"	152	13.71	25	16.45	2.26
Malla N°4	128	11.51	22	17.19	1.98
Total	421				5.95
Proporción 1:3					
Malla 1/2"	141	12.72	13	9.22	1.17
Malla 3/8"	152	13.71	20	13.16	1.80
Malla N°4	128	11.51	16	12.50	1.44
Total	421				4.42
Proporción 1:4					
Malla 1/2"	141	12.72	7	4.96	0.63
Malla 3/8"	152	13.71	17	11.18	1.53
Malla N°4	128	11.51	9	7.03	0.81
Total	421				2.98
Proporción 1:5					
Malla 1/2"	141	12.72	5	3.55	0.45
Malla 3/8"	152	13.71	12	7.89	1.08
Malla N°4	128	11.51	6	4.69	0.54
Total	421				2.07

Se considera la suma de porcentajes de partículas chatas y alargadas, para obtener el porcentaje final.

Tabla 16*Determinación porcentaje de partículas chatas y alargadas agregado grueso Morro Blanco*

Descripción	1:2	1:3	1:4	1:5
Partículas chatas	3.97	2.71	0.99	0.27
Partículas alargadas	5.95	4.42	2.98	2.07
Total	9.92	7.13	3.97	2.35

5.1.1.5. Índice de durabilidad agregado grueso

Tabla 17

Índice de durabilidad para agregado grueso cantera Morro Blanco

Descripción	Valor
Altura de sedimentación (mm)	5.00
Ángulo (0.29+0.15H) (rad)	1.04
Cotangente del ángulo	0.277
Índice de durabilidad, Dc	36.04

5.1.1.6. Caras fracturadas agregado grueso

Tabla 18

Caras fracturadas agregado grueso cantera Morro Blanco

Descripción	Peso (gr)	Porcentaje (%)
Sin caras fracturadas	238.62	4.77
Con una cara fracturada	1,012.43	20.25
Con dos caras fracturadas	3,748.95	74.98
Total	5,000.00	100
Con al menos una cara fracturada		95.23
Con al menos dos o más caras fracturadas		74.98

5.1.1.7. Sales solubles total agregado grueso

Tabla 19

Sales solubles totales agregado grueso cantera Morro Blanco

Descripción	Símbolo	Valor
Masa muestra (gr)	A	1001.10
Volumen líquidos sobrenadantes (ml)	B	428.75
Volumen alícuota (ml)	C	50.25
Masa residuo cristalizado (gr)	D	0.0223
Sales solubles totales (%)		0.019

5.1.1.8. Absorción de agregado grueso

Tabla 20

Gravedad específica y absorción agregado grueso Morro Blanco

Muestra	Símbolo	N°1	N°2	Promedio
Peso material sat. y sup. seco	W _{sss}	2,018.2	2,010.19	2,014.20
Peso de la canasta sumergida	W _{cs}	801.02	800.45	800.71
Peso de la canasta sumergida + mat.	W _{cs + m}	2,051.65	2,046.46	2,049.06
Peso al aire del material secado al horno	W _s	1,998.40	1,993.85	1,996.13
Peso del mat. Sumergido: C-B	W _{sum}	1,250.63	1,246.01	1,248.32
Volumen A-E		767.57	764.18	765.88
Gravedad específica Bulk S.S.S.: A/F	G _{sss}	2.63	2.63	2.63
Gravedad específica Bulk seca: D/F	G _m	2.3	2.61	2.61
Gravedad específica aparente: D/(F-(A-D))	G _s	2.67	2.67	2.67
% de absorción: ((A-D)/D*100)	Ab	0.99	0.82	0.91

Nota: Unidades en gr y cm

5.1.1.9. Equivalente de arena agregado fino

Tabla 21

Equivalente de arena agregado fino Morro Blanco y Combapata

Descripción	Morro Blanco (pulg.)	Combapata (pulg.)
Lectura de arena	13.45	13.6
Descuento de 10" a la lectura de arena	3.45	3.6
Lectura de arcilla	6.4	5.25
Equivalente de arena	53.91%	68.57%

5.1.1.10. Angularidad del agregado fino

Tabla 22

Angularidad agregado fino Morro Blanco y Combapata

Descripción	Morro Blanco	Combapata
Volumen del cilindro (cm ³)	100.00	100.00
Gravedad específica bulk (G _{sb})	2.62	2.63
Masa de agregado (gr)	139.72	113.50
Angularidad, A⁰ (%)	46.68	56.81

5.1.1.11. Azul de metileno agregado fino

Tabla 23

Azul de metileno agregado fino Morro Blanco y Combapata

Descripción	Morro Blanco	Combapata
Masa de la muestra (gr)	30.00	30.00
Concentración de solución (gr/l)	5.0	5.0
Volumen de solución consumida (ml)	0.023	0.014
Azul de metileno, g (MB)/Kg	3.8	2.3

5.1.1.12. Durabilidad al sulfato de magnesio agregado fino

Tabla 24

Durabilidad al sulfato de magnesio agregado fino cantera Combapata

Retenido en tamiz	Peso seco (gr)	Peso luego del ensayo (gr)	Pérdida total (gr)	Pérdida (%)
Malla N°4	19.82	19.74	0.08	0.41
Malla N°8	21.10	21.01	0.09	0.42
Malla N°16	17.45	17.37	0.09	0.49
Malla N°30	15.92	15.86	0.06	0.40
Malla N°50	12.38	12.33	0.05	0.42
Malla N°100	8.76	8.72	0.04	0.42
Mayor a N°100	5.56	5.54	0.02	0.45
Total	100.99			3.01

5.1.1.13. Sales solubles totales agregado fino

Tabla 25

Sales solubles totales agregado fino cantera Combapata

Descripción	Símbolo	Valor
Masa muestra (gr)	A	100.05
Volumen líquidos sobrenadantes (ml)	B	375.42
Volumen alícuota (ml)	C	50.32
Masa residuo cristalizado (gr)	D	0.0174
Sales solubles totales (%)		0.013

5.1.1.14. Absorción de agregado fino

Tabla 26

Gravedad específica y absorción agregado fino Morro blanco

Muestra	Símbolo	N°1	N°2	Promedio
Peso al aire del material secado al horno	Va	498.24	498.12	498.24
Volumen del frasco	Vfrasco	500.00	500.00	500.00
Peso o volumen de agua añadida	Ws	308.12	308.02	304.08
Gravedad específica bulk s.s.s.	Gsss	2.61	2.60	2.61
Gravedad específica bulk seca	Gm	2.60	2.59	2.60
Gravedad específica aparente	Gs	2.62	2.62	2.62
% de absorción	Ab	0.35	0.38	0.37

Nota: Unidades en gr y cm.

Tabla 27

Gravedad específica y absorción agregada fino Combapata

Muestra	Símbolo	N°1	N°2	Promedio
Peso al aire del material secado al horno	Va	497.58	497.98	498.24
Volumen del frasco	Vfrasco	500.00	500.00	500.00
Peso o volumen de agua añadida	Ws	308.35	308.56	304.08
Gravedad específica bulk s.s.s.	Gsss	2.61	2.61	2.61
Gravedad específica bulk seca	Gm	2.60	2.60	2.60
Gravedad específica aparente	Gs	2.63	2.63	2.63
% de absorción	Ab	0.49	0.41	0.45

Nota: Unidades en gr y cm.

5.1.2. Resultado de la selección de la granulometría

5.1.2.1. Análisis granulométrico agregado grueso

Tabla 28

Material que pasa la malla N°200 agregado grueso cantera Morro Blanco

Descripción	Peso
Peso muestra seca (gr)	2,741.66
Peso muestra lavada seca (gr)	2,722.58
Peso muestra pasante malla N°200 (gr)	190.08
% Pasante malla N°200	0.696

Tabla 29*Granulometría agregado grueso Morro Blanco*

Malla	Abertura en mm	Peso retenido (gr)	% Retenido	Peso que pasa (gr)	% Que pasa
3/4"	19	-	0.00	2,724.29	100.00
1/2"	12.5	774.63	28.43	1,949.66	71.57
3/8"	9.5	735.49	27.00	1,214.17	44.57
N°4	4.75	1,087.69	39.93	126.48	4.64
N°10	2	114.93	4.22	11.55	0.42
N°40	0.425	4.61	0.17	6.94	0.25
N°80	0.18	1.78	0.07	5.16	0.19
N°200	0.075	3.56	0.13	1.60	0.06
Base		1.60	0.06	-	0.00
Peso Total (gr)		2,724.29			
Variación (%)		99.37			

5.1.2.2. Análisis granulométrico agregado fino**Tabla 30***Material que pasa la malla N°200 agregado fino cantera Morro Blanco*

Descripción	Peso
Peso muestra seca (gr)	970.41
Peso muestra lavada seca (gr)	874.21
Peso muestra pasante malla N°200 (gr)	96.20
% Pasante malla N°200	9.913

Tabla 31*Material que pasa la malla N°200 agregado fino cantera Combapata*

Descripción	Peso
Peso muestra seca (gr)	1,227.30
Peso muestra lavada seca (gr)	1,132.62
Peso muestra pasante malla N°200 (gr)	94.68
% Pasante malla N°200	7.714

Tabla 32*Granulometría agregado fino Morro Blanco*

Malla	Abertura en mm	Peso retenido (gr)	% Retenido	Peso que pasa (gr)	% Que pasa
N°4	4.75	-	0.00	971.41	100.00
N°10	2	353.41	36.38	618.00	63.62
N°40	0.425	311.38	32.05	306.62	31.56
N°80	0.18	122.16	12.58	184.46	18.99
N°200	0.075	84.72	8.72	99.74	10.27
Base		99.74	10.27	-	0.00
Peso Total (gr)		971.41			
Variación (%)		100.10			

Tabla 33*Granulometría agregado fino Combapata*

Malla	Abertura en mm	Peso retenido (gr)	% Retenido	Peso que pasa (gr)	% Que pasa
N°4	4.75		0.00	1,229.60	100.00
N°10	2	197.57	16.07	1,032.03	83.93
N°40	0.425	606.25	49.30	425.78	34.63
N°80	0.18	242.59	19.73	183.19	14.90
N°200	0.075	86.20	7.01	96.99	7.89
Base		96.99	7.89	-	0.00
Peso Total (gr)		1,229.60			
Variación (%)		100.19			

5.1.2.3. Determinación de la dosificación

Para obtener la dosificación de agregados que cumpla con la gradación MAC-2 establecida previamente, se realizará un tanteo de porcentajes de participación de cada tipo de agregado, en un peso determinado, hasta lograr que la curva granulométrica generada este dentro de los límites establecidos por la gradación MAC-2.

Luego del tanteo, se obtuvieron los siguientes porcentajes de participación de cada tipo de agregado para el diseño de la mezcla asfáltica, esta dosificación será complementada con el ligante asfáltico, para la determinación del porcentaje óptimo de asfalto, se tiene:

Agregado:

- Agregado grueso Morro Blanco: 40%
- Agregado fino Morro Blanco: 40%
- Agregado fino Combapata: 20%

Peso Muestra por Probeta

- Agregado grueso Morro Blanco: 480.00 gr
- Agregado fino Morro Blanco: 480.00 gr
- Agregado fino Combapata: 240.00 gr

Tabla 34

Dosificación granulométrica según MAC - 2

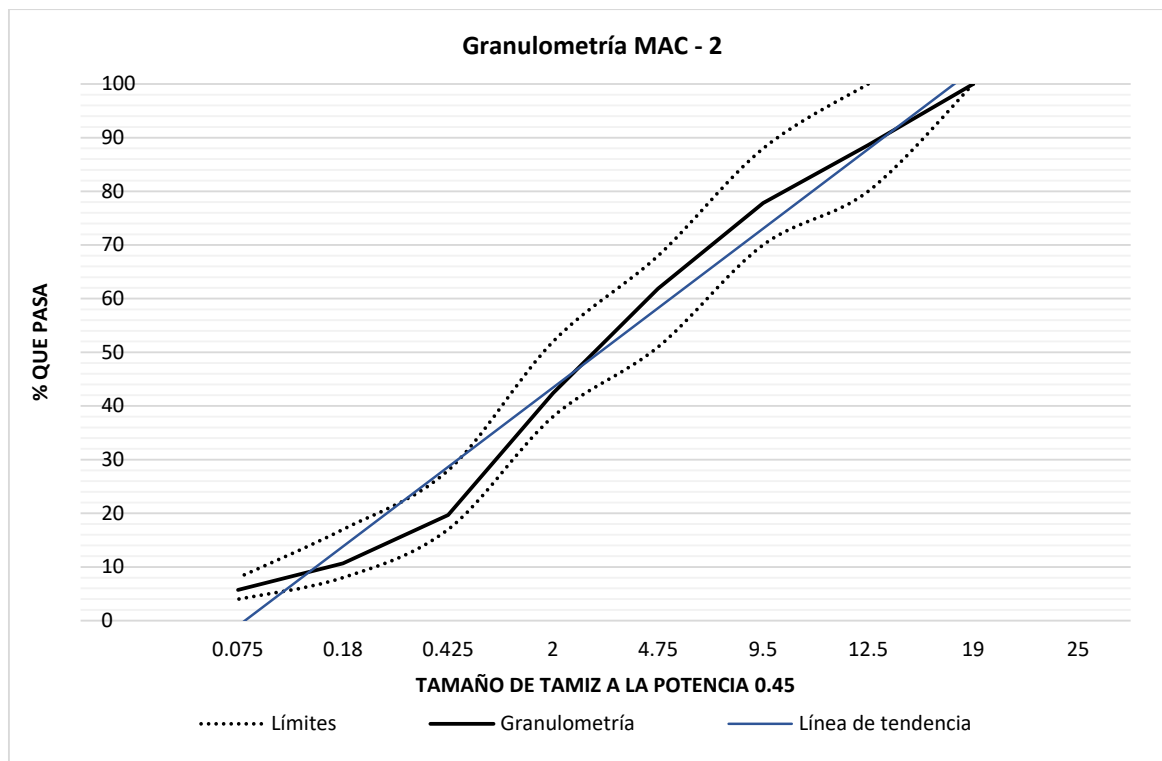
Malla	Abertura (mm)	Límite máximo	Límite mínimo	Peso que pasa (gr)	% que pasa
1"	25			1,200.00	
3/4"	19	100		1,200.00	100.00
1/2"	12.5	80	100	1,063.52	88.63
3/8"	9.5	70	88	933.93	77.83
Nº4	4.75	51	68	742.28	61.86
Nº10	2	38	52	508.84	42.40
Nº40	0.425	17	28	235.84	19.65
Nº80	0.18	8	17	127.81	10.65
Nº200	0.075	4	8	68.50	5.71
Base				-	

Como se aprecia en la Tabla 34 los porcentajes que pasan, del agregado combinado, se encuentran dentro de los límites establecidos en la gradación MAC – 2. Esto será

apreciado de mejor forma en la Figura 35, donde se visualiza la curva granulométrica generada con la dosificación obtenida.

Figura. 35

Curva granulométrica dosificada en función a la MAC - 2



5.1.3. Resumen de datos para determinación de parámetros volumétricos

Tabla 35

Resumen de datos de especímenes ensayados para determinación de parámetros volumétricos

PORCENTAJES	4.00%			4.50%			5.00%			5.50%			6.00%			6.50%		
h1(cm)	6.60	6.30	6.30	6.20	6.30	6.20	6.20	6.10	6.40	6.20	6.20	6.30	6.20	6.20	6.30	6.50	6.50	6.40
h2(cm)	6.50	6.60	6.40	6.10	6.30	6.40	6.20	6.20	6.30	6.30	6.30	6.40	6.20	6.30	6.20	6.30	6.50	6.40
h3(cm)	6.50	6.80	6.50	6.30	6.40	6.40	6.20	6.20	6.20	6.40	6.40	6.20	6.40	6.30	6.30	6.30	6.50	6.30
hpromedio(cm)	6.53	6.57	6.40	6.20	6.33	6.33	6.20	6.17	6.30	6.30	6.30	6.30	6.27	6.27	6.27	6.37	6.50	6.37
D. Briqueta(cm)	10.20	10.20	10.20	10.20	10.20	10.20	10.20	10.20	10.20	10.20	10.20	10.20	10.20	10.20	10.20	10.20	10.20	10.20
Vol. Briqueta(cm3)	533.86	536.58	522.96	506.62	517.51	517.51	506.62	503.90	514.79	514.79	514.79	514.79	512.07	512.07	512.07	520.24	531.13	520.24
Peso al aire	1198.9	1199.7	1201.68	1197.64	1200.73	1200.48	1197.77	1199.21	1197.63	1218.78	1219.93	1219.46	1219.24	1219.31	1219.94	1197	1198.12	1198.7
Peso sumergido	686	679	691	687	691	683	687	689	682	700	702	700	702	701	701	695	684	691
Peso SSS	1201.63	1203.83	1204.16	1198.65	1204.33	1203.13	1198.73	1199.9	1199.72	1219.85	1221.44	1220.7	1220.3	1220.89	1221.18	1198.17	1200.02	1198.92
Densidad	2.33	2.29	2.34	2.34	2.34	2.31	2.34	2.35	2.31	2.34	2.35	2.34	2.35	2.35	2.35	2.38	2.32	2.36
Densidad Promedio	2.318			2.329			2.334			2.345			2.348			2.354		

5.1.4. Ensayo de gravedad específica teórica máxima

Tabla 36

Gravedad específica teórica máxima (Gmm)

Descripción	4%	4.5%	5%	5.5%	6%	6.5%
Peso del recipiente (gr) – A	3,220.00	3,200.00	3,220.00	3,220.00	3,220.00	3,220.00
Peso recipiente + agua (gr) – B	9,724.00	9,728.50	9,728.00	9,728.00	9,728.00	9,728.00
Peso recipiente + muestra (gr) – C	4,420.00	4,420.00	4,420.00	4,420.00	4,420.00	4,420.00
Peso de la muestra (gr) – D=C-A	1,200.00	1,200.00	1,200.00	1,200.00	1,200.00	1,200.00
Peso recipiente + agua + muestra después del vaciado parcial (gr) – E	10,438.00	10,440.00	10,438.50	10,437.80	10,437.20	10,434.50
Gmm – D/(B+D-E)	2.469	2.456	2.451	2.448	2.445	2.432

5.1.5. Gravedad específica de la mezcla

Tabla 37

Gravedad específica de las muestras

Nº Probeta	Peso neto seco de la probeta W1 (gr)	Peso neto saturado de la probeta W2 (gr)	Peso neto sumergido de la probeta W3 (gr)	Gmb= W1/(W2- W3)
Asfalto= 4%				
1	1,198.90	1,201.63	686.00	2.325
2	1,199.70	1,203.83	679.00	2.286
3	1,201.68	1,204.16	691.00	2.342
Promedio	1,200.09	1,203.21	685.33	2.318
Asfalto= 4.5%				
1	1,197.64	1,198.65	687.00	2.341
2	1,200.73	1,204.33	691.00	2.339
3	1,200.48	1,203.13	683.00	2.308
Promedio	1,199.62	1,202.04	687.00	2.329
Asfalto= 5.00 %				
1	1,197.77	1,198.73	687.00	2.341
2	1,199.21	1,199.9	689.00	2.347
3	1,197.63	1,199.72	682.00	2.313
Promedio	1,198.20	1,199.45	686.00	2.334
Asfalto= 5.50 %				
1	1,218.78	1,219.85	700.00	2.344
2	1,219.93	1,221.44	702.00	2.349
3	1,219.46	1,220.7	700.00	2.342
Promedio	1,219.39	1,220.66	700.67	2.345
Asfalto= 6.00 %				
1	1,219.24	1,220.30	702.80	2.356
2	1,219.31	1,220.89	702.50	2.352
3	1,219.94	1,221.18	702.30	2.351
Promedio	1,219.50	1,220.79	702.53	2.353
Asfalto= 6.50 %				
1	1,197.00	1,198.17	695.00	2.379
2	1,198.12	1,200.02	684.00	2.322
3	1,198.70	1,198.92	694.2.00	2.375
Promedio	1,197.94	1,199.04	691.07	2.359

5.1.6. Ensayo Marshall estabilidad y flujo

Tabla 38

Estabilidad y flujo Marshall para las muestras asfálticas

Nº Probeta	Lectura del Micrómetro en KN	Carga en KG-f	Vol. Briqueta	Factor de Corrección	Carga en N Corregida	Flujo (0.01")
Asfalto = 4%						
1	8.52	868.53	533.86	0.96	833.79	11.00
2	8.76	892.99	536.58	0.93	830.48	13.00
3	8.02	817.56	522.96	1.00	817.56	11.00
Promedio	8.43	859.69	531.13	0.96	827.28	11.67
Asfalto = 4.50%						
1	9.64	982.70	506.62	1.04	1,022.01	12.00
2	9.21	938.87	517.51	1.00	938.87	12.00
3	8.98	915.42	517.51	1.00	915.42	13.00
Promedio	9.28	945.66	513.88	1.01	958.77	12.33
Asfalto = 5.00%						
1	10.15	1,034.69	506.62	1.04	1,076.08	12.00
2	9.92	1,011.24	503.90	1.04	1,051.69	14.00
3	10.35	1,055.08	514.79	1.00	1,055.08	13.00
Promedio	10.14	1,033.67	508.44	1.03	1,060.95	13.00
Asfalto = 5.50%						
1	11.63	1,185.56	514.79	1.00	1,185.56	14.00
2	11.35	1,157.02	514.79	1.00	1,157.02	14.00
3	11.80	1,202.89	514.79	1.00	1,202.89	14.00
Promedio	11.59	1,181.82	514.79	1.00	1,179.96	14.00
Asfalto = 6.00%						
1	12.05	1,228.38	512.07	1.00	1,228.38	14.00
2	12.10	1,233.47	512.07	1.00	1,233.47	16.00
3	11.90	1,213.09	512.07	1.00	1,213.09	16.00
Promedio	12.02	1,224.98	512.07	1.00	1,223.28	15.33
Asfalto = 6.50%						
1	11.68	1,190.66	520.24	1.00	1,190.66	18.00
2	11.90	1,213.09	531.13	0.96	1,164.56	18.00
3	11.67	1,189.64	520.24	1.00	1,189.64	19.00
Promedio	11.75	1,197.80	523.87	0.99	1,177.10	18.33

5.1.7. Resultados diseño de mezcla asfáltica convencional

Teniendo los valores de la densidad y densidad teórica máxima de la mezcla se procede a calcular los demás parámetros involucrados en el diseño de una mezcla asfáltica mediante el método Marshall según las fórmulas establecidas y previamente mencionadas en la presente tesis.

Tabla 39

Resultados ensayo Marshall

Resultados especímenes											
Pb	Gsb	Gse	Gmm	Gmb	Va	VMA	VFA	Pba	Pbe	Flujo (0.001")	Estabilidad Kgf
4.00 %	2.60	2.613	2.469	2.318	6.14 %	14.45 %	57.51 %	0.19 %	3.82%	11.67	827.28
4.50 %	2.60	2.618	2.456	2.329	5.18 %	14.46 %	64.19 %	0.27 %	4.24%	12.33	958.77
5.00 %	2.60	2.632	2.451	2.334	4.80 %	14.75 %	67.43 %	0.49 %	4.54%	13.00	1060.95
5.50 %	2.60	2.648	2.448	2.345	4.21 %	14.79 %	71.54 %	0.74 %	4.80%	14.00	1179.96
6.00 %	2.60	2.665	2.445	2.353	3.76 %	14.95 %	74.83 %	1.00 %	5.06%	15.33	1223.28
6.50 %	2.60	2.670	2.432	2.359	3.00 %	15.18 %	80.23 %	1.07 %	5.50%	18.33	1177.10

De los siguientes valores obtenidos se analizan 6 parámetros para establecer el contenido de asfalto óptimo.

5.1.8. Porcentaje óptimo de asfalto

Figura. 36

Peso específico de la muestra vs porcentaje de cemento asfáltico

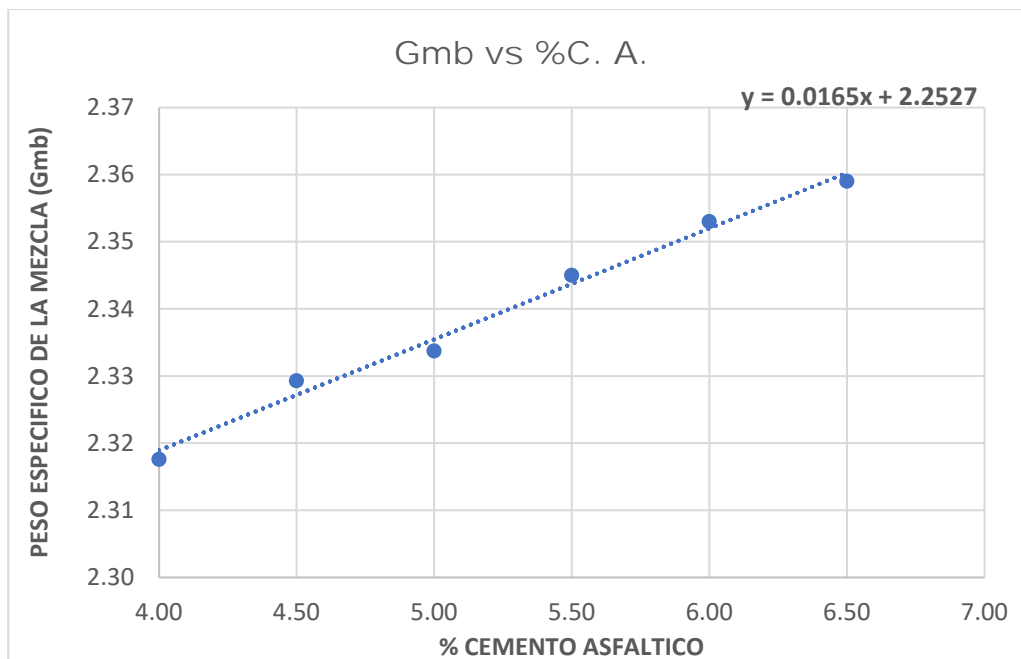


Figura. 37

Porcentaje de vacíos vs porcentaje de cemento asfáltico

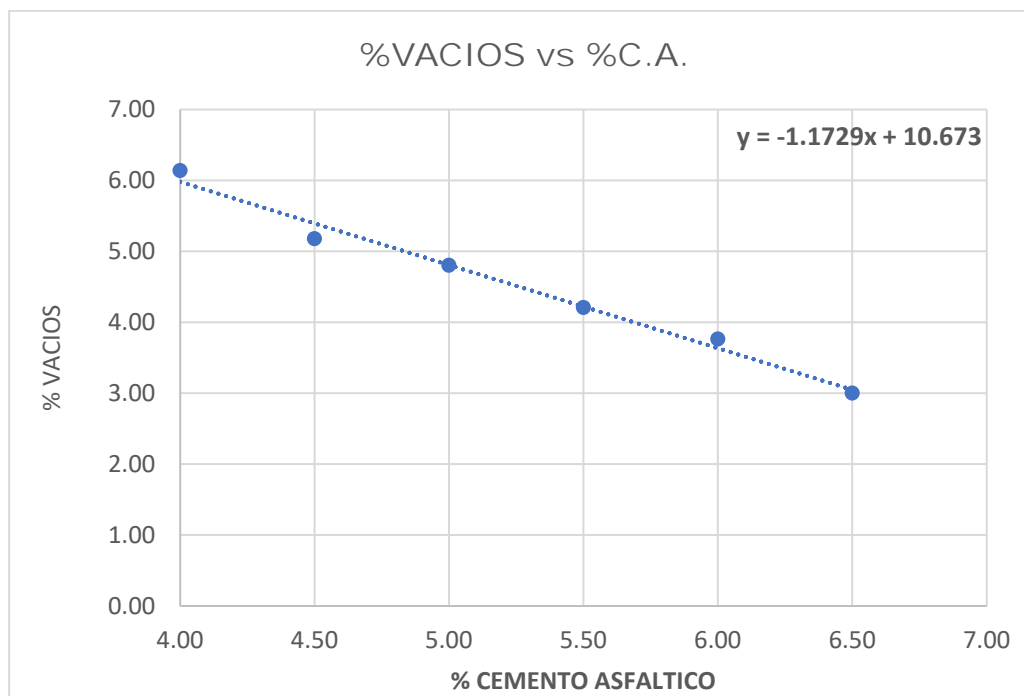


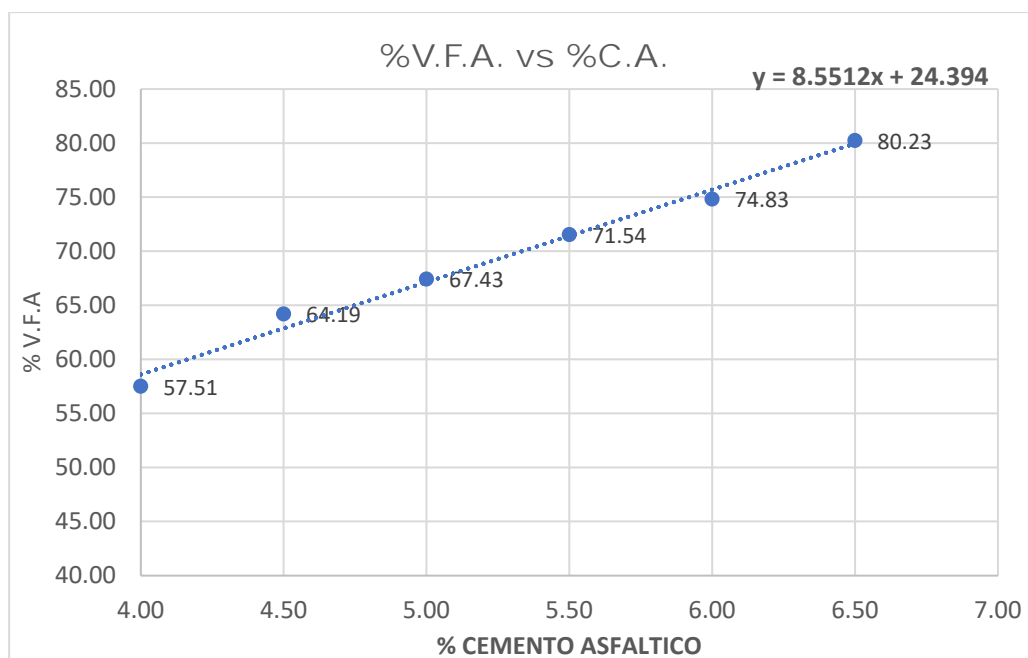
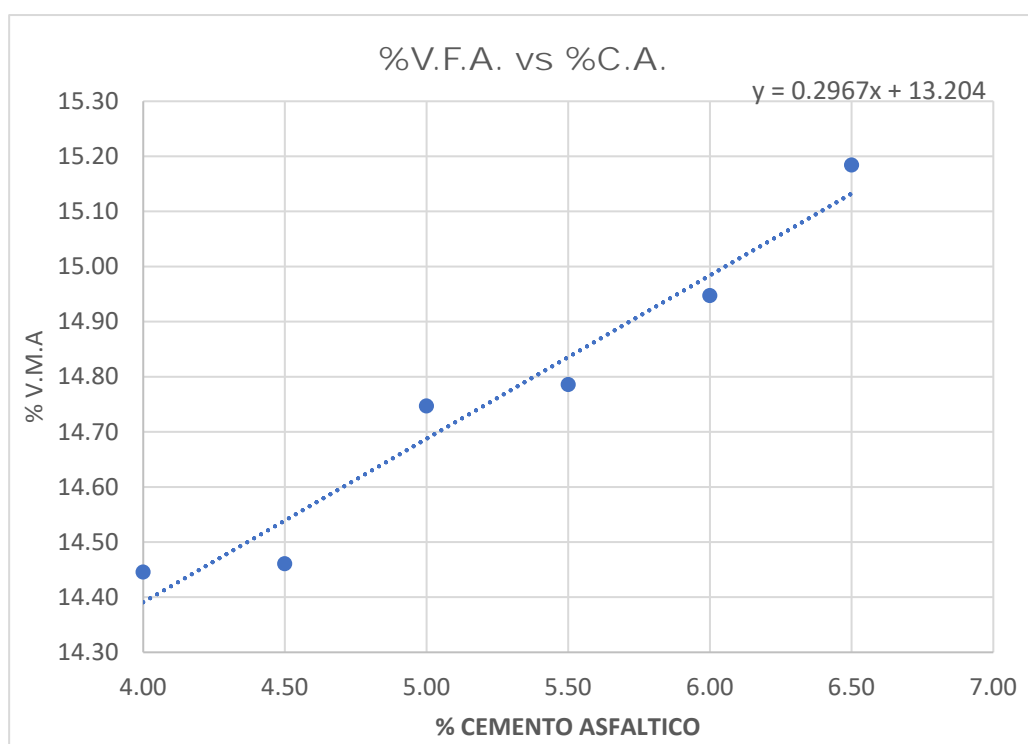
Figura. 38*Vacíos llenados con asfalto vs porcentaje de cemento asfáltico***Figura. 39***Vacíos en el agregado mineral vs porcentaje de cemento asfáltico*

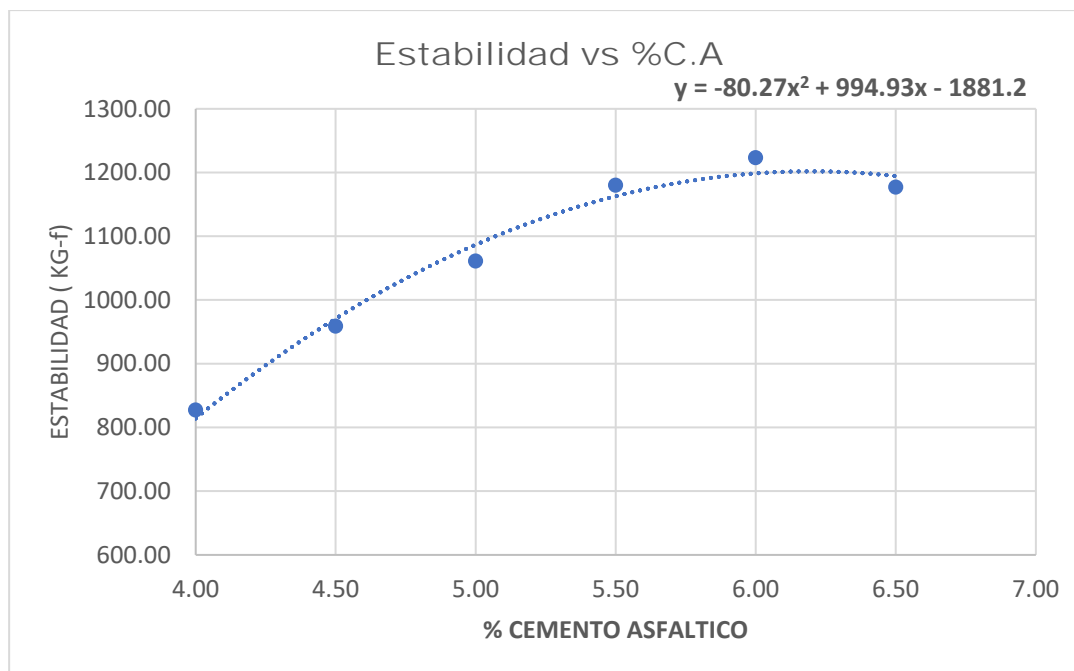
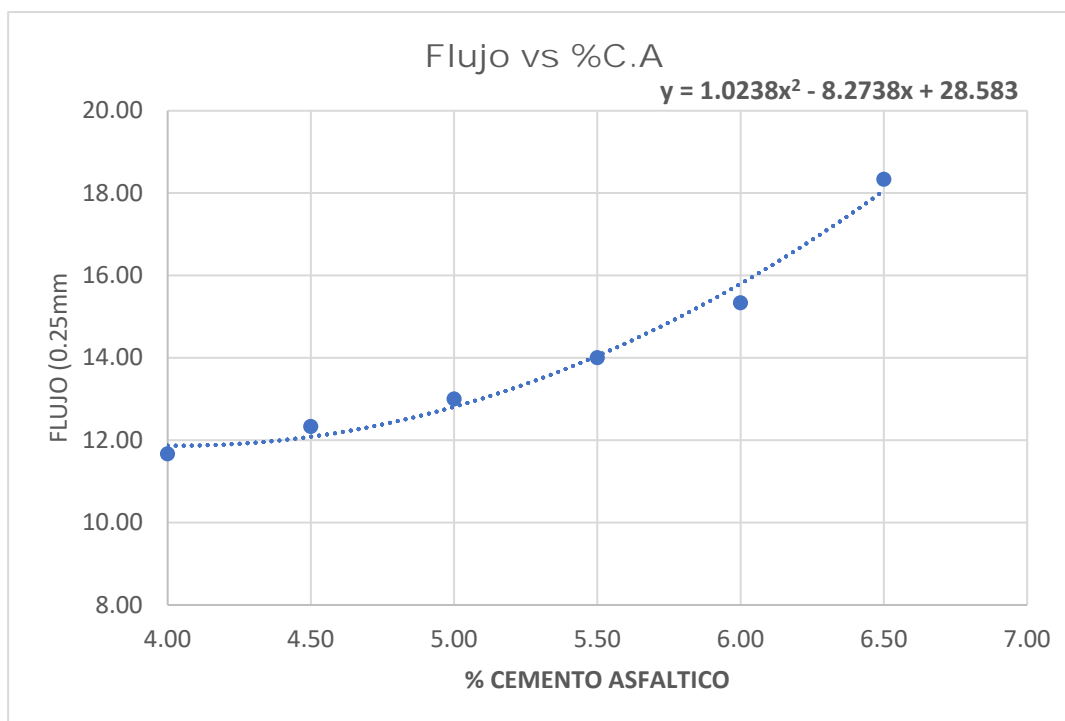
Figura. 40*Estabilidad vs porcentaje de cemento asfáltico***Figura. 41***Flujo vs porcentaje de cemento asfáltico*

Tabla 40*Resultados de parámetros obtenidos entre el 6% a 6.5%*

% C.A.	% Va (Ideal 3 a 5%)	% VMA (ideal de 15% mínimo)	% VFA (ideal entre 65% - 75%)	Flujo (1/100") (Ideal entre 8-14)	Estabilidad (Kg-f) (Requerimiento mínimo de 830.05 kg)
6	3.76	14.95	74.83	15.33	1,223.28
6.5	3	15.18	80.23	18.33	1,177.1

A partir de los valores obtenidos en los ensayos realizados, se puede determinar que el rango óptimo del contenido de asfalto se encuentra entre 6,00 % y 6,50 %, resultado del análisis conjunto de los parámetros volumétricos y mecánicos evaluados en el diseño Marshall. Este rango refleja un comportamiento adecuado de la mezcla frente a las exigencias de estabilidad, flujo y vacíos, permitiendo identificar un intervalo técnicamente aceptable para la selección del contenido de asfalto.

Al analizar el comportamiento de la mezcla con un contenido de 6,00 %, se observa que se cumplen los parámetros establecidos en el diseño Marshall, con excepción del volumen de vacíos en el agregado mineral (VMA), el cual alcanza un valor de 14,95 %, ligeramente inferior al mínimo requerido de 15 %. No obstante, la diferencia entre el valor obtenido y el mínimo exigido es mínima (0,05 %), por lo que puede considerarse insignificante desde el punto de vista práctico.

Además, de acuerdo con la Norma Técnica Peruana C.E. 010 – Pavimentos Urbanos, se establece una tolerancia de $\pm 0,3$ % en el contenido de asfalto para mezclas asfálticas, dentro de la cual se encuentra el valor de 6,00 %, lo que respalda su aceptación como contenido óptimo. Sin embargo, la norma también señala que, para pavimentos ubicados a altitudes superiores a los 3000 msnm, donde prevalecen condiciones climáticas adversas, se recomienda el uso de mezclas

asfálticas ricas en cemento asfáltico, lo que generalmente implica un contenido de asfalto mayor al 6,00 %, recomendación que debe evaluarse en función de las condiciones específicas del proyecto y de las características de los agregados utilizados.

En función de ello, se procede a reevaluar los parámetros del diseño considerando un VMA mínimo del 15 %, a partir del cual se obtiene un contenido de asfalto de 6,05 %, con el que se verifican los demás parámetros del diseño Marshall conforme al Manual de Carreteras – EG-2013. Para el presente proyecto, se considera una carga de tráfico superior a 3 millones de ejes equivalentes (ESAL) y una altitud mayor a 3000 msnm, como en la ciudad del Cusco, condiciones que determinan el uso de una mezcla asfáltica Clase A, la cual requiere 75 golpes por cara durante la compactación Marshall para garantizar un adecuado desempeño estructural y durabilidad.

Tabla 41

Parámetros de diseño Marshall

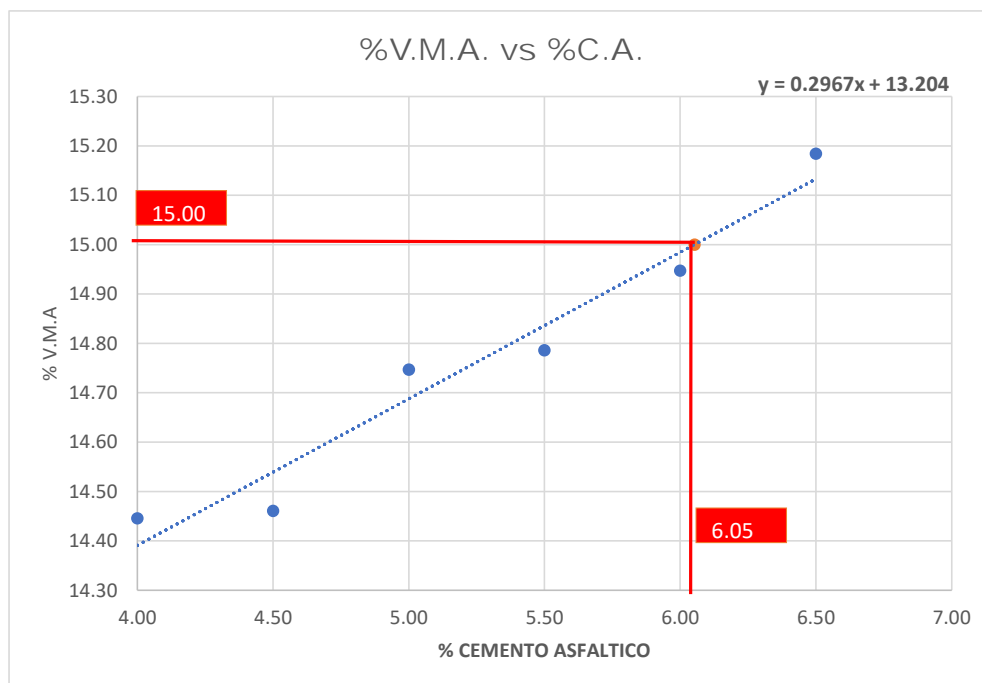
Parámetro	Valor de referencia
Golpes de compactación	75
Estabilidad (KN)	Mínima 8,15
Flujo, 0.01 pulgadas	8 – 14
Vacíos en la mezcla total	3 – 5
Vacíos en el agregado mineral	15%
Vacíos llenos con asfalto (VFA)	67% - 75%

Nota: Adaptado del DG-2013, MTC, 2013

Considerando los parámetros indicados en la Tabla 41 se retoma el análisis de las gráficas correspondientes a los parámetros medidos. Como punto de partida se adopta un valor de VMA igual al 15%, tal como se muestra en las gráficas siguientes. A partir de la ecuación de la línea de tendencia de cada gráfico, se procede a determinar los valores correspondientes de 'x' e 'y' para cada caso, facilitando así la interpretación y comparación de resultados.

Figura. 42

Vacíos en el agregado mineral vs porcentaje óptimo de asfalto

**Figura. 43**

Vacíos llenados con asfalto vs porcentaje óptimo de asfalto

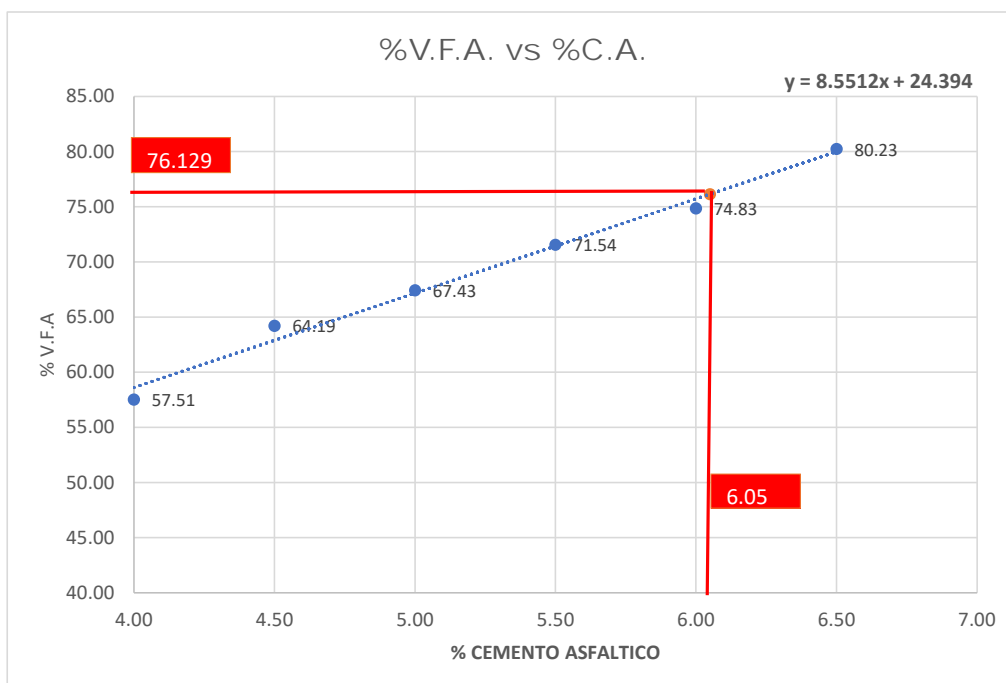


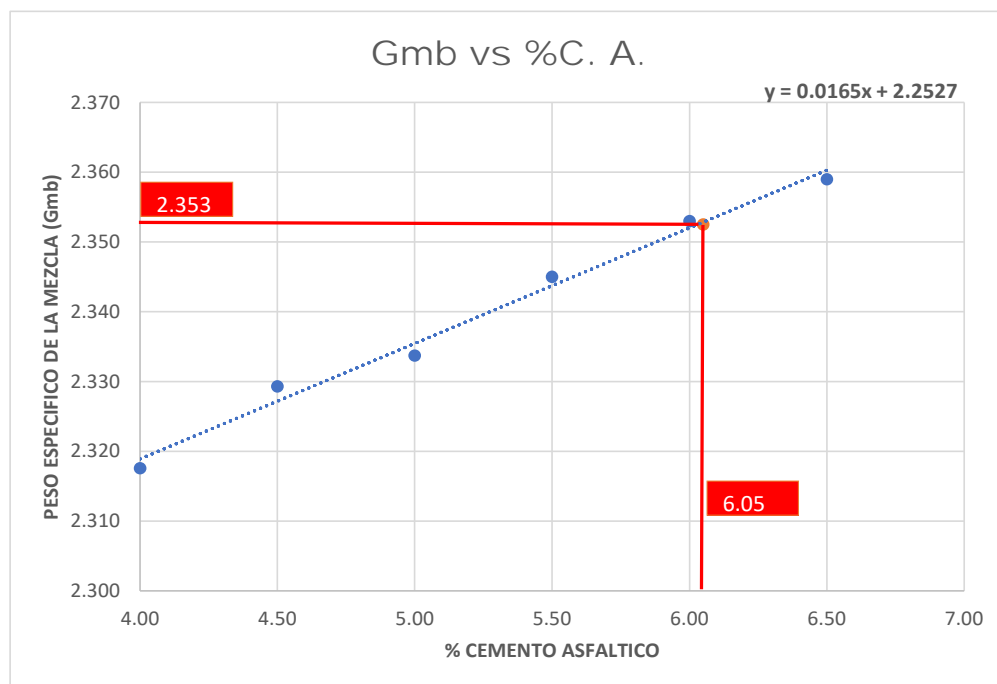
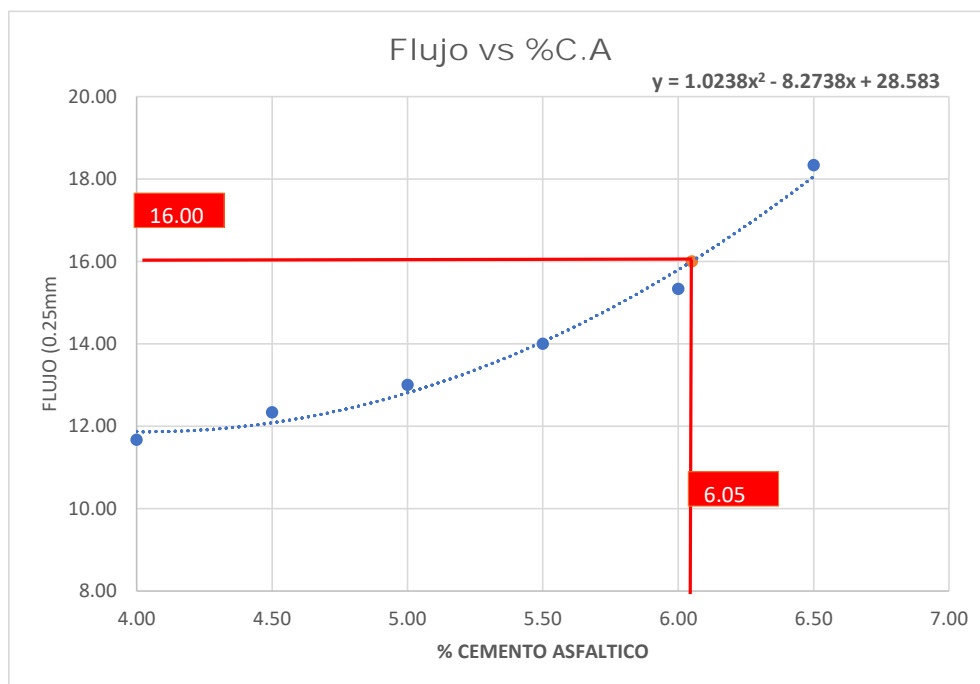
Figura. 44*Peso específico de la muestra vs porcentaje de óptimo asfalto***Figura. 45***Flujo vs porcentaje óptimo de asfalto*

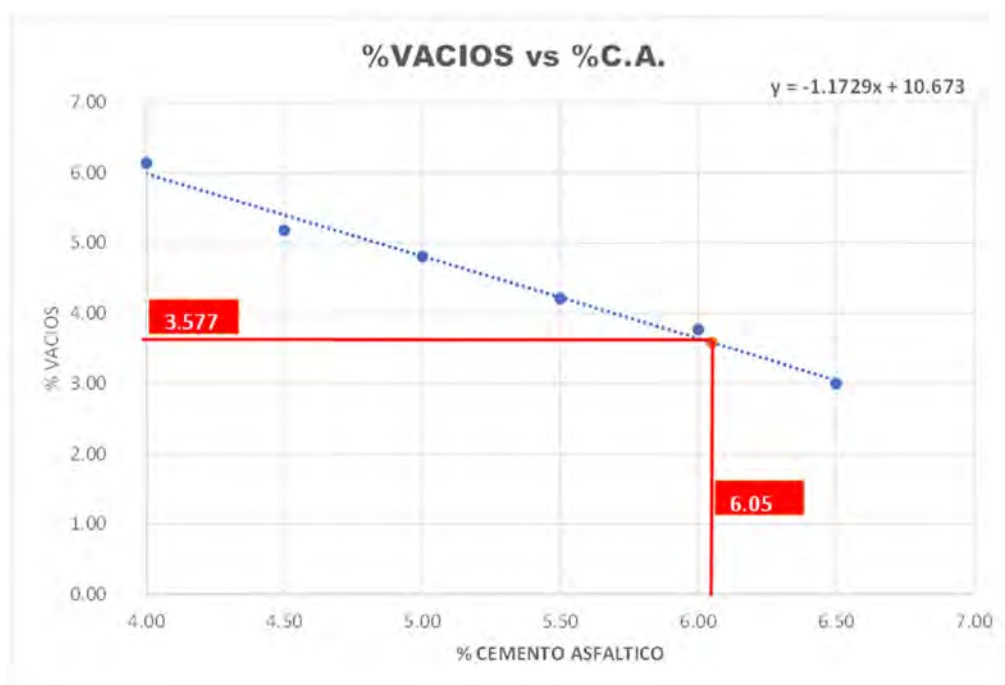
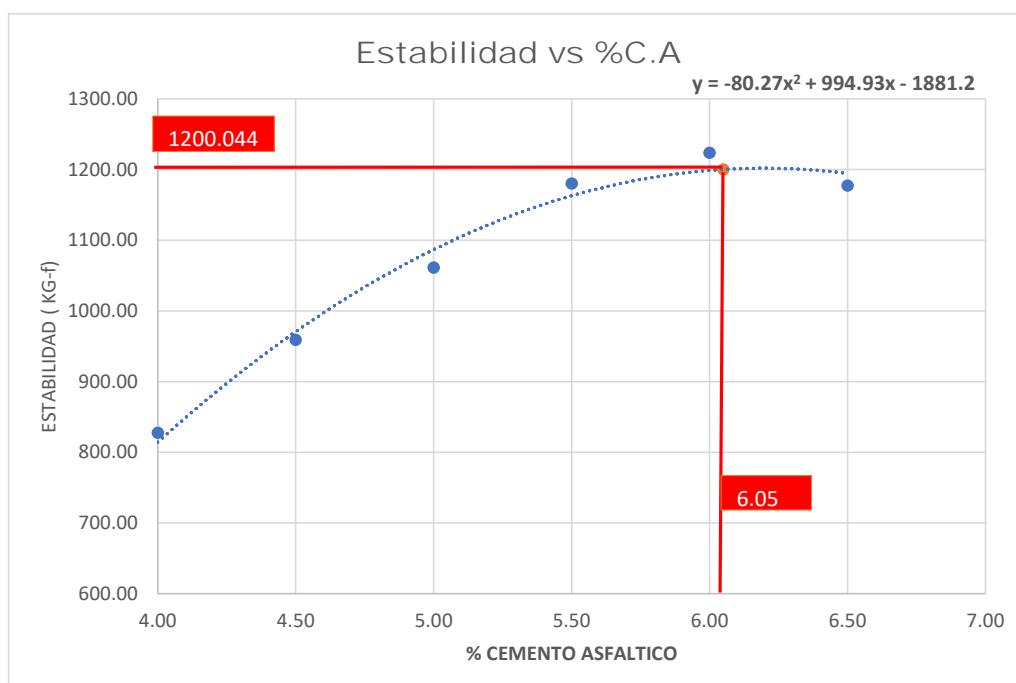
Figura. 46*Vacíos en la mezcla total vs porcentaje óptimo de asfalto***Figura. 47***Estabilidad vs porcentaje de óptimo asfalto*

Tabla 42*Validación de resultados diseño de mezcla asfáltica convencional*

Parámetros evaluados	Resultados	Rango admisible	Validación
% de asfalto óptimo	6.05	---	Cumple
% de vacíos de aire	3.58	3 – 5	
Densidad de la mezcla asfáltica (gr/cm ³)	2.35	---	Cumple
% vacíos en el agregado mineral (VMA)	15.00	> 15	
% vacíos llenos con asfalto (VFA)	76.13	65 – 75	Variación admisible
Flujo (0.01")	16	8 – 14	Cumple
Estabilidad (kg-f)	1200.04	> 830.81	Cumple

5.2. Resultados del diseño de mezcla asfáltica con dióxido de titanio (TiO₂)**5.2.1. Dosificación de pobretas por porcentaje de TiO₂ añadido****Tabla 43***Dosificación de la mezcla con 0% de dióxido de titanio (TiO₂)*

Componente	% Agregados	% Peso	Peso (gr)
PEN 120/150		6.05	72.60
Agregado grueso - Morro Blanco	40.00	37.58	450.96
Agregado fino - Morro Blanco	40.00	37.58	450.96
Agregado fino - Combapata	20.00	18.79	225.48
Dióxido de titanio	0.00	0.00	0.00
Total		100	1,200.00

Tabla 44*Dosificación de la mezcla con 2% de dióxido de titanio (TiO₂)*

Componente	% Agregados	% Peso	Peso (gr)
PEN 120/150		6.05	72.60
Agregado grueso - Morro Blanco	40.00	37.58	450.96
Agregado fino - Morro Blanco	40.00	37.58	450.96
Agregado fino - Combapata	17.87	16.79	201.49
TiO ₂	2.13	2.00	23.99
Total		100	1,200.00

Tabla 45*Dosificación de la mezcla con 4% de dióxido de titanio (TiO₂)*

Componente	% Agregados	% Peso	Peso (gr)
PEN 120/150		6.05	72.60
Agregado grueso - Morro Blanco	40.00	37.58	450.96
Agregado fino - Morro Blanco	40.00	37.58	450.96
Agregado fino - Combapata	17.87	14.79	201.49
TIO2	2.13	4.00	23.99
Total		100	1,200.00

Tabla 46*Dosificación de la mezcla con 6% de dióxido de titanio (TiO₂)*

Componente	% Agregados	% Peso	Peso (gr)
PEN 120/150		6.05	72.60
Agregado grueso - Morro Blanco	40.00	37.58	450.96
Agregado fino - Morro Blanco	40.00	37.58	450.96
Agregado fino - Combapata	17.87	12.79	201.49
TIO2	2.13	6.00	23.99
TOTAL		100	1,200.00

Tabla 47*Dosificación de la mezcla con 8% de dióxido de titanio (TiO₂)*

Componente	% Agregados	% Peso	Peso (gr)
PEN 120/150		6.05	72.60
Agregado grueso - Morro Blanco	40.00	37.58	450.96
Agregado fino - Morro Blanco	40.00	37.58	450.96
Agregado fino - Combapata	17.87	10.79	201.49
TIO2	2.13	8.00	23.99
Total		100	1,200.00

5.2.2. Características de los especímenes ensayados para los diferentes porcentajes de dióxido de titanio (TiO₂)

Tabla 48

Datos de las probetas con adición de dióxido de titanio (TiO₂)

DATOS ESPECIMENES																
PORCENTAJES		0.00%			2.00%			4.00%			6.00%			8.00%		
h1(cm)	6.30	6.20	6.20	6.30	6.20	6.40	6.20	6.30	6.30	6.30	6.40	6.20	6.20	6.40	6.30	
h2(cm)	6.20	6.30	6.20	6.40	6.40	6.40	6.40	6.40	6.30	6.20	6.20	6.20	6.20	6.30	6.40	
h3(cm)	6.40	6.30	6.30	6.40	6.40	6.40	6.20	6.30	6.30	6.20	6.20	6.20	6.20	6.30	6.30	
hpromedio(cm)	6.30	6.27	6.23	6.37	6.33	6.40	6.27	6.33	6.30	6.23	6.27	6.20	6.20	6.33	6.33	
D. Briqueta(cm)	10.20	10.20	10.20	10.20	10.20	10.20	10.20	10.20	10.20	10.20	10.20	10.20	10.20	10.20	10.20	
Vol. Briqueta(cm3)	514.79	512.07	509.34	520.24	517.51	522.96	512.07	517.51	514.79	509.34	512.07	506.62	506.62	517.51	517.51	
PESO AL AIRE	1219.24	1219.65	1218.83	1181.50	1181.85	1181.15	1177.92	1178.26	1177.58	1176.00	1176.32	1175.68	1175.65	1175.32	1175.68	
PESO SUMERGIDO	702.00	702.20	701.70	685.20	684.30	685.20	688.00	687.90	688.20	690.50	691.30	690.60	693.80	692.80	693.90	
PESO SSS	1220.30	1220.60	1220.00	1183.40	1183.20	1183.20	1180.47	1180.55	1180.45	1179.00	1179.10	1178.90	1178.00	1178.10	1178.20	
DENSIDAD ESPECIMEN	2.35	2.35	2.35	2.37	2.37	2.37	2.39	2.39	2.39	2.41	2.41	2.41	2.43	2.42	2.43	
PROMEDIO DENSIDAD	2.35			2.37			2.39			2.41			2.43			

5.2.3. Gravedad específica teórica máxima para los diferentes porcentajes de adición de TiO₂

Tabla 49

Gravedad específica teórica máxima para cada porcentaje de adición de dióxido de titanio (TiO₂)

Descripción	0% TiO ₂	2% TiO ₂	4% TiO ₂	6% TiO ₂	8% TiO ₂
Peso del recipiente (gr) – A	3,220.00	3,224.00	3,220.00	3,220.00	3,220.00
Peso recipiente + agua (gr) – B	9,728.00	9,730.00	9,728.00	9,727.00	9,728.00
Peso recipiente + muestra (gr) – C	4,419.80	4,420.00	4,420.00	4,420.00	4,420.00
Peso de la muestra (gr) – D=C-A	1,199.80	1,198.20	1,200.00	1,200.00	1,200.00
Peso recipiente + agua + muestra después del vaciado parcial (gr) – E	10,435.80	10,439.10	10,438.50	10,440.10	10,443.20
Gmm – D/(B+D-E)	2.439	2.450	2.451	2.465	2.475

5.2.4. Gravedad específica de la mezcla con adición de dióxido de titanio (TiO₂)

Tabla 50

Gravedad específica de la mezcla para cada porcentaje de adición de dióxido de titanio (TiO₂)

Nº Probeta	Peso neto seco de la probeta W1 (gr)	Peso neto saturado de la probeta W2 (gr)	Peso neto sumergido de la probeta W3 (gr)	Gmb= W1/(W2-W3)
0% TiO ₂				
1	1,219.24	1,220.3	702	2.352
2	1,219.65	1,220.6	702.2	2.353
3	1,218.83	1,220.0	701.7	2.352
Promedio	1,219.24	1,220.30	701.97	2.350
2% TiO ₂				
1	1,181.50	1,183.4	685.2	2.372
2	1,181.85	1,183.2	684.3	2.369
3	1,181.15	1,183.2	685.2	2.372
Promedio	1,181.50	1,183.27	684.90	2.370
4% TiO ₂				
1	1,177.92	1,180.47	688	2.392
2	1,178.26	1,180.55	687.9	2.392
3	1,177.58	1,180.45	688.2	2.392
Promedio	1,177.92	1,180.49	688.03	2.390
6% TiO ₂				
1	1,176.00	1179	690.5	2.407
2	1,176.32	1179.1	691.3	2.411
3	1,175.68	1178.9	690.6	2.408
Promedio	1,176.00	1179.00	690.80	2.410
8% TiO ₂				
1	1,175.65	1,178.0	693.8	2.428
2	1,175.32	1,178.1	692.8	2.422
3	1,175.68	1,178.2	693.9	2.428
Promedio	1,175.55	1,178.10	693.50	2.430

5.3. Evaluación de las propiedades fotocatalíticas

5.3.1. Evaluación de la propiedad de autolimpieza

Datos del ensayo:

- Lectura inicial de absorbancia : 1.401
- Longitud de onda : 554 nm
- Concentración de rodamina : 10 mg/l

Tabla 51

Resultados de ensayo de autolimpieza

Adición de TiO ₂	Probeta	Lectura Absorbancia		% de degradación			
		4 Hrs	26 Hrs	R4	Promedio	R26	Promedio
8%	B1	0.701	0.031	49.96%		97.79%	
	B2	0.683	0.024	51.25%	50.13%	98.29%	97.76%
	B3	0.712	0.039	49.18%		97.22%	
6%	B1	0.814	0.083	41.90%		94.08%	
	B2	0.805	0.062	42.54%	41.99%	95.57%	94.86%
	B3	0.819	0.071	41.54%		94.93%	
4%	B1	0.922	0.154	34.19%		89.01%	
	B2	0.914	0.137	34.76%	35.02%	90.22%	89.53%
	B3	0.895	0.149	36.12%		89.36%	
2%	B1	1.111	0.384	20.70%		72.59%	
	B2	1.106	0.386	21.06%	20.32%	72.45%	72.45%
	B3	1.132	0.388	19.20%		72.31%	
0%	B1	1.263	0.837	9.85%		40.26%	
	B2	1.247	0.832	10.99%	10.90%	40.61%	40.47%
	B3	1.235	0.833	11.85%		40.54%	

$$R4 = \frac{a0 - a4}{a0} * 100 > 20\%$$

$$R26 = \frac{a0 - a26}{a0} * 100 > 50\%$$

Todos los porcentajes con adición de dióxido de (TiO₂) son considerados como materiales fotocatalíticos.

5.3.2. Evaluación de la propiedad de purificación de aire

Tabla 52

Ensayo de purificación de aire para 1 hora de exposición

% de TiO ₂	Muestra	Inicial	Final	Reducción	Degradación	Promedio
0%	B1	8.619	8.611	0.008	0.09%	0.09%
0%	B2	8.617	8.608	0.009	0.10%	
0%	B3	8.618	8.612	0.006	0.07%	
2%	B1	8.615	6.014	2.601	30.19%	30.20%
2%	B2	8.617	6.010	2.607	30.25%	
2%	B3	8.614	6.016	2.598	30.16%	
4%	B1	8.613	5.274	3.339	38.77%	38.77%
4%	B2	8.615	5.278	3.337	38.73%	
4%	B3	8.617	5.273	3.344	38.81%	
6%	B1	8.617	4.572	4.045	46.94%	46.93%
6%	B2	8.614	4.570	4.044	46.95%	
6%	B3	8.616	4.575	4.041	46.90%	
8%	B1	8.618	3.761	4.857	56.36%	56.36%
8%	B2	8.619	3.758	4.861	56.40%	
8%	B3	8.621	3.766	4.855	56.32%	

Tabla 53

Ensayo de purificación de aire para 2 hora de exposición

% de TiO ₂	Muestra	Inicial	Final	Reducción	Degradación	Promedio
0%	B1	8.619	8.607	0.0123	0.14%	0.14%
0%	B2	8.617	8.608	0.0143	0.17%	
0%	B3	8.618	8.609	0.0092	0.11%	
2%	B1	8.615	4.271	4.3437	50.42%	50.59%
2%	B2	8.617	4.242	4.3745	50.77%	
2%	B3	8.614	4.256	4.3581	50.59%	

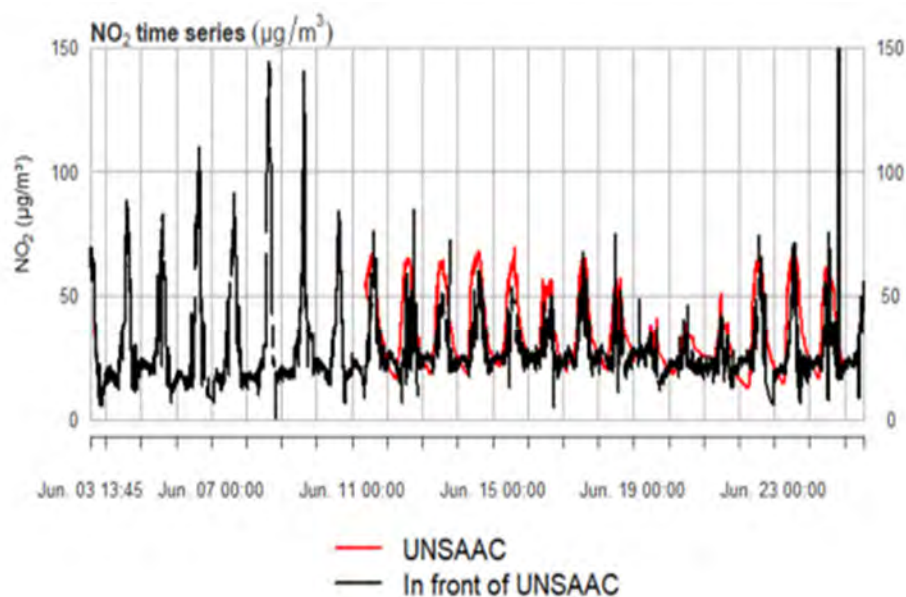
4%	B1	8.613	3.375	5.2378	60.81%	
4%	B2	8.615	3.380	5.2351	60.77%	60.82%
4%	B3	8.617	3.372	5.2453	60.87%	
6%	B1	8.617	2.273	6.3441	73.62%	
6%	B2	8.614	2.271	6.3430	73.64%	73.61%
6%	B3	8.616	2.277	6.3390	73.57%	
8%	B1	8.618	1.006	7.6124	88.33%	
8%	B2	8.619	1.000	7.6192	88.40%	88.34%
8%	B3	8.621	1.011	7.6101	88.27%	

$$\text{Degradación} = \left(\frac{\text{Lectura inicial} - \text{Lectura final}}{\text{Lectura inicial}} \right) * 100$$

5.3.2.1. Estimación de resultados de laboratorio en condiciones reales de campo

Figura. 48

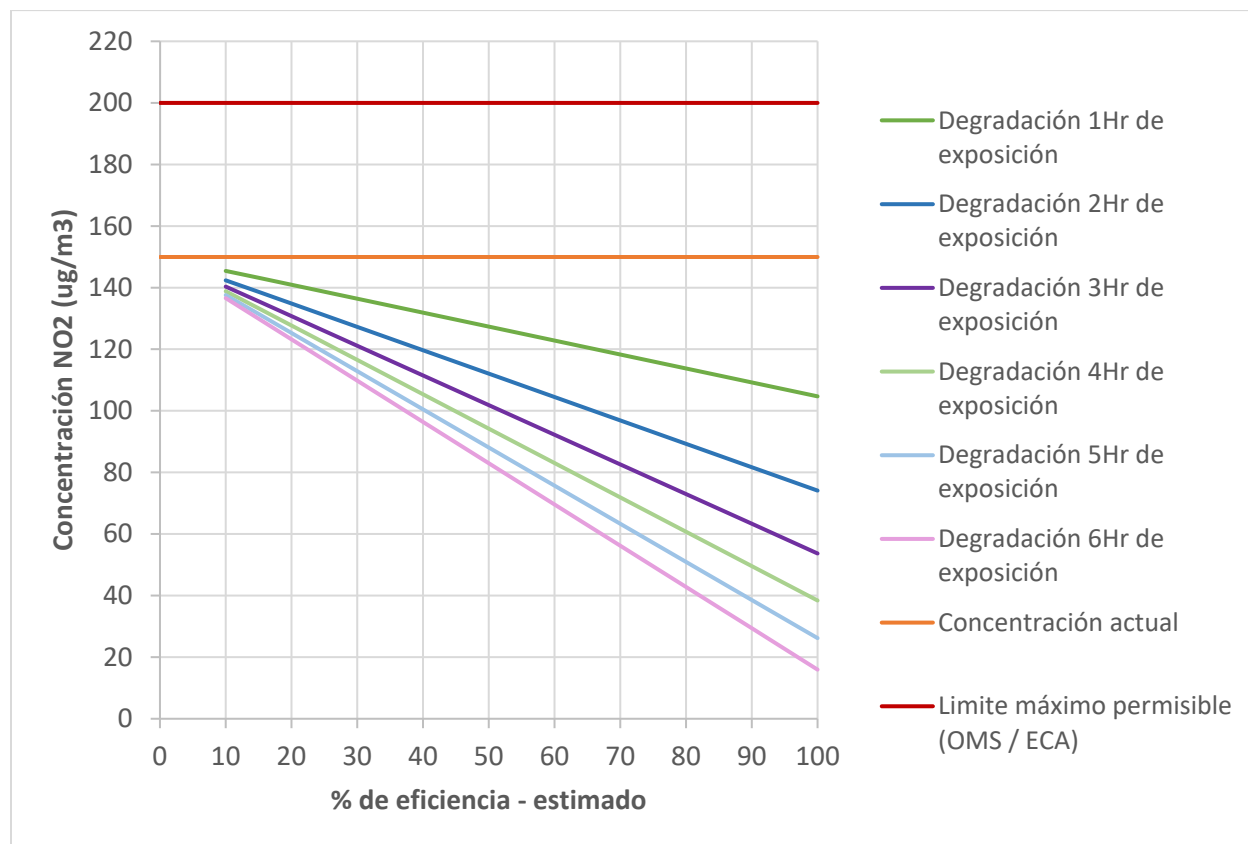
Concentración de NO₂ para la ciudad del Cusco - UNSAAC



Nota: Fuente: *Air Pollution in Two Districts of the City of Cusco: An Interdisciplinary*

Study Base don Environmental Monitoring and Social Risk Perception, Poblete et al., 2024,

Atmosphere

Figura. 49*Estimación degradación de NO₂ en condiciones de campo*

5.4. Evaluación de las propiedades mecánicas

5.4.1. Estabilidad y flujo Marshall de mezclas con adición de TiO₂

Tabla 54*Estabilidad y flujo Marshall para cada porcentaje de adición de dióxido de titanio (TiO₂)*

Nº Probeta	Lectura del Micrómetro en KN	Carga en KG-f	Vol. Briqueta	Factor de Corrección	Carga en N Corregida	Flujo
%0 TiO ₂						
1	12.05	1228.38	514.79	1.00	1228.38	14.00
2	12.15	1238.57	512.07	1.00	1238.57	15.00
3	11.95	1218.18	509.34	1.00	1218.18	13.00
Promedio	12.05	1228.38	512.07		1228.38	14.00

%2 TiO₂						
1	12.54	1278.33	520.24	1.00	1278.33	12.00
2	12.47	1271.19	517.51	1.00	1271.19	13.00
3	12.61	1285.46	522.96	1.00	1285.46	14.00
Promedio	12.54	1278.33	520.24		1278.33	13.00
%4 TiO₂						
1	12.68	1292.60	512.07	1.00	1292.60	12.00
2	12.60	1284.44	517.51	1.00	1284.44	13.00
3	12.76	1300.75	514.79	1.00	1300.75	11.00
Promedio	12.68	1292.60	514.79		1292.60	12.00
%6 TiO₂						
1	12.02	1225.32	509.34	1.00	1225.32	12.00
2	11.95	1218.18	512.07	1.00	1218.18	11.00
3	12.36	1259.98	506.62	1.04	1310.38	11.00
Promedio	12.11	1234.49	509.34		1264.28	11.33
%8 TiO₂						
1	11.05	1126.44	506.62	1.04	1171.49	10.00
2	11.52	1174.35	517.51	1.00	1174.35	11.00
3	11.64	1186.58	517.51	1.00	1186.58	11.00
Promedio	11.40	1162.46	513.88		1180.47	10.67

Teniendo los valores de la densidad y densidad teórica máxima de la mezcla con las diferentes proporciones de Dióxido de titanio (TiO₂), se procede a calcular los demás parámetros involucrados en el diseño de una mezcla asfáltica mediante el método Marshall según las fórmulas establecidas y previamente mencionadas en la presente tesis, cabe mencionar que a diferencia de la mezcla asfáltica convencional, en este diseño se mantiene constante el porcentaje de asfalto, sin embargo lo que varía es la gravedad específica combinada del agregado según se va aumentando la cantidad de Dióxido de Titanio (TiO₂).

5.4.2. Obtención del porcentaje óptimo de TiO_2

5.4.2.1. Parámetros volumétricos de la mezcla con adición de dióxido de titanio (TiO_2)

Tabla 55

Parámetros volumétricos para las mezclas con adición de TiO_2

Resultados especímenes												
TiO2	Pb	Gsb	Gse	Gmm	Gmb	Va	VMA	VFA	Pba	Pbe	Flujo (0.001")	Estabilidad Kg
0.00 %	6.05 %	2.601	2.660	2.439	2.350	3.63 %	15.70 %	76.85 %	0.91 %	5.20%	14.00	1228.38
2.00 %	6.05 %	2.619	2.674	2.450	2.370	3.26 %	14.98 %	78.25 %	0.83 %	5.27%	13.00	1278.33
4.00 %	6.05 %	2.638	2.685	2.459	2.390	2.81 %	14.87 %	81.13 %	0.72 %	5.37%	12.00	1292.60
6.00 %	6.05 %	2.656	2.693	2.465	2.410	2.23 %	14.76 %	84.89 %	0.54 %	5.54%	11.33	1264.28
8.00 %	6.05 %	2.676	2.706	2.475	2.430	1.82 %	14.67 %	87.61 %	0.44 %	5.63%	10.67	1180.47

De los siguientes valores obtenidos se analizaron 6 parámetros para establecer el contenido de dióxido de titanio en el cual se cumplan los parámetros ya establecidos por la normativa vigente.

5.4.2.2. Determinación del porcentaje óptimo de TiO_2

Figura. 50

Peso específico de la mezcla vs porcentaje de dióxido de titanio (TiO_2)

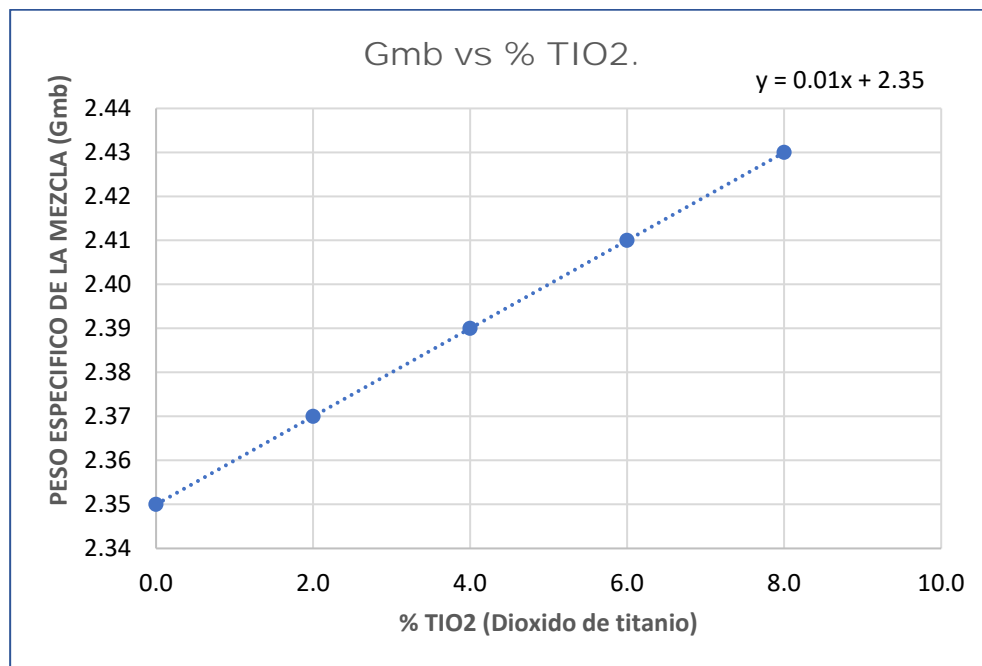


Figura. 51

Vacíos de aire en la mezcla (V_a) vs porcentaje de dióxido de titanio (TiO_2)

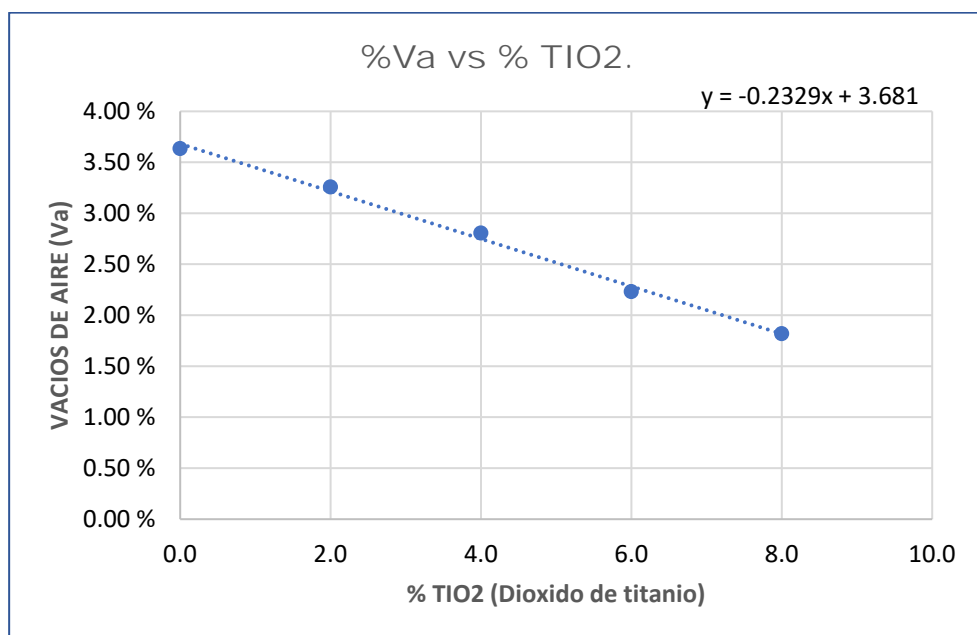
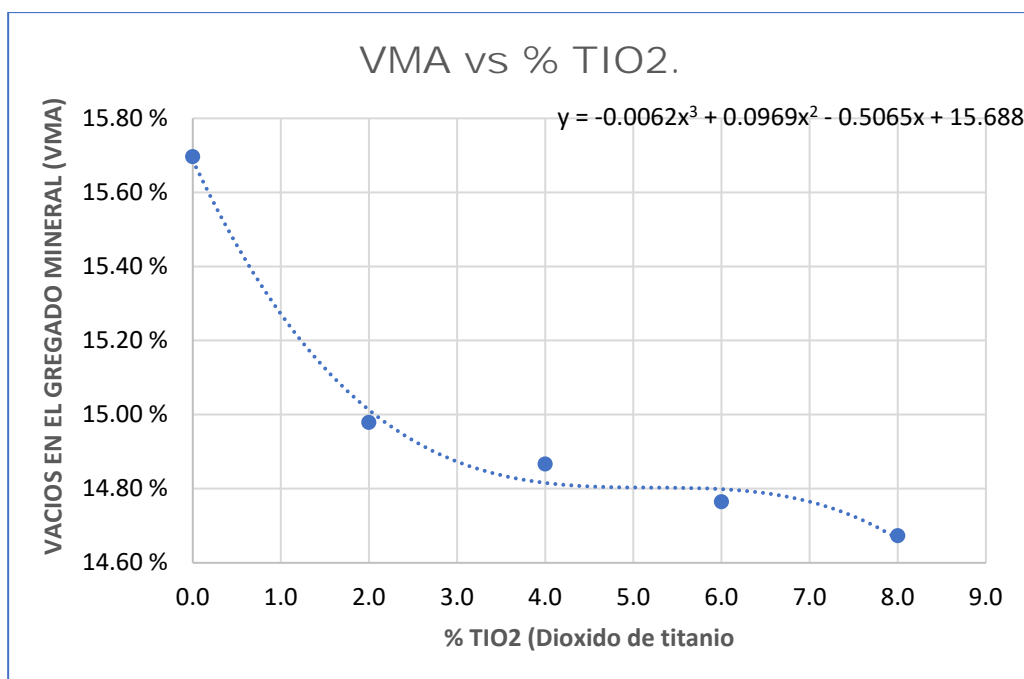


Figura. 52

vacíos en el agregado mineral vs porcentaje de dióxido de titanio (TiO₂)

**Figura. 53**

Vacíos llenados con asfalto vs porcentaje de dióxido de titanio (TiO₂)

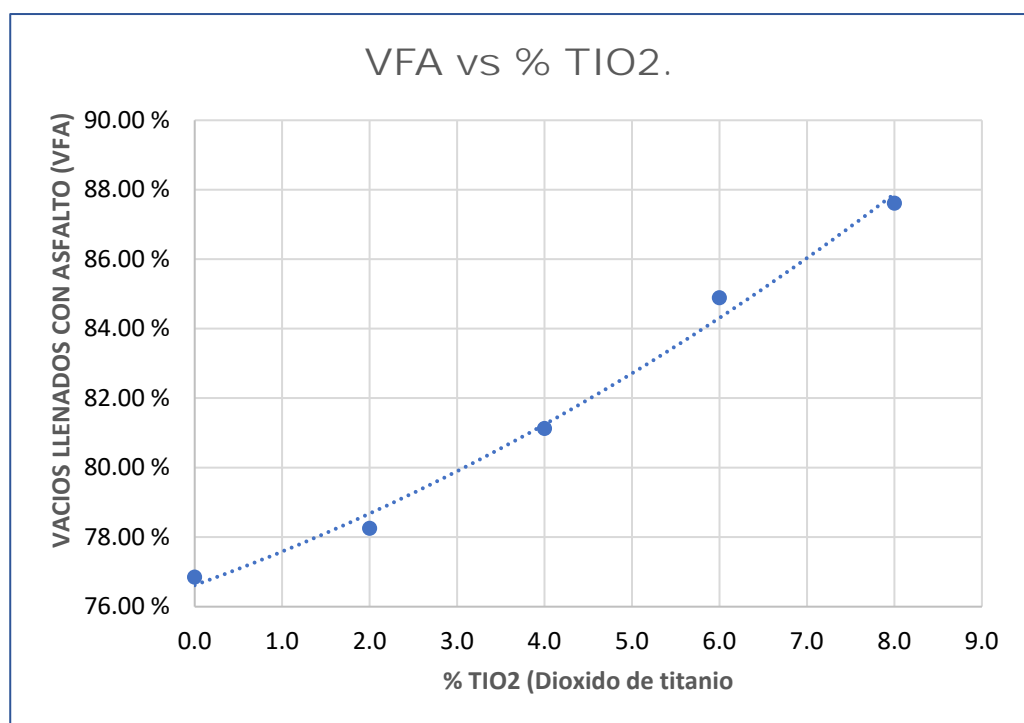
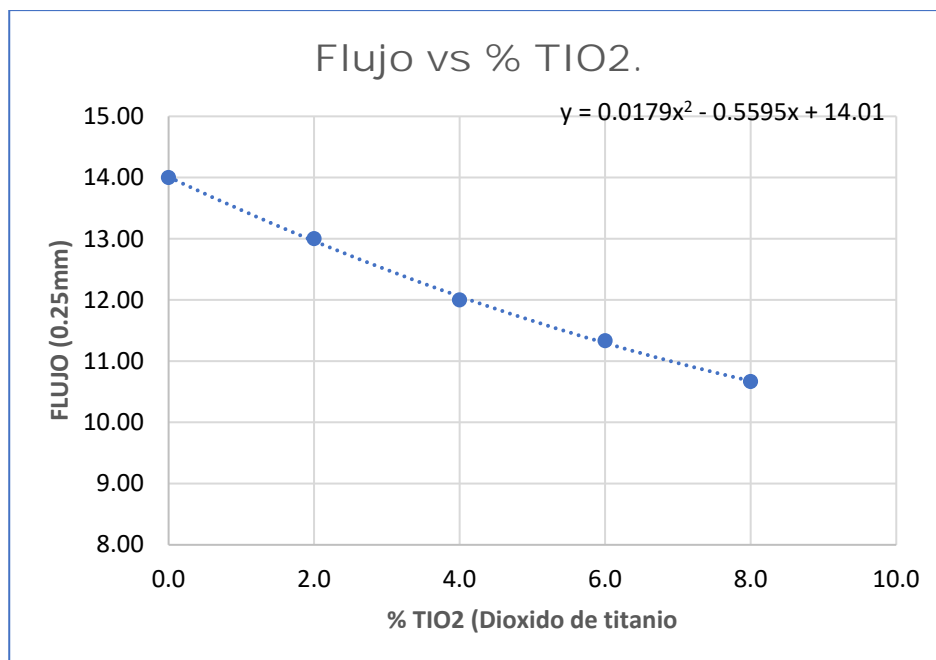
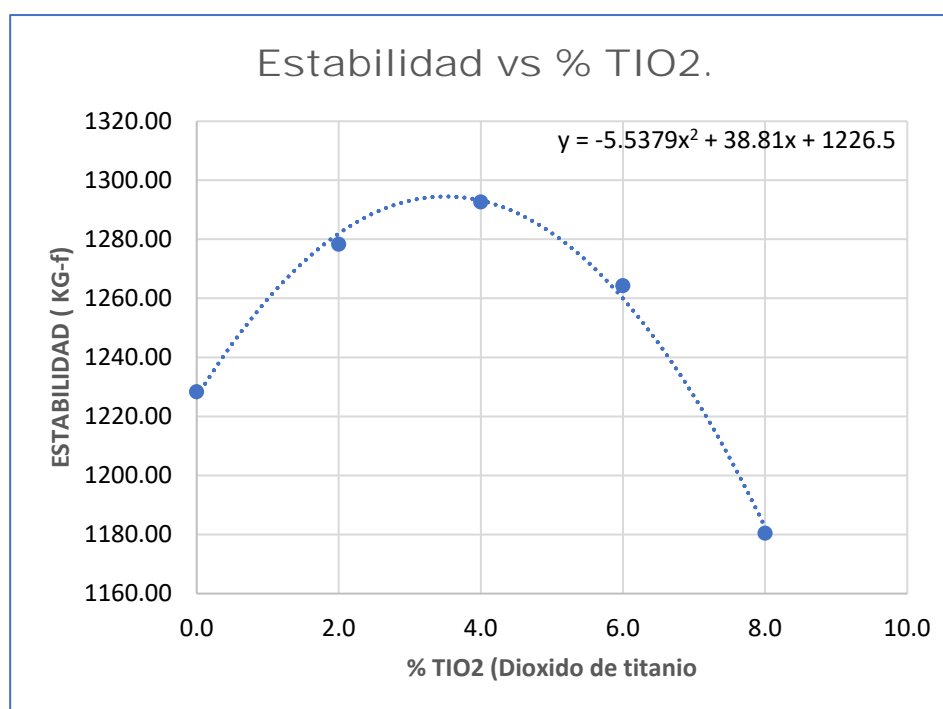


Figura. 54

Flujo vs porcentaje de dióxido de titanio (TiO₂)

**Figura. 55**

Estabilidad vs porcentaje de dióxido de titanio (TiO₂)



A partir de los ensayos realizados con diferentes porcentajes de adición de dióxido de titanio (TiO_2) a la mezcla asfáltica en caliente, se obtuvieron resultados que permitieron llevar a cabo un análisis comparativo de sus propiedades volumétricas y mecánicas. Dicho análisis evidenció que, entre las distintas dosificaciones ensayadas, el **2.00% de TiO_2** constituye el porcentaje más adecuado, al ser el que se aproxima con mayor precisión a los parámetros de referencia establecidos en la normativa vigente **EG-2013**. Este nivel de adición garantiza el cumplimiento integral de las especificaciones exigidas y refleja un balance apropiado entre resistencia, estabilidad y comportamiento funcional de la mezcla.

Al evaluar el comportamiento de la mezcla con un 2.00% de TiO_2 , se aprecian los siguientes aspectos relevantes:

Vacíos de aire (V_a): Los valores permanecen dentro del intervalo normativo de 3 a 5%, lo que asegura la durabilidad de la mezcla frente a procesos de oxidación y contribuye a evitar deformaciones excesivas que podrían originarse en caso de presentar vacíos insuficientes.

VMA (Vacíos en el agregado mineral): Los resultados alcanzan o superan el mínimo requerido de 15%, lo cual garantiza un volumen adecuado para alojar el ligante asfáltico y proporcionar la cohesión necesaria entre los componentes pétreos.

VFA (Vacíos llenos con asfalto): Se registran valores ligeramente por encima del rango recomendado de 65 a 75%. Sin embargo, esta variación se encuentra dentro de los márgenes permisibles de error y no representa una desviación significativa. Por el contrario, confirma que la mezcla mantiene un equilibrio apropiado entre rigidez estructural y flexibilidad frente a las cargas aplicadas.

Estabilidad Marshall: Se superan ampliamente los 8.15 kN (830.81 kgf) establecidos como mínimo. Este desempeño es un indicador de la elevada resistencia de la mezcla al esfuerzo cortante y a la deformación plástica.

Flujo: Los valores obtenidos permanecen dentro del rango de 8 a 14 centésimas de pulgada, demostrando un comportamiento satisfactorio en términos de deformabilidad y resistencia al agrietamiento.

En conjunto, estos resultados ponen de manifiesto que la adición del 2.00% de TiO_2 favorece la compatibilidad entre las propiedades mecánicas y volumétricas, garantizando la estabilidad de la mezcla bajo condiciones de servicio exigentes y, de forma complementaria, aportando la ventaja de incrementar la capacidad fotocatalítica del pavimento.

Por el contrario, al aumentar la proporción de TiO_2 más allá del 2.00%, se observa una disminución progresiva de la estabilidad y un desajuste en el comportamiento de vacíos (V_a y V_{FA}), lo que podría comprometer la resistencia estructural y acortar la vida útil de la mezcla en condiciones reales de tránsito.

Debe resaltarse que este estudio fue desarrollado bajo condiciones particulares: tránsito pesado, con más de 3 millones de ejes equivalentes (ESALs), y en una zona de gran altitud como la ciudad de Cusco (más de 3000 msnm), donde el clima se caracteriza por altas precipitaciones, variaciones térmicas marcadas y un entorno ambiental exigente. Estas condiciones refuerzan la necesidad de utilizar mezclas que no solo cumplan con los estándares estructurales, sino que también incorporen aditivos que permitan extender su durabilidad y aportar beneficios adicionales, como la reducción de contaminantes atmosféricos.

En este contexto, la incorporación del 2.00% de TiO_2 constituye un punto de equilibrio óptimo, en el que se mantienen los requisitos estructurales señalados por la norma y,

simultáneamente, se aprovechan las propiedades fotocatalíticas del material. Esta doble función resulta especialmente relevante en ambientes urbanos de gran altitud, donde los pavimentos no solo deben soportar cargas de tránsito significativas, sino también responder a problemas de contaminación y desgaste acelerado.

Por lo tanto, considerando los resultados experimentales obtenidos y las disposiciones técnicas de la normativa, se concluye que el porcentaje óptimo de dióxido de titanio para la mezcla asfáltica en caliente es del 2.00%. Este valor asegura el cumplimiento de los parámetros Marshall, se ajusta a los criterios del Manual de Carreteras – EG-2013 y ofrece una ventaja adicional al potenciar la acción fotocatalítica del pavimento, contribuyendo de manera positiva tanto a su desempeño funcional como a la mejora de la calidad ambiental.

Tabla 56

Parámetros de diseño de mezcla con adición de TiO₂ - porcentaje óptimo de 2%

Descripción	Resultado	Rango admisible	Validación
% de TiO ₂ óptimo	2.00	---	
% variación de aire	3.26	3 – 5	Cumple
Densidad de la mezcla asfáltica (gr/cm ³)	2.37	---	
% vacíos en el agregado mineral (VMA)	15.00	> 15	Cumple
% vacíos llenos con asfalto (VFA)	78.25	65 – 75	Admisible
Flujo (0.01")	13.00	8 – 14	Cumple
Estabilidad (kg-f)	1,278.33	> 830.81	Cumple

5.4.3. Obtención del módulo resiliente

En el marco de la presente investigación se elaboraron y ensayaron un total de seis briquetas, divididas en dos grupos experimentales. El primero correspondió a tres probetas fabricadas con el contenido óptimo de asfalto (6.05 %) sin adición de dióxido de titanio, mientras

que el segundo grupo estuvo conformado por tres probetas similares, pero con la incorporación de un 2 % de dióxido de titanio en reemplazo parcial del agregado fino.

La confección de las briquetas fue realizada en las instalaciones del laboratorio de la empresa TDM Ingeniería S.A.C., contando con la participación de personal técnico especializado y capacitado en la preparación de mezclas asfálticas. En todo momento se aplicaron los procedimientos establecidos en la normativa vigente para la elaboración de especímenes destinados al ensayo de Módulo Resiliente, asegurando de esta forma la homogeneidad y validez de los resultados obtenidos.

Una vez terminada la fase de compactación y enfriamiento de las briquetas, se procedió a la caracterización inicial de cada una de ellas. Para ello se determinaron las dimensiones (diámetro y altura), la carga de contacto y la carga cíclica, parámetros fundamentales para el desarrollo posterior del ensayo. Dichas cargas fueron establecidas siguiendo el procedimiento de tracción indirecta, método que permite evaluar la respuesta del material bajo esfuerzos de compresión repetidos aplicados en dirección diametral. De forma complementaria, se estimaron los valores del coeficiente de Poisson, los cuales constituyen un insumo necesario en el cálculo del módulo resiliente.

Con estos parámetros definidos, las briquetas fueron sometidas a la máquina de ensayo especializada en la determinación del Módulo Resiliente para mezclas asfálticas de pavimento. Este equipo aplicó cargas repetidas bajo un régimen controlado, registrando la deformación recuperable de cada espécimen y permitiendo calcular el módulo correspondiente en condiciones normalizadas. El procedimiento fue replicado para las seis briquetas, garantizando que las condiciones de ensayo fueran consistentes y comparables entre los dos grupos de mezcla y cuyos resultados se resumen en las siguientes tablas.

Tabla 57*Módulo resiliente grupo de briquetas con mezcla convencional*

Resultados de ensayo	Pulso 01	Pulso 02	Pulso 03	Pulso 04	Pulso 05	Media	Desv. Stand.	% CV
Briqueta 01 – Mezcla convencional								
Módulo resiliente (Mpa)	4872	4627	4695	4640	4530	4673	112.91	2.42
Fuerza de carga pico (N)	1530	1531	1532	1532	1533	1531	1.14	0.07
Fuerza de asentamiento	176	173	173	176	174	174	1.45	0.83
Deformación total recuperable	3.12	3.28	3.24	3.28	3.36	3.26	0.08	2.44
Deformación horizontal recuperable #1 (µm)	1.55	1.61	1.61	1.69	1.61	1.61	0.05	2.96
Deformación horizontal recuperable #2 (µm)	1.57	1.67	1.63	1.58	1.65	1.65	0.07	4.34
Briqueta 02 – Mezcla convencional								
Módulo resiliente (Mpa)	4902	4747	4740	4738	4592	4744	98.11	2.07
Fuerza de carga pico (N)	1531	1521	1533	1532	1521	1527	5.31	0.35
Fuerza de asentamiento	172	177	172	172	177	174	2.45	1.41
Deformación total recuperable	2.52	2.57	2.59	2.59	2.64	2.58	0.04	1.5
Deformación horizontal recuperable #1 (µm)	1.32	1.33	1.24	1.34	1.36	1.32	0.04	3.04
Deformación horizontal recuperable #2 (µm)	1.2	1.24	1.35	1.25	1.28	1.26	0.05	3.87
Briqueta 03 – Mezcla convencional								
Módulo resiliente (Mpa)	4796	4631	4653	4526	4518	4625	101.28	2.19
Fuerza de carga pico (N)	1525	1533	1528	1522	1533	1528	4.35	0.28
Fuerza de asentamiento	175	172	175	175	171	174	1.84	1.06
Deformación total recuperable	3.13	3.26	3.23	3.31	3.34	3.25	0.07	2.24
Deformación horizontal recuperable #1 (µm)	1.21	1.25	1.32	1.27	1.27	1.27	0.04	2.87
Deformación horizontal recuperable #2 (µm)	1.92	2.01	1.91	2.04	2.07	1.99	0.06	3.21

Tabla 58*Módulo resiliente grupo de briquetas modificadas con dióxido de titanio (TiO₂)*

Resultados de ensayo	Pulso 01	Pulso 02	Pulso 03	Pulso 04	Pulso 05	Media	Desv. Stand.	% CV
Briqueta 01 – Mezcla convencional								
Módulo resiliente (Mpa)	5522	5455	5363	5367	5246	5390	93.50	1.73
Fuerza de carga pico (N)	1692	1689	1682	1686	1688	1687	3.49	0.21
Fuerza de asentamiento	191	192	192	191	193	192	1.03	0.54
Deformación total recuperable	3.02	3.05	3.09	3.09	3.17	3.08	0.05	1.61
Deformación horizontal recuperable #1 (µm)	1.40	1.56	1.50	1.40	1.60	1.49	0.08	5.35
Deformación horizontal recuperable #2 (µm)	1.62	1.49	1.58	1.69	1.57	1.59	0.07	4.13
Briqueta 02 – Mezcla convencional								
Módulo resiliente (Mpa)	5230	5261	5237	5216	5143	5218	39.95	0.77
Fuerza de carga pico (N)	1679	1676	1683	1680	1676	1679	2.57	0.15
Fuerza de asentamiento	191	192	194	193	192	192	1.14	0.59
Deformación total recuperable	3.29	3.27	3.30	3.31	3.35	3.30	0.03	0.78
Deformación horizontal recuperable #1 (µm)	1.52	1.60	1.60	1.49	1.68	1.58	0.07	4.25
Deformación horizontal recuperable #2 (µm)	1.78	1.66	1.69	1.81	1.67	1.72	0.06	3.49
Briqueta 03 – Mezcla convencional								
Módulo resiliente (Mpa)	5344	5418	5331	5208	5316	5323	67.52	1.27
Fuerza de carga pico (N)	1685	1688	1680	1677	1686	1682	3.16	0.19
Fuerza de asentamiento	191	192	192	194	192	192	1.16	0.91
Deformación total recuperable	3.14	3.10	3.12	3.08	3.12	3.11	0.03	1.79
Deformación horizontal recuperable #1 (µm)	1.51	1.46	1.52	1.50	1.63	1.52	0.03	1.90
Deformación horizontal recuperable #2 (µm)	1.60	1.60	1.59	1.63	1.63	1.61	0.02	1.00

Resultados de la mezcla convencional (6.05 % Pb)

- En la mezcla convencional se elaboraron tres briquetas, cuyos resultados de MR fueron **4673 MPa, 4744 MPa y 4625 MPa**, obteniéndose un **promedio de 4681 MPa**. La **desviación estándar** calculada fue de aproximadamente **60 MPa**, con un **coeficiente de variación (CV) de 1.28 %**. Estos valores reflejan una **muy buena uniformidad** en la respuesta de las probetas, esto probablemente se deba a la elaboración y compactación de las briquetas de manera mecánica realizado en el laboratorio TDM, al ser este una institución con amplio prestigio en su rubro, ya que la dispersión es mínima y los resultados se mantienen dentro de un rango estrecho.
- La magnitud del MR indica que la mezcla convencional presenta una **rigidez adecuada a 20 °C**, lo que supone un comportamiento satisfactorio frente a las sollicitaciones elásticas repetidas. En términos de desempeño, este nivel de módulo proporciona un equilibrio entre rigidez y flexibilidad, permitiendo resistir deformaciones excesivas sin comprometer la integridad estructural en la fase inicial de servicio.

Resultados de la mezcla con 2 % de TiO₂ (6.05 % Pb)

- De manera análoga, para la mezcla con incorporación de TiO₂ también se ensayaron tres briquetas. Los valores de MR obtenidos fueron 5390 MPa, 5218 MPa y 5323 MPa, alcanzándose un promedio de 5310 MPa. En este caso, la desviación estándar fue de aproximadamente 87 MPa, con un coeficiente de variación de 1.64 %, lo que nuevamente representa una variabilidad baja entre los especímenes.
- Este incremento en los valores medios de MR con respecto a la mezcla convencional (5310 vs. 4681 MPa) evidencia que la adición de TiO₂ otorga una mayor rigidez a la

mezcla asfáltica. La diferencia absoluta es de alrededor de 629 MPa, lo que equivale a un aumento del 13.5 % en el módulo resiliente. En términos prácticos, este comportamiento indica que la mezcla modificada puede soportar con mayor eficacia las cargas cíclicas del tránsito, reduciendo la magnitud de las deformaciones elásticas acumuladas en el pavimento.

Comparación entre la mezcla convencional y la mezcla con adición al 2% de TiO_2

- La comparación directa entre los dos grupos de ensayos permite identificar claramente la influencia del TiO_2 en la respuesta mecánica de la mezcla. En primer lugar, se observa que ambas series de briquetas presentan excelente consistencia, ya que los coeficientes de variación son inferiores al 2 %, lo cual da confianza en la repetibilidad y confiabilidad de los resultados. Sin embargo, la mezcla modificada se distingue por alcanzar un módulo medio superior, lo que confirma el efecto positivo del aditivo.
- El incremento del 13.5 % en el MR no debe considerarse menor, pues en el dimensionamiento de pavimentos incluso variaciones de 5 a 10 % en la rigidez pueden implicar diferencias notorias en la vida útil del diseño o en los espesores requeridos para la capa de rodadura. Un mayor MR supone que la mezcla tendrá un mejor desempeño frente a cargas repetidas, limitando la aparición temprana de deformaciones permanentes y contribuyendo a la prolongación del servicio estructural.
- Al mismo tiempo, es importante señalar que el aumento de rigidez se mantiene dentro de un rango razonable, sin generar riesgos de fragilidad excesiva que pudieran comprometer el comportamiento de la mezcla en bajas temperaturas. Este aspecto

resulta favorable en el contexto climático de Cusco, donde las variaciones térmicas son relevantes y un equilibrio entre rigidez y flexibilidad es fundamental.

- La evidencia experimental respalda la hipótesis de que el dióxido de titanio, además de su potencial fotocatalítico, contribuye a reforzar la estructura de la mezcla asfáltica, mejorando su rigidez bajo condiciones de carga repetida. Para fines de diseño, la mezcla con TiO_2 representa una alternativa viable y técnicamente recomendable, dado que ofrece una mejor respuesta mecánica sin sacrificar la uniformidad ni la consistencia de los resultados.
- En resumen, los ensayos de módulo resiliente muestran que la adición de un 2 % de TiO_2 en reemplazo del agregado fino genera una mejora significativa en la capacidad elástica recuperable de la mezcla, con un aumento promedio del 13.5 % respecto a la mezcla convencional. Este hallazgo refuerza la pertinencia de considerar el uso de aditivos minerales innovadores en el diseño de pavimentos flexibles, con el fin de optimizar su durabilidad y desempeño estructural en condiciones de tránsito exigente.

5.4.4. Obtención de la resistencia a la tensión

En total se ensayaron 12 especímenes, distribuidos en dos condiciones de análisis. La primera correspondió a la mezcla asfáltica diseñada con el contenido óptimo de ligante asfáltico determinado previamente mediante el método Marshall, mientras que la segunda consideró la misma proporción de ligante, adicionada con un 2% de dióxido de titanio (TiO_2), porcentaje que fue definido como el nivel óptimo de incorporación del aditivo al cumplir con los requerimientos mínimos establecidos en la norma AASHTO T283 y con las especificaciones del Manual de Carreteras – Ensayo de Materiales, EG-2013.

Para cada condición se prepararon y acondicionaron 6 briquetas en laboratorio, de las cuales 3 fueron ensayadas en estado seco y 3 en estado húmedo, siguiendo el procedimiento indicado en la AASHTO T283. Este procedimiento establece que la comparación entre especímenes secos y acondicionados permite evaluar la susceptibilidad al daño por humedad de la mezcla, mediante el cálculo del TSR (%).

La elección de trabajar con 3 briquetas por condición responde a los criterios de representatividad estadística que exige la norma, asegurando que los valores promedio obtenidos reflejen adecuadamente el comportamiento real de la mezcla y que la dispersión de resultados (evaluada a través de la desviación estándar) se mantenga dentro de rangos aceptables para garantizar la confiabilidad de los ensayos. En este contexto, la aplicación del TiO_2 al 2% se justifica no solo como un aditivo de mejora ambiental, por sus propiedades fotocatalíticas que contribuyen a la reducción de contaminantes atmosféricos, sino también como un modificador que puede mejorar la durabilidad estructural de las mezclas bajo condiciones de humedad.

A continuación, presentamos los resultados individuales de cada briketa, junto con el análisis estadístico comparativo que incluye: valores promedio de resistencia a la tracción indirecta (ITS), desviaciones estándar, número de especímenes ensayados por condición y el cálculo del TSR (%), parámetro fundamental que permite determinar si las mezclas cumplen con el criterio de aceptación mínimo del 80% establecido en la AASHTO T283 y exigido en el Manual de Carreteras – EG-2013.

Tabla 59*Ensayo Lottman modificado*

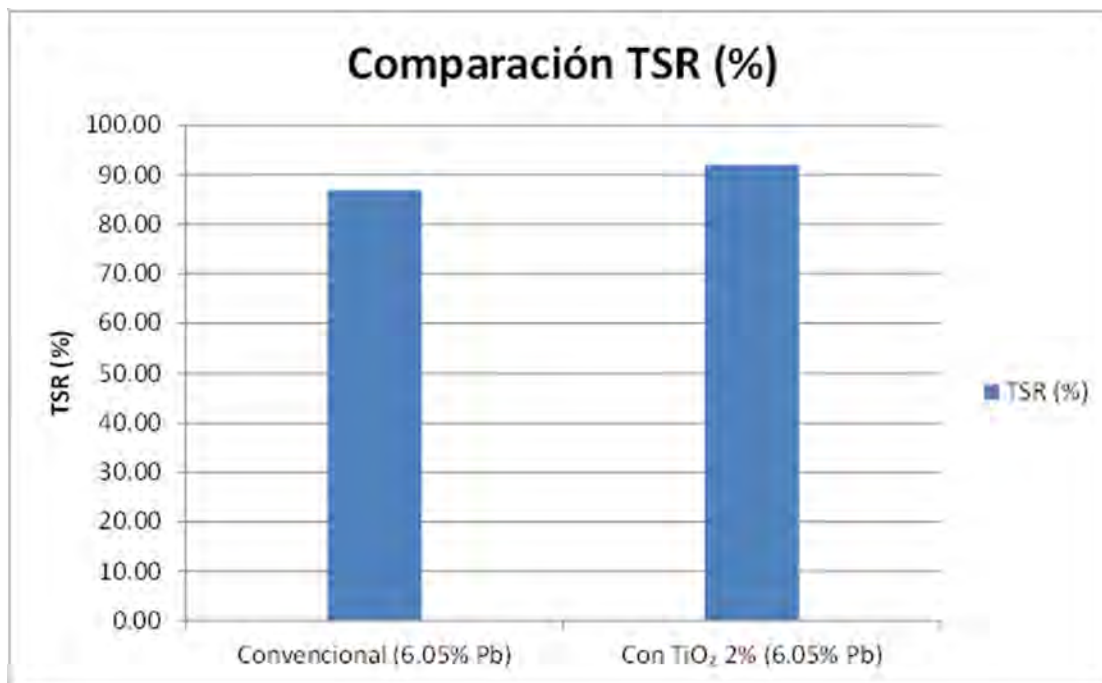
Comparación TSR - Convencional (6.05% Pb) vs. Con TiO₂ 2%						
Escenario	Grupo	Probeta	Carga P (N)	Diámetro D (mm)	Altura t (mm)	ITS (kPa)
Convencional (6.05% Pb)	Seco	S1	1600.65	101.6	63.40	158.20
Convencional (6.05% Pb)	Seco	S2	1550.68	101.6	63.70	152.53
Convencional (6.05% Pb)	Seco	S3	1680.12	101.6	63.50	165.79
Convencional (6.05% Pb)	Acondicionado	A1	1250.87	101.6	63.80	122.85
Convencional (6.05% Pb)	Acondicionado	A2	1380.89	101.6	63.60	136.05
Convencional (6.05% Pb)	Acondicionado	A3	1320.19	101.6	64.00	129.25
Con TiO ₂ 2% (6.05% Pb)	Seco	S4	1800.22	101.6	63.20	178.48
Con TiO ₂ 2% (6.05% Pb)	Seco	S5	1820.65	101.6	63.80	178.81
Con TiO ₂ 2% (6.05% Pb)	Seco	S6	1760.88	101.6	64.10	172.13
Con TiO ₂ 2% (6.05% Pb)	Acondicionado	A4	1450.69	101.6	63.50	143.15
Con TiO ₂ 2% (6.05% Pb)	Acondicionado	A5	1570.44	101.6	64.00	153.75
Con TiO ₂ 2% (6.05% Pb)	Acondicionado	A6	1490.05	101.6	63.60	146.80

Tabla 60*Estadístico ensayo Lottman*

Resumen estadístico								
Especimen	ITS Prom. Seco	ITS Prom. Húmedo	Desv.Est. Seco	Desv.Est. Húmedo	n Seco	n Húmedo	TSR (%)	Criterio ≥80%
Convencional (6.05% Pb)	158.84	129.38	6.65	6.60	3.00	3.00	81.46	CUMPLE
Con TiO ₂ 2% (6.05% Pb)	176.47	147.90	3.77	5.39	3.00	3.00	83.81	CUMPLE

Figura. 56

Comparación de resistencia a la tensión con adición de TiO₂ y sin adición de TiO₂



Resultados de la mezcla convencional (6.05% Pb)

- El ITS promedio en condición seca fue de 158.84 kPa, mientras que en condición acondicionada (húmeda) se redujo a 129.38 kPa.
- Esto representa un TSR de 81.46%, valor que supera el límite mínimo de aceptación del 80% establecido en la norma AASHTO T283.
- La desviación estándar fue de 6.65 kPa en seco y 6.60 kPa en húmedo, lo que indica una dispersión moderada pero aún dentro de lo aceptable.
- En términos prácticos, la mezcla convencional cumple con los criterios de durabilidad, aunque se observa una reducción más marcada de resistencia al pasar de condición seca a húmeda.

Resultados de la mezcla con 2% de TiO₂ (6.05% Pb)

- El ITS promedio en seco alcanzó 176.47 kPa, mientras que en condición húmeda se mantuvo en 147.90 kPa.
- El valor de TSR fue de 83.81%, ligeramente superior al de la mezcla convencional y también por encima del criterio mínimo de aceptación ($\geq 80\%$).
- Las desviaciones estándar fueron menores (3.77 kPa en seco y 5.39 kPa en húmedo) en comparación con la mezcla sin aditivo, reflejando mayor homogeneidad en el comportamiento de las briquetas.
- Estos resultados evidencian que la incorporación de 2% de TiO₂ mejora la resistencia al daño por humedad, otorgando una mayor estabilidad estructural.

Comparación entre ambas mezclas

- La adición de TiO₂ al 2% permitió incrementar la capacidad de la mezcla para conservar su resistencia tras el acondicionamiento, mejorando el TSR de 81.46% → 83.81%.
- Aunque la diferencia numérica (2.35 puntos porcentuales) es moderada, se considera técnicamente positiva, pues indica menor susceptibilidad a la humedad en la mezcla modificada.
- Además, la reducción en la dispersión de resultados (menores desviaciones estándar) demuestra un efecto favorable en la uniformidad y consistencia de la mezcla tratada con TiO₂.

CAPÍTULO VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1.1. Estabilidad y flujo de una mezcla asfáltica en caliente con adición de dióxido de titanio

De acuerdo a los resultados obtenidos en el ensayo Marshall para la mezcla asfáltica en caliente con adición de TiO_2 en diferentes proporciones, resultados visualizados en la Tabla 55, se puede evidenciar que la adición de TiO_2 genera variaciones tanto en la estabilidad como en el flujo de las mezclas asfálticas.

En cuanto a la estabilidad, se alcanza un valor máximo con la adición de 4% de TiO_2 con un valor de 1292.60 kgf, lo que representa un incremento del 5.2% respecto a la mezcla convencional con una estabilidad de 1228.38 kgf, asimismo, los porcentajes de 2% (1,278.33 kgf) y 6% (1264.28 kgf) también muestran un incremento respecto a la mezcla convencional, lo que indica que la incorporación de TiO_2 favorece la cohesión y rigidez de la mezcla en ciertos rangos de dosificación.

Estos resultados concuerdan con los antecedentes de Rivera, De la Cruz, & Vega (2023), quienes reportan incrementos en estabilidad con adiciones de 2%, 4% y 8% de TiO_2 con 2% como opción óptima al equilibrar la estabilidad y durabilidad de la mezcla. Asimismo, Diniz, (2020) observó incrementos de estabilidad con bajas proporciones de TiO_2 y disminución cuando la adición era excesiva, lo que respalda el rango de dosificación.

Por el contrario, el flujo presenta una tendencia decreciente conforme se incrementa el contenido de TiO_2 , pasando de 14 para la mezcla convencional a 10.67 centésimas de pulgada con adición de 8% de TiO_2 , indicando un aumento de rigidez y menor capacidad de deformación plástica. A mayor rigidez en la mezcla se espera un menor flujo, ya que la muestra ofrece mayor resistencia a la deformación plástica bajo carga (Asphalt Institute, 2001). Este comportamiento se respalda con nuestros resultados, aunque difiere del antecedente de Cruz & Zaga (2024),

quienes reportaron un aumento de flujo de 3.95mm a 5.4mm con 3% de TiO_2 . La discrepancia entre resultados puede darse por la diferencia de agregados, ligante asfáltico, método de adición o diseño de mezcla, evidenciando que la influencia del TiO_2 sobre el flujo depende del contexto experimental.

Cabe indicar que, a pesar de que la estabilidad mostró incrementos en varios % de TiO_2 , la determinación del porcentaje óptimo de TiO_2 no depende únicamente de este parámetro, ya que los valores de flujo y, principalmente, los parámetros volumétricos también se ven afectados por la incorporación del TiO_2 , identificando de esta manera, que la adición de 2% TiO_2 , representa un porcentaje óptimo, que no compromete significativamente el flujo, ni altera de manera desfavorable los parámetros volumétricos, asimismo, para la adición del 2% de TiO_2 todos los parámetros se encuentran dentro de los rangos permisibles indicados en la norma DG-2013 del MTC.

La selección del 2% de TiO_2 implica que la mezcla asfáltica mantiene el equilibrio entre estabilidad y flujo, traduciéndose en un adecuado comportamiento estructural ante la exposición a cargas de tráfico, en otras palabras, la dosificación determinada, asegura una mayor resistencia a cargas sin deformaciones plásticas excesivas, caso contrario con incrementos superiores de TiO_2 , que indican un riesgo a la fisuración prematura por fatiga o contracción térmica. Se garantiza un desempeño confiable bajo las condiciones de tránsito y condiciones geográficas de la ciudad del Cusco.

6.1.2. Módulo resiliente de una mezcla asfáltica en caliente con adición de dióxido de titanio

Los resultados mostrados en la Tabla 57 y Tabla 58 del análisis de resultados del ensayo de módulo resiliente evidencian que la adición de TiO_2 produjo un incremento en el módulo resiliente de las mezclas asfálticas. Las briquetas con adición de TiO_2 alcanzaron valores de

módulo entre 5218 y 5390 Mpa, mientras que las mezclas convencionales obtuvieron valores en el rango de 4673 a 4920 Mpa, lo que representa un incremento aproximado del 10% al 15% en la capacidad de recuperación elástica de las mezclas asfálticas con adición de TiO_2 respecto a la mezcla convencional.

Se destaca que el incremento presentado en el módulo resiliente, no es proporcional al incremento observado en la estabilidad Marshall, esto indica que el efecto del TiO_2 no se limita a una mayor cohesión en la mezcla, sino que también actúa sobre la respuesta elástica de la mezcla frente a cargas repetidas. Para las condiciones de servicio, un mayor módulo resiliente implica menores deformaciones bajo tránsito repetitivo, lo cual contribuye a la resistencia al ahuellamiento.

Los resultados coinciden con lo reportado por Diniz (2020), que observó que la adición de 2% de TiO_2 como reemplazo parcial del filler incrementó el módulo resiliente de las mezclas asfálticas, mientras que proporciones mayores podrían reducir este parámetro. Con esto se respalda la existencia de un rango óptimo de dosificación, donde la mezcla gana rigidez y capacidad de recuperación sin comprometer su flexibilidad.

Un módulo resiliente excesivamente elevado, puede traducirse en mezclas demasiado rígidas y, en consecuencia, más propensas a fisuración por fatiga o contracción térmica (Mi, Li, & Zhang, 2022). En este sentido, el porcentaje óptimo de 2% de TiO_2 determinado, permite mantener un balance adecuado, la mezcla gana rigidez y capacidad de recuperación sin llegar a valores que comprometan su flexibilidad.

Finalmente la incorporación de 2% de TiO_2 , puede considerarse como beneficiosa para la mezcla asfáltica, ya que, con los valores obtenidos se observa que la mezcla presenta un mejor desempeño frente a cargas dinámicas, reduciendo la deformación acumulada y alargando la vida

útil del pavimento. Para el contexto de la ciudad del Cusco, esto resulta beneficioso, ya que las condiciones de tránsito y variaciones térmicas, requieren de una mezcla con resiliencia suficiente y control de riesgo de agrietamiento prematuro.

6.1.3. Resistencia a la tensión de una mezcla asfáltica en caliente con adición de dióxido de titanio

Los resultados del ensayo de medición de la tensión mostrados en la Tabla 60, muestran un TSR de 81.46% para la mezcla convencional, valor que apenas se encuentra por encima del límite mínimo de aceptación establecido en la AASHTO T283 (>80%), lo que confirma que el diseño convencional cumple con los criterios de durabilidad, aunque con una reducción significativa de resistencia al pasar de la condición seca (158.84 kPa) a condición húmeda (129.38 kPa), indicando cierta susceptibilidad al daño por humedad.

En comparación, la mezcla con adición de 2% de TiO_2 presentó un ITS mayor en seco (176.47 kPa) y en húmedo (147.90 kPa), además de un TSR de 83.81%, lo que evidencia una mejora respecto a la mezcla convencional. El menor nivel de dispersión observado en las desviaciones estándar (3.77 kPa en seco y 5.39 kPa en húmedo) indica una respuesta más homogénea de las probetas, lo cual es favorable desde el punto de vista de control de calidad.

Lo reportado por Diniz (2020), concuerda con los resultados encontrados, quien observó que la incorporación de 2% de TiO_2 como remplazo parcial del filler incrementó la resistencia indirecta a la tracción (ITS) y mejoró la respuesta de las mezclas frente a condiciones húmedas, indicando que existe un rango óptimo de adición que permite aumentar la resistencia al daño por humedad sin comprometer otros parámetros mecánicos.

Para condiciones de servicio, esta mejora implica una mayor resistencia al daño por humedad inducido y, por lo tanto, una menor susceptibilidad al deterioro prematuro por pérdida

de adherencia entre el asfalto y los agregados. En zonas lluviosas como la ciudad del Cusco, esto resulta beneficioso, ya que esta mejora, puede traducirse en una mejor vida útil del pavimento bajo condiciones de exposición al agua.

6.1.4. Eficiencia de autolimpieza de una mezcla asfáltica en caliente con adición de dióxido de titanio

Los resultados mostrados en la Tabla 51 sobre el ensayo de autolimpieza, muestran que para la mezcla convencional se obtuvieron valores de 10.90% para R4 y 40.47 para R26, valores que no superan los 20 y 50% respectivamente, para ser considerado como un material fotocatalítico, algo esperado ya que, no se cuenta con adición de TiO_2 , es a partir de la adición del TiO_2 que se alcanzan valores mayores al 20% para R4 y 50% para R26, teniendo así que para el 2% de TiO_2 se obtuvieron valores de degradación de 20.32% y 72.45% para R4 y R26 respectivamente, valores que se incrementan progresivamente con el incremento del porcentaje de adición de TiO_2 , alcanzando así para el 8% de adición de TiO_2 , valores de degradación de 50.13% para R4 y 97.76% para R26, superando los límites establecidos por norma para ser considerados como materiales fotocatalíticos.

Estos resultados son consistentes con lo reportado con la investigación de Rocha Segundo (2021), donde se observó que la incorporación de TiO_2 en mezclas asfálticas funcionalizadas permitió alcanzar superficies autolimpieantes eficientes, que facilitan la degradación de contaminantes, manteniendo la integridad estructural del pavimento. De forma similar Paitampoma (2023), reportó que la adición de TiO_2 a mezclas asfálticas en caliente, cumplieron con los valores mínimos de R4 y R26, asegurando la propiedad fotocatalítica y la autolimpieza, respaldando los resultados de que el TiO_2 mejora esta propiedad.

Con estos resultados se confirma que la adición de TiO_2 convierte a la mezcla asfáltica en un material fotocatalítico para la autolimpieza. Considerando la adición de 2% de TiO_2 como porcentaje óptimo, ya que, cumple con rango mínimos y mantiene un equilibrio favorable entre el desempeño ambiental y las propiedades mecánicas, asegurando que la mezcla conserve su estabilidad estructural y funcional para su uso en pavimentos.

6.1.5. Capacidad de purificación del aire de una mezcla asfáltica en caliente con adición de dióxido de titanio

Los resultados del ensayo de purificación del aire mostrados en la Tabla 53, muestra que la mezcla convencional prácticamente no presenta actividad fotocatalítica, con una degradación promedio de 0.14%, valor esperado para una mezcla sin TiO_2 . En cambio, con la adición del TiO_2 , se observa una relación directa entre el porcentaje de adición y la eficiencia de degradación del NO_2 , teniendo que, para la adición del 2% de TiO_2 la mezcla alcanzó un promedio de 50.59%, lo que evidencia una eficiencia fotocatalítica significativa, confirmando el aporte positivo del aditivo en el proceso de purificación del aire. Porcentajes mayores de TiO_2 (4%, 6% y 8%) mostraron incrementos sostenido en la eficiencia (60.82%, 73.61% y 88.34% respectivamente), confirmando la relación directa entre la cantidad de TiO_2 y la capacidad de degradación de dióxido de nitrógeno (NO_2).

Los resultados son consistentes con lo reportado por Rocha Segundo (2021), quien demostró que la incorporación de TiO_2 en mezclas asfálticas funcionalizadas permite la degradación de contaminantes del aire y mejora la funcionalidad ambiental de los pavimentos. Asimismo, Wang, Leng, Huben, & Oeser (2017) evidenciaron que mezclas modificadas con TiO_2 cuentan con actividad fotocatalítica bajo condiciones de tránsito, lo que da viabilidad al uso de TiO_2 para la purificación del aire urbano en pavimentos asfálticos.

También se indica que, a pesar que porcentajes superiores al 2%, progresivamente evidencian una mejor eficiencia de degradación de NO_2 , se observa también que estos porcentajes (4%, 6% y 8%) comprometen los parámetros volumétricos y mecánicos de la mezcla, como se evidencia en los ensayos de estabilidad y flujo. Por tal motivo, se identificó que la adición del 2% de TiO_2 representa un porcentaje óptimo que evidencia la actividad fotocatalítica y a su vez no compromete la funcionabilidad de la mezcla, más al contrario este porcentaje de adición contribuye al mejor desempeño estructural de la mezcla al evidenciar también una mejora en sus propiedades mecánicas.

Esto implica que, la adición de 2% de TiO_2 no solo mejora el desempeño mecánico de la mezcla, sino que también contribuye a la mitigación de contaminantes atmosféricos urbanos (como el NO_2), favoreciendo la sostenibilidad de la estructura.

6.2. Validación de las hipótesis

HE-1: Se mejoró la estabilidad y flujo de una mezcla asfáltica en caliente por la adición de 2% de dióxido de titanio para carpetas asfálticas de pavimentos flexibles en la ciudad de Cusco.

HE-2: Se incrementó el módulo resiliente de una mezcla asfáltica en caliente por la adición de 2% de dióxido de titanio para carpetas asfálticas de pavimentos flexibles en la ciudad de Cusco.

HE-3: Se favoreció la tensión de una mezcla asfáltica en caliente por la adición de 2% dióxido de titanio para carpetas asfálticas de pavimentos flexibles en la ciudad de Cusco.

HE-4: Se mejoró la eficiencia de autolimpieza en una mezcla asfáltica en caliente por la adición de dióxido de titanio para carpetas asfálticas de pavimento flexibles en la ciudad de Cusco.

HE-5: Se comprobó la capacidad de purificación del aire de una mezcla asfáltica en caliente por la adición de dióxido de titanio para carpetas asfálticas de pavimentos flexibles en la ciudad de Cusco.

CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

La incorporación de dióxido de titanio (TiO_2) en mezclas asfálticas en caliente para pavimentos flexibles tiene un efecto positivo en el desempeño estructural y funcional de la carpeta asfáltica. La adición del aditivo mejora la estabilidad y rigidez de la mezcla, incrementa su módulo resiliente, fortalece la resistencia a la tensión frente a la humedad, y adiciona propiedades funcionales como la autolimpieza y la capacidad de purificación del aire. Estos efectos indican que el TiO_2 puede contribuir a la durabilidad y confiabilidad del pavimento bajo las condiciones climáticas y de tránsito de la ciudad del Cusco, a la vez que aporta beneficios ambientales.

- La adición de TiO_2 afecta tanto la estabilidad como el flujo de la mezcla asfáltica. Se observó un aumento de estabilidad con adiciones de 2%, 4% y 6%, mientras que el flujo disminuye progresivamente, indicando mayor rigidez y menor capacidad de deformación plástica. La dosificación de 2% de TiO_2 permite mantener un equilibrio adecuado entre rigidez y flexibilidad, asegurando que la mezcla pueda soportar cargas de tráfico sin deformaciones excesivas, garantizando un desempeño confiable en su puesta en servicio.
- El módulo resiliente se incrementa con la adición de TiO_2 con una mejora de 10% a 15% frente a la mezcla convencional, lo que refleja una mayor capacidad de recuperación elástica ante cargas repetitivas. Con 2% de TiO_2 se obtiene un balance entre rigidez y flexibilidad que reduce la deformación acumulada y el riesgo de ahuellamiento, mejorando la durabilidad de la mezcla bajo tránsito repetitivo.

- La adición de 2% de TiO_2 a la mezcla mostró valores superiores de ITS y TSR respecto a la mezcla convencional, evidenciando una mayor resistencia al daño por humedad, esto se traduce en un mejor desempeño frente al deterioro prematuro causado por agua y ciclos de humedad, lo que es especialmente relevante en zonas lluviosas como la ciudad del Cusco, de esta forma se contribuye a aumentar la vida útil del pavimento.
- Para la autolimpieza, se evidencia una relación directamente proporcional entre la cantidad adicionada de TiO_2 y la capacidad de degradación, de esta forma se confirma que la adición de TiO_2 a la mezcla asfáltica concede actividad fotocatalítica con capacidad auto limpiante, logrando degradaciones de 20.32% y 72.45% para R4 y R26 respectivamente, para la adición de 2% de TiO_2 seleccionado como porcentaje óptimo. Con esta propiedad se mejora la autolimpieza del pavimento, reduciendo la acumulación de contaminantes y manteniendo la textura superficial funcional. Así la mezcla mantiene un desempeño estructural y funcional sin comprometer sus propiedades mecánicas.
- Con respecto a la purificación del aire, la adición de 2% de TiO_2 permite una degradación significativa de 50.59% en promedio para 2 horas de exposición, de esta forma se evidencia la actividad fotocatalítica del pavimento, lo que contribuye a la sostenibilidad ambiental. Este beneficio ambiental se logra sin comprometer la integridad estructural de la mezcla, asegurando que el pavimento mantenga su desempeño mecánico y funcional bajo las condiciones de tránsito y climáticas de la ciudad del Cusco.

7.2. Recomendaciones

Se recomienda considerar la incorporación de dióxido de titanio (TiO_2) en mezclas asfálticas en caliente para pavimentos flexibles como una alternativa para mejorar las propiedades mecánicas de la carpeta asfáltica y aportar actividad fotocatalítica que contribuya a la reducción de la contaminación ambiental. La proporción de TiO_2 debe determinarse mediante un diseño de mezcla específico, considerando las condiciones del proyecto y los materiales empleados, a fin de asegurar el cumplimiento de los requerimientos normativos y estructurales.

- Se aprecia que la adición de TiO_2 mejora la estabilidad de la mezcla, pero reduce progresivamente el flujo, lo que limita el porcentaje de incorporación. Por ello, se recomienda, en caso de requerir mayores porcentajes de TiO_2 , considerar el uso de asfaltos modificados con polímeros, asfaltos de penetración más baja o emulsiones específicas que incrementen la fluidez de la mezcla. Estas alternativas ofrecen la posibilidad de incrementar la proporción de TiO_2 sin afectar significativamente las propiedades mecánicas de la mezcla, al mismo tiempo que contribuyen a mejorar la eficiencia fotocatalítica.
- Se recomienda evaluar el módulo resiliente de la mezcla asfáltica con adición de TiO_2 como un parámetro que permite caracterizar la rigidez de la carpeta asfáltica y analizar su efecto sobre su respuesta elástica. Si bien el método AASHTO de diseño mecanístico-empírico no exige de manera obligatoria la determinación del módulo resiliente, este puede emplearse como un parámetro opcional, particularmente cuando existen limitaciones técnicas o de equipamiento para la obtención del módulo dinámico, permitiendo integrar la mezcla en el análisis estructural del pavimento y apoyar la evaluación de su desempeño bajo condiciones de tránsito.

- Se recomienda evaluar la resistencia a la tensión indirecta (ITS) y el índice de resistencia a la tracción retenida (TSR) en mezclas asfálticas con adición de TiO_2 , a fin de analizar el efecto de este material sobre la cohesión interna de la mezcla y la adherencia asfalto – agregado, especialmente frente a la acción de la humedad. Estos parámetros permiten verificar que la incorporación de TiO_2 no genere efectos adversos en el comportamiento mecánico de la mezcla ni en su respuesta ante ciclos de humedad, y constituyen criterios complementarios para definir contenidos adecuados de TiO_2 , asegurando un equilibrio entre desempeño mecánico y beneficios funcionales asociados a la actividad fotocatalítica.
- Para la autolimpieza, se recomienda considerar estrategias de mantenimiento y limpieza superficial progresiva del pavimento, especialmente en periodos de escasa precipitación o condiciones de sequía, ya que la acumulación de polvo y partículas finas puede cubrir la superficie activa del TiO_2 y reducir su eficiencia fotocatalítica. Estas acciones permitirían restablecer la exposición del material fotocatalítico, contribuyendo a la continuidad de la propiedad auto limpiante sin afectar el comportamiento estructural del pavimento.
- Para la purificación del aire, se sugiere recomienda mediciones en campo de la capacidad de degradación de contaminantes como NO_2 en tramos de pavimento expuestos al ambiente urbano. Esta evaluación permitirá cuantificar el impacto real del TiO_2 en la mitigación de contaminantes atmosféricos y determinar la eficiencia práctica de la mezcla sin comprometer la integridad estructural del pavimento.

CAPÍTULO VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- AASHTO. (2017). *T 307-99 (2017): Standard method of test for determining the resilient modulus of soils and aggregate materials*. Washington, D.C.: merican Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO. (2019). *Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing and Provisional Standards*. AASHTO.
- Adrianzen Flores, O. J., Azula Vasquez, J. J., Pacherras Sánchez, C. F., & Muñoz Pérez, S. P. (2022). Uso de distintos tipos de fibras para mejorar las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica. *Una revista literario. Infraestructura vial*, 24(43), 56-72.
- Armakovic, S. J. (2022). *Titanium dioxide as the most used photocatalyst for water and air purification*. Suiza. Obtenido de https://www.mdpi.com/2073-4344/13/1/26?utm_source=chatgpt.com
- Asociación Ibérica de la Fotocatálisis. (2024). *Libro Blanco de la Fotocatálisis* (Segunda ed.). Asociación Ibérica de la Fotocatálisis.
- Asphalt Institute. (2001). *Specifications and construction methods for asphalt concrete and other plant-mix types (Manual Series No. 2)*. The Asphalt Institute.
- ASTM. (2019). *Standard Specification for Mineral Filler for Bituminous Paving Mixture*. ASTM International.
- ASTM D946. (2020). *Standard Specification for Penetration-Graded Asphalt Cement for Use in Pavement Construction (ASTM D946 / D946M-20)*. ASTM International.
- Cai, H. (2014). *Evaluation of Photocatalytic Pavement for NOx Removal*. Tesis de doctorado, University of Texas at Arlington, Texas.

- Calatayud, A., Rivas, M., Camacho, J., Beltrán, C., Ansaldo, M., & Café, E. (2023). *Transporte 2050: El camino hacia la descarbonización y la resiliencia climática en América Latina y el Caribe*. Banco Interamericano de Desarrollo.
- Chavéz Valencia, L. E., Hernández Barriga, C., & Manzano Ramírez, A. (2011). Modelación del envejecimiento de los pavimentos asfálticos con la metodología de la superficie de respuesta. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 12(4), 373-382.
- Chen, X., & Mao, S. S. (2007). Titanium dioxide nanomaterials: Synthesis, properties, modifications, and applications. Chemical Reviews. *Chemical Reviews*, 107(7), 2891-2959.
- Chirinos Peralta, K. L., & Aquiese Dueñas, E. J. (s.f.). Mortero fotocatalítico con TiO_2 para la reducción de contaminantes del aire producidas por emanaciones vehiculares. *Revista de ingeniería de construcción*, 37(1).
- CPA. (1985). *Tecnología del Asfalto y Prácticas de Construcción*. Argentina: Comisión Permanente del Asfalto de la República Argentina.
- Cruz, J. Y., & Zaga, N. I. (2024). *Influencia del dióxido de titanio al 3%, 5%, 7% con respecto a las propiedades mecánicas y fotocatalíticas de la mezcla asfáltica en caliente con agregados de Abancay - Apurímac 2023*. Tesis título profesional, Universidad Tecnológica de los Andes, Abancay.
- Dalton, J. S., Janes, P. A., Nicholson, J. A., Hallam, K. R., & Allen, G. C. (2002). Photocatalytic oxidation of NO_x gases using TiO_2 : a surface spectroscopic approach. *Environmental Pollution*, 120(2), 415-422.
- Diniz, M. I. (2020). *Titanium dioxide as a modifier in asphalt mixtures: Mechanical behavior under aging conditions*. Universidad Federal de Goiás, Goiás.

- Escobar-Alaon, L., & Solís-Casados, D. A. (2021). Desarrollo de fotocatalizadores basados en TiO₂ en forma de película delgada para la degradación de moléculas orgánicas en solución acuosa. *Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología*, 14(26). doi:<https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2021.26.69646>
- Fujishima, A., Zhang, X., & Tryk, D. A. (2008). TiO₂ photocatalysis and related surface phenomena. *Surface Science Reports*, 63(12), 515-582.
- Guarín, C., & Mera, A. (2011). Fotocatálisis Heterogénea con TiO₂ Para el Tratamiento de Desechos Líquidos con Presencia del Indicador Verde de Bromocresol. *Revista Ingenierías Universidad de Medellin*, 10(19), 79-88.
- Hassan, M. M., Dylla, H., Mohamad, L. N., & Rupnow, T. (2010). Evaluation of the durability of titanium dioxide photocatalyst coating for concrete pavement. *Construction and Building Materials*. *Construction and Building Materials*, 8(24), 1456-1461.
- Institute, A. (2014). *MS-2: Asphalt Mix Design Methods* (7th edition ed.). Kentucky, USA: Asphalt Institute.
- ISO. (2016). *ISO 22197-1:2016 Método de ensayo para el rendimiento de purificación del aire de materiales fotocatalíticos semiconductores - parte 1: Eliminación de óxidos de nitrógeno (NO_x)*. Geneva: ISO.
- Jalili, M., Moghaddam, T. B., & Goli, A. (2020). Investigation of TiO₂-modified bitumen: Rutting resistance, fatigue performance and aging properties. *Construction and Building Materials*, 261, 120008.
- Menéndez, J. R. (2016). *Ingeniería de Pavimentos*. Instituto de la Construcción y Gerencia.

- Mi, S. Z., Li, Y. X., & Zhang, H. W. (2022). Preparation and Characterization of High Modulus Agent Modified Asphalt and Its High Modulus Mixture. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022.
- MTC. (2013). *Especificaciones Técnicas Generales para Construcción (EG-2013)*. Dirección General de Caminos y Ferrocarriles.
- Olarte, A. (2024). *Evaluación de la concentración del dióxido de nitrógeno mediante un analizador automático en puntos estratégicos del tránsito vehicular en la ciudad del Cusco*. Tesis de maestría, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Cusco, Cusco.
- OMS. (2021). *Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire: Material particulado (PM_{2.5} y PM₁₀), ozono, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre y monóxido de carbono*. OMS.
- Paitampoma, C. A. (2023). *Alteraciones del focalizador dióxido de titanio en las características mecánicas en las mezclas asfálticas tanto en frío como caliente en la Av. Javier Prado Lima*. Tesis Título Profesional, Universidad Peruana de Los Andes, Huancayo.
- Poblete, M. M., Huaman, E. T., Ibarra, E., Mendoza, D. L., Monge - Rodriguez, F. S., & Horna, D. (2024). Air Pollution in Two Districts of the City of Cusco: An Interdisciplinary Study Based on Environmental Monitoring and Social Risk Perception. *Atmosphere*, 16(7), 770.
- Raposerias, A., Movilla, D., Vargas, A., Bilbao, R., & Cifuentes, C. (2017). Evaluación de rigidez Marshall, tracción indirecta y módulo resiliente en mezclas asfálticas con RAP y escoria de cobre. *Revista ingeniería de Construcción*, 1(32), 15-24.

- Rivera, B. E., De la Cruz, S. A., & Vega, C. S. (2023). Modificación de la mezcla asfáltica por vía seca mediante la incorporación de dióxido de titanio. *Ingeniería Revista de la Universidad de Costa Rica*, 33(2), 75-85.
- Rivera, Cruz, D. I., & Vega. (2023). Modificaciones de la mezcla asfáltica por vía seca mediante la incorporación de dióxido de titanio. *Ingeniería*.
- Roberts, F. L., Kandhal, P. S., Brown, E. R., Lee, D., & Kennedy, T. W. (1996). *Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction* (2nd ed. ed.). National Asphalt Pavement Association Research and Education Foundation.
- Rocha Segundo, I. G. (2021). *Ecological, photocatalytic, superhydrophobic and self-cleaning asphalt pavement surfaces*. Tesis doctoral, Universidade do Minho, Braga, Portugal.
- Rondón, H. A., Rodríguez, E., & Moreno, L. A. (2007). Resistencia mecánica evaluada en el ensayo Marshall de mezclas densas en caliente elaboradas con asfaltos modificados con desechos de policloruro de vinilo (pvc), polietileno de alta densidad (pead) y poliestireno (ps). *Revista Ingenierías*, 6(11), 91-104.
- Russell, H. S., Frederickson, L. B., Hertel, O., Ellermann, T., & Jensen, S. S. (2021). A Review of Photocatalytic Materials for Urban NO_x Remediation. *Catalysts*, 11(6). Obtenido de <https://doi.org/10.3390/catal11060675>
- Sampieri, R. H., Collado, C. F., & Lucio, M. P. (2022). *Metodología de la Investigación* (7ma edición ed.). México: McGraw - Hill Education.
- UNI. (2016). *Determinación de la actividad fotocatalítica de las aglutinantes hidráulico - Método de prueba de Rodamina*. Milano: UNI - Ente Nazionale Italiano di Unificazione.

- Wang, D., Leng, Z., Huben, M., & Oeser, M. (2017). Durability of epoxy-bonded TiO₂-modified aggregate as a photocatalytic coating layer for asphalt pavement under vehicle tire polishing. *Wear*, 382-383, 1-7.
- Wei, Y., Meng, H., Wu, Q., Bai, X., & Zhang, Y. (2023). iO₂-Based Photocatalytic Building Material for Air Purification in Sustainable and Low-Carbon Cities: A Review. *Catalysts*. *Catalysts*, 13(12), 1466.
- Xiao, F., Punith, V. S., Amirkhanian, S. N., & Shen, J. (2012). Effects of mineral filler on the properties of warm mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 26(1), 107-113.

CAPÍTULO IX. ANEXOS

Anexo 01. Matriz de consistencia

Tabla 61

Matriz de consistencia

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES	METODOLOGÍA	POBLACIÓN y MUESTRA
Problema general.	Objetivo genera.	Hipótesis general.	Variable Independiente.	Variable independiente	Tipo de investigación.	Población
¿Cuáles son las propiedades fotocatalíticas y mecánicas de una mezcla asfáltica en caliente con adición de dióxido de titanio para la carpeta de un pavimento flexible en la ciudad de Cusco?	Evaluar las propiedades fotocatalíticas y mecánicas de una mezcla asfáltica en caliente con adición de dióxido de titanio en la carpeta de un pavimento flexible en la ciudad de Cusco.	Las propiedades fotocatalíticas y mecánicas de una mezcla asfáltica en caliente se mejoran con la adición de dióxido de titanio en la carpeta de un pavimento flexible en la ciudad de Cusco.	Mezcla asfáltica en caliente con adición de dióxido de titanio.	<ul style="list-style-type: none">Contaminantes atmosféricosContaminantes orgánicos en pavimentos.Contaminación por óxidos de nitrógenoAgregadosGranulometríaAsfaltoParámetros volumétricos	Aplicada: Se está buscando abordar un problema específico y práctico, que es mejorar las propiedades fotocatalíticas y mecánicas de una mezcla asfáltica, y se busca obtener información útil y aplicable para resolver este problema.	La población de la investigación está constituida por todas las mezclas asfálticas en caliente elaboradas según el diseño Marshall, con adición de TiO ₂ como filler en distintos porcentajes dentro del rango permitido. Dada la amplia variedad de dosificaciones posibles, esta población es conceptual y no cuantificable en su totalidad, ya que sería poco práctico fabricar y ensayar todas las combinaciones posibles para evaluar sus propiedades mecánicas y fotocatalíticas.
Problemas específicos.	Objetivos específicos.	Hipótesis específicas.	Variable dependiente.	Variable dependiente	Nivel de investigación.	
PE-1: ¿Cómo varían la estabilidad y flujo de una mezcla asfáltica en caliente por la adición de dióxido de titanio en la carpeta de un pavimento flexible en la ciudad de Cusco?	OE-1: Determinar la estabilidad y flujo de una mezcla asfáltica en caliente con adición de dióxido de titanio en la carpeta de un pavimento flexible en la ciudad de Cusco.	HE-1: La estabilidad y flujo de una mezcla asfáltica en caliente se mejora por la adición de dióxido de titanio en la carpeta de un pavimento flexible en la ciudad de Cusco.	Propiedades fotocatalíticas	<ul style="list-style-type: none">Norma UNI 11259:2016 "Determinación de la actividad fotocatalítica de las aglutinantes hidráulico – método de prueba de Rodamina".Norma ISO 22197 – 1:2016 "Método de ensayo para el rendimiento de purificación del aire de materiales fotocatalíticos semiconductores – parte 1: Eliminación de óxido nítrico (NO)".	Explicativo: La investigación busca explicar cómo la adición del dióxido de titanio en distintas proporciones afecta tanto las propiedades fotocatalíticas como las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas. Por tanto, nuestro objetivo es explicar los efectos de una variable independiente (TiO2) sobre múltiples variables dependientes (propiedades fotocatalíticas y mecánicas).	Muestra La muestra de la investigación está constituida por las mezclas asfálticas en caliente con cinco niveles de adición de TiO ₂ (0%, 2%, 4%, 6% y 8%), considerando cada porcentaje como una muestra conceptual. Para asegurar la confiabilidad de los resultados, se fabricaron tres probetas por nivel como réplicas técnicas para los ensayos de propiedades fotocatalíticas (autolimpieza y purificación del aire) y mecánicas (estabilidad, flujo, módulo resiliente y tensión). En total se elaboraron 63 probetas físicas, correspondientes a 11 muestras conceptuales, incluyendo la primera etapa (fotocatalítica y Marshall) y la segunda etapa (módulo resiliente y tensión), mientras que las probetas adicionales para determinar el porcentaje óptimo de asfalto no se consideran parte de la muestra.
PE-2: ¿Cuál es el módulo resiliente de una mezcla asfáltica en caliente con adición de dióxido de titanio en la carpeta de un pavimento flexible en la ciudad de Cusco?	OE-2: Analizar el módulo resiliente de una mezcla asfáltica en caliente con adición de dióxido de titanio en la carpeta de un pavimento flexible en la ciudad de Cusco.	HE-2: El módulo resiliente de una mezcla asfáltica en caliente se incrementa por la adición de dióxido de titanio en la carpeta de un pavimento flexible en la ciudad de Cusco.				
PE-3: ¿Cuál es la resistencia a la tensión de una mezcla asfáltica en caliente con adición de dióxido de titanio en la carpeta de un pavimento flexible en la ciudad de Cusco?	OE-3: Medir la resistencia a la tensión de una mezcla asfáltica en caliente con adición de dióxido de titanio en la carpeta de un pavimento flexible en la ciudad de Cusco.	HE-3: La tensión de una mezcla asfáltica en caliente se favorece por la adición de dióxido de titanio en la carpeta de un pavimento flexible en la ciudad de Cusco.			Diseño de investigación.	
PE-4: ¿Cuál es el nivel de autolimpieza de una mezcla asfáltica en caliente con adición de dióxido de titanio en la carpeta de un pavimento flexible en la ciudad de Cusco?	OE-4: Mejorar la eficiencia de autolimpieza de una mezcla asfáltica en caliente con adición de dióxido de titanio en la carpeta de un pavimento flexible en la ciudad de Cusco.	HE-4: La autolimpieza de una mezcla asfáltica en caliente se mejora por la adición de dióxido de titanio en la carpeta de un pavimento flexible en la ciudad de Cusco.	Propiedades mecánicas	<ul style="list-style-type: none">Norma Técnica MTC E504 "Resistencia de mezclas bituminosas empleando el aparato Marshall".Norma AASTHO TP31 "Método estándar para determinar el módulo resiliente de mezclas bituminosas mediante tensión indirecta".Norma AASTHO T283 "Método estándar de ensayo para la resistencia de mezclas asfálticas compactadas (HMA) al daño inducido por humedad.	Cuasi - experimental: La investigación manipula la adición de dióxido de titanio en mezclas asfálticas para evaluar su efecto sobre propiedades fotocatalíticas (autolimpieza y purificación del aire) y mecánicas (estabilidad, flujo, módulo resiliente y tensión), elaborando probetas con porcentajes controlados que permiten establecer relaciones de causa-efecto aproximadas.	
PE-5: ¿Cuál es la capacidad de purificación del aire de una mezcla asfáltica en caliente con adición de dióxido de titanio en la carpeta de un pavimento flexible en la ciudad de Cusco?	OE-5: Verificar la capacidad de purificación del aire de una mezcla asfáltica en caliente con adición de dióxido de titanio en la carpeta de un pavimento flexible en la ciudad de Cusco.	HE-5: La capacidad de purificación del aire de una mezcla asfáltica en caliente se comprueba con la adición de dióxido de titanio en la carpeta de un pavimento flexible en la ciudad de Cusco.				

Anexo 02. Resultados de ensayo módulo resiliente laboratorio TDM Asfaltos



EXPEDIENTE M.R. / LMA

116A-2025-LAB TDM ASFALTOS

METODO DE PRUEBA ESTANDAR PARA DETERMINAR EL MODULO RESILIENTE DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS POR TENSION INDIRECTA

AASHTO TP-31

PROYECTO : "EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FOTOCATALÍTICAS Y MECÁNICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CON ADICIÓN DEL DIOXÍDO DE TITANIO PARA CARPETAS ASFÁLTICAS DE PAVIMENTOS FLEXIBLES, CUSCO-2022"
 UBICACIÓN : DEPARTAMENTO DE CUSCO, PROVINCIA CUSCO, DISTRITO CUSCO
 SOLICITANTE : TESIS "UNIVERSIDAD NACIONAL SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO"
 REFERENCIA : PROPORCIONES DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE ENVIADO POR EL SOLICITANTE
 F. DE RECEPCIÓN : 28/08/2025

INFORMACIÓN DE LAS MUESTRAS O ESPECIMENES DE ENSAYO

CANTERA : CANT. MORRO BLANCO - COMBAPATA
 DESCRIPCIÓN : PIEDRA CHANCADA 37.6% - ARENA CHANCADA 37.6% - ARENA ZARANDADA 18.75%
 FILLER (%) :
 BITUMEN : ASFALTO SÓLIDO PEN 120/150
 TIPO DE COMPACTACIÓN : COMPACT. MARSHALL
 CONTENIDO DE ASFALTO : 6.05 %

DIMENSIONES DEL ESPECIMEN

DIÁMETRO : 101.9 mm
 ALTO : 62.5 mm
 ÁREA TRANSVERSAL : 8155.3 mm²

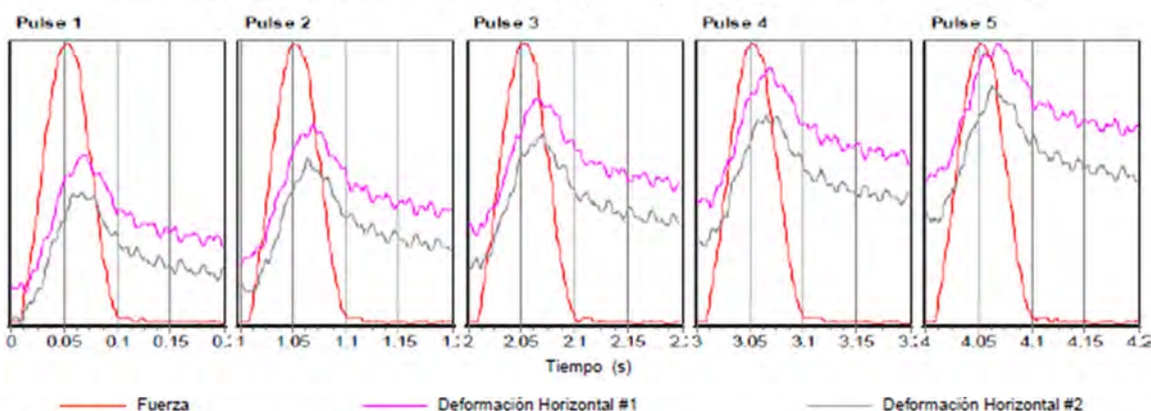
PARÁMETROS INICIALES DE LA PRUEBA

TEMPERATURA A ALCANZAR : 20 (°C)
 FORMA DE ONDA : SINUSOIDAL
 ANCHO DE PULSO DE LA CARGA : 100 (ms)
 PERÍODO DE DESCANSO : 900 (ms)
 PERÍODO DE REPETICIÓN DE PULSO : 1000 (ms)
 NÚMERO DE PULSOS DE ACONDICIONAMIENTO : 5
 CARGA DE CONTACTO : 174 (N)
 CARGA CÍCLICA : 1568 (N)
 COEFICIENTE DE POISSON ESTIMADO : 0.35
 TIEMPO DE ACONDICIONAMIENTO A 20°C : 4 horas

RESULTADOS FINALES

FECHA Y HORA DE INICIO : lunes septiembre 8 2025 at 16:10
 PULSOS DE ACONDICIONAMIENTO : 5
 TEMPERATURA DEL NÚCLEO : 20.5 (°C)
 TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE : 20.1 (°C)

RESULTADOS DEL ENSAYO	PULSO 1	PULSO 2	PULSO 3	PULSO 4	PULSO 5	MEDIA	DESV. STAND.	% CV
MÓDULO RESILIENTE (Mpa)	4872	4627	4695	4640	4530	4673	112.91	2.42
FUERZA DE CARGA PICO (N)	1530	1531	1532	1532	1533	1531	1.14	0.07
FUERZA DE ASENTAMIENTO	176	173	173	176	174	174	1.45	0.83
DEFORMACIÓN TOTAL RECUPERABLE	3.12	3.28	3.24	3.28	3.36	3.26	0.08	2.44
DEFORMACIÓN HORIZONTAL RECUPERABLE #1 (µm)	1.55	1.61	1.61	1.69	1.59	1.61	0.05	2.96
DEFORMACIÓN HORIZONTAL RECUPERABLE #2 (µm)	1.57	1.67	1.63	1.58	1.77	1.65	0.07	4.34



MÉTODOS DE ENSAYO

- AASHTO TP 31 - 96 STANDARD TEST METHOD FOR DETERMINING THE RESILIENT MODULUS OF BITUMINOUS MIXTURES BY INDIRECT TENSION
- AASHTO T245 RESISTANCE TO PLASTIC FLOW OF BITUMINOUS MIXTURE USING MARSHALL APPARATUS
- AASHTO T283 RESISTANCE OF COMPACTED BITUMINOUS MIXTURE TO MOISTURE DAMAGE
- AASHTO T 312 PREPARING AND DETERMINING THE DENSITY OF ASPHALT MIXTURE SPECIMENS BY MEANS OF THE SUPERPAVE GYRATORY COMPACTOR

Rommel Vasquez Z.
 Laboratorista

Wendy Herencia
 Jefe del Área Técnica

Fecha de reporte : Lima, 09 de Setiembre del 2025



EXPEDIENTE M.R. / LMA
1108-2024-LAB TDM ASFALTOS

METODO DE PRUEBA ESTANDAR PARA DETERMINAR EL MODULO RESILIENTE DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS POR TENSION INDIRECTA

AASHTO TP-31

PROYECTO : "EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FOTOCATALÍTICAS Y MECANICAS DE UNA MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE CON ADICIÓN DEL DIOXIDO DE TITANIO PARA CARPETAS ASFALTICAS DE PAVIMENTOS FLEXIBLES, CUSCO-2022"
UBICACIÓN : DEPARTAMENTO DE CUSCO, PROVINCIA CUSCO, DISTRITO CUSCO
SOLICITANTE : TESIS "UNIVERSIDAD NACIONAL SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO"
REFERENCIA : PROPORCIONES DE MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE ENVIADO POR EL SOLICITANTE
F. DE RECEPCIÓN : 28/08/2025

INFORMACIÓN DE LAS MUESTRAS O ESPECIMENES DE ENSAYO

CANTERA : CANT. MORRO BLANCO - COMBAPATA
DESCRIPCIÓN : PIEDRA CHANCADA 37.6% - ARENA CHANCADA 37.6% - ARENA ZARANDADA 18.75%
FILLER (%) :
BITUMEN : ASFALTO SOLIDO PEN 120/150
TIPO DE COMPACTACIÓN : COMPACT. MARSHALL
CONTENIDO DE ASFALTO : 6.05 %

DIMENSIONES DEL ESPECIMEN

DIÁMETRO : 101.9 mm
ALTO : 62.8 mm
ÁREA TRANSVERSAL : 8155.3 mm²

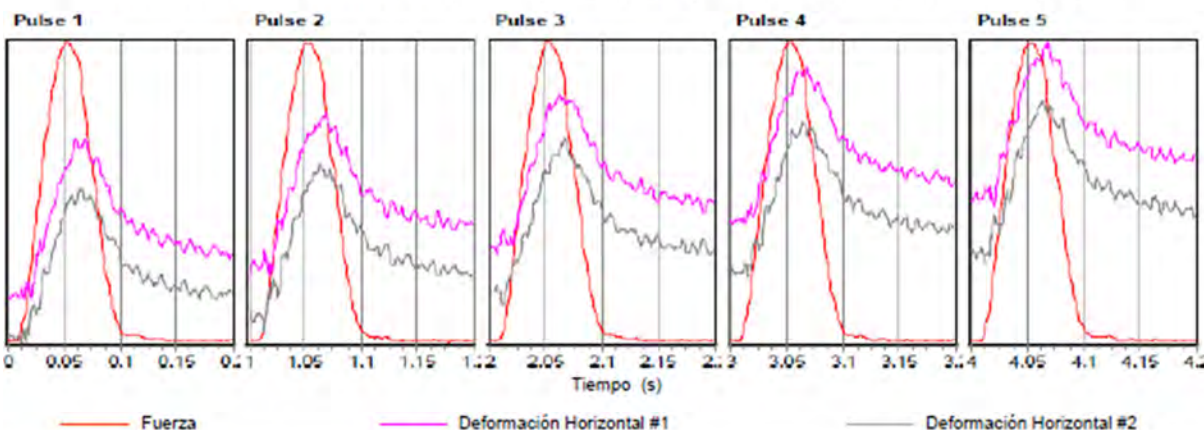
PARAMETROS INICIALES DE LA PRUEBA

TEMPERATURA A ALCANZAR : 20 (°C)
FORMA DE ONDA : SINUSOIDAL
ANCHO DE PULSO DE LA CARGA : 100 (ms)
PERIODO DE DESCANSO : 300 (ms)
PERIODO DE REPETICIÓN DE PULSO : 1000 (ms)
NÚMERO DE PULSOS DE ACONDICIONAMIENTO : 5
CARGA DE CONTACTO : 174 (N)
CARGA CÍCLICA : 1568 (N)
COEFICIENTE DE POISSON ESTIMADO : 0.35
TIEMPO DE ACONDICIONAMIENTO A 20°C : 4 horas

RESULTADOS FINALES

FECHA Y HORA DE INICIO : lunes septiembre 8 2025 at 16:31
PULSOS DE ACONDICIONAMIENTO : 5
TEMPERATURA DEL NÚCLEO : 20.4 (°C)
TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE : 20.1 (°C)

RESULTADOS DEL ENSAYO	PULSO 1	PULSO 2	PULSO 3	PULSO 4	PULSO 5	MEDIA	DEV. STAND.	% CV
MÓDULO RESILIENTE (Mpa)	4502	4747	4740	4738	4592	4744	98.11	2.07
FUERZA DE CARGA PICO (N)	1531	1521	1533	1532	1521	1527	5.31	0.35
FUERZA DE ASENTAMIENTO	172	177	172	172	177	174	2.45	1.41
DEFORMACIÓN TOTAL RECUPERABLE	2.52	2.57	2.59	2.59	2.64	2.58	0.04	1.50
DEFORMACIÓN HORIZONTAL RECUPERABLE #1 (µm)	1.32	1.33	1.24	1.34	1.36	1.32	0.04	3.04
DEFORMACIÓN HORIZONTAL RECUPERABLE #2 (µm)	1.20	1.24	1.35	1.25	1.28	1.26	0.05	3.87



MÉTODOS DE ENSAYO

- AASHTO TP 31 - 96 STANDARD TEST METHOD FOR DETERMINING THE RESILIENT MODULUS OF BITUMINOUS MIXTURES BY INDIRECT TENSION
- AASHTO T245 RESISTANCE TO PLASTIC FLOW OF BITUMINOUS MIXTURE USING MARSHALL APPARATUS
- AASHTO T293 RESISTANCE OF COMPACTED BITUMINOUS MIXTURE TO MOISTURE DAMAGE
- AASHTO T 312 PREPARING AND DETERMINING THE DENSITY OF ASPHALT MIXTURE SPECIMENS BY MEANS OF THE SUPERPAVE GYRATORY COMPACTOR

Rommel Vasquez Z.
Laboratorista

Wendy Herencia
Jefe del Área Técnica

Fecha de reporte : Lima, 09 de Setiembre del 2025



EXPEDIENTE M.R. / LMA

1100-2026-LAB TDM ASFALTOS

METODO DE PRUEBA ESTANDAR PARA DETERMINAR EL MODULO RESILIENTE DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS POR TENSION INDIRECTA

AASHTO TP-31

PROYECTO : "EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FOTOCATALÍTICAS Y MECÁNICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CON ADICIÓN DEL DÍOXIDO DE TITANIO PARA CARPETAS ASFÁLTICAS DE PAVIMENTOS FLEXIBLES, CUSCO-2022"
 UBICACIÓN : DEPARTAMENTO DE CUSCO, PROVINCIA CUSCO, DISTRITO CUSCO
 SOLICITANTE : TESIS "UNIVERSIDAD NACIONAL SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO"
 REFERENCIA : PROPORCIONES DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE ENVIADO POR EL SOLICITANTE

F. DE RECEPCIÓN : 28/08/2025

INFORMACIÓN DE LAS MUESTRAS O ESPECIMENES DE ENSAYO

CANTERA : CANT. MORRO BLANCO - COMBAPATA
 DESCRIPCIÓN : PIEDRA CHANCADA 37.6% - ARENA CHANCADA 37.6% - ARENA ZARANDADA 18.75%
 FILLER (%) :
 BITUMEN : ASFALTO SÓLIDO PEN 120/150

TIPO DE COMPACTACIÓN : COMPACT. MARSHALL
 CONTENIDO DE ASFALTO : 6.05 %

DIMENSIONES DEL ESPECIMEN

DIÁMETRO : 101.9 mm
 ALTO : 63.0 mm

ÁREA TRANSVERSAL : 8155.3 mm²

PARÁMETROS INICIALES DE LA PRUEBA

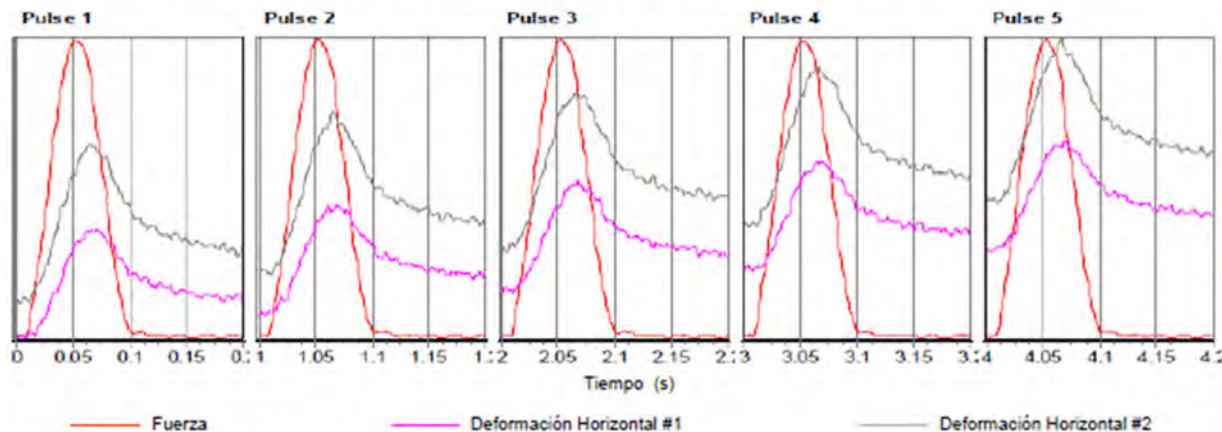
TEMPERATURA A ALCANZAR : 20 (°C)
 FORMA DE ONDA : SINUSOIDAL
 ANCHO DE PULSO DE LA CARGA : 100 (ms)
 PERÍODO DE DESCANSO : 900 (ms)
 PERÍODO DE REPETICIÓN DE PULSO : 1000 (ms)

NÚMERO DE PULSOS DE ACONDICIONAMIENTO : 5
 CARGA DE CONTACTO : 174 (N)
 CARGA CÍCLICA : 1568 (N)
 COEFICIENTE DE POISSON ESTIMADO : 0.35
 TIEMPO DE ACONDICIONAMIENTO A 20°C : 4 horas

RESULTADOS FINALES

FECHA Y HORA DE INICIO : lunes septiembre 8 2025 at 16:36
 PULSOS DE ACONDICIONAMIENTO : 5
 TEMPERATURA DEL NÚCLEO : 20.6 (°C)
 TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE : 20.2 (°C)

RESULTADOS DEL ENSAYO	PULSO 1	PULSO 2	PULSO 3	PULSO 4	PULSO 5	MEDIA	DESV. STAND.	% CV
MODULO RESILIENTE (Mpa)	4796	4631	4653	4526	4518	4625	101.28	2.19
FUERZA DE CARGA PICO (N)	1525	1533	1528	1522	1533	1528	4.35	0.28
FUERZA DE ASENTAMIENTO	175	172	175	175	171	174	1.84	1.06
DEFORMACIÓN TOTAL RECUPERABLE	3.13	3.26	3.23	3.31	3.34	3.25	0.07	2.24
DEFORMACIÓN HORIZONTAL RECUPERABLE #1 (µm)	1.21	1.25	1.32	1.27	1.27	1.27	0.04	2.87
DEFORMACIÓN HORIZONTAL RECUPERABLE #2 (µm)	1.92	2.01	1.91	2.04	2.07	1.99	0.06	3.21



MÉTODOS DE ENSAYO

- AASHTO TP 31 - 96 STANDARD TEST METHOD FOR DETERMINING THE RESILIENT MODULUS OF BITUMINOUS MIXTURES BY INDIRECT TENSION
- AASHTO T245 RESISTANCE TO PLASTIC FLOW OF BITUMINOUS MIXTURE USING MARSHALL APPARATUS
- AASHTO T283 RESISTANCE OF COMPACTED BITUMINOUS MIXTURE TO MOISTURE DAMAGE
- AASHTO T 312 PREPARING AND DETERMINING THE DENSITY OF ASPHALT MIXTURE SPECIMENS BY MEANS OF THE SUPERPAVE GYRATORY COMPACTOR

Rommel Vasquez Z.
 Laboratorista

Wendy Herencia
 Jefe del Área Técnica

Fecha de reporte : Lima, 09 de Setiembre del 2025



EXPEDIENTE M.R. / LMA

109A-2026-LAB TDM ASFALTOS

METODO DE PRUEBA ESTANDAR PARA DETERMINAR EL MODULO RESILIENTE DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS POR TENSION INDIRECTA

AASHTO TP-31

PROYECTO : "EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FOTOCATALÍTICAS Y MECÁNICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CON ADICIÓN DEL DÍOXIDO DE TITANIO PARA CARPETAS ASFÁLTICAS DE PAVIMENTOS FLEXIBLES, CUSCO-2022"
 UBICACIÓN : DEPARTAMENTO DE CUSCO, PROVINCIA CUSCO, DISTRITO CUSCO
 SOLICITANTE : TESIS "UNIVERSIDAD NACIONAL SAN ANTONIO ABAO DEL CUSCO"
 REFERENCIA : PROPORCIONES DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE ENVIADO POR EL SOLICITANTE
 F. DE RECEPCIÓN : 28/08/2025

INFORMACIÓN DE LAS MUESTRAS O ESPECIMENES DE ENSAYO

CANTERA : CANT. MORRO BLANCO - COMBAPATA
 DESCRIPCIÓN : PIEDRA CHANCADA 37.6% - ARENA CHANCADA 37.6% - ARENA ZARANDADA 16.75%
 FILLER (%) : 2% DIOXIDO DE TITANIO
 BITUMEN : ASFALTO SOLIDO PEN 120/150
 TIPO DE COMPACTACIÓN : COMPACT. MARSHALL
 CONTENIDO DE ASFALTO : 6.05 %

DIMENSIONES DEL ESPECIMEN

DIÁMETRO : 101.3 mm
 ALTO : 63.0 mm
 ÁREA TRANSVERSAL : 8155.3 mm²

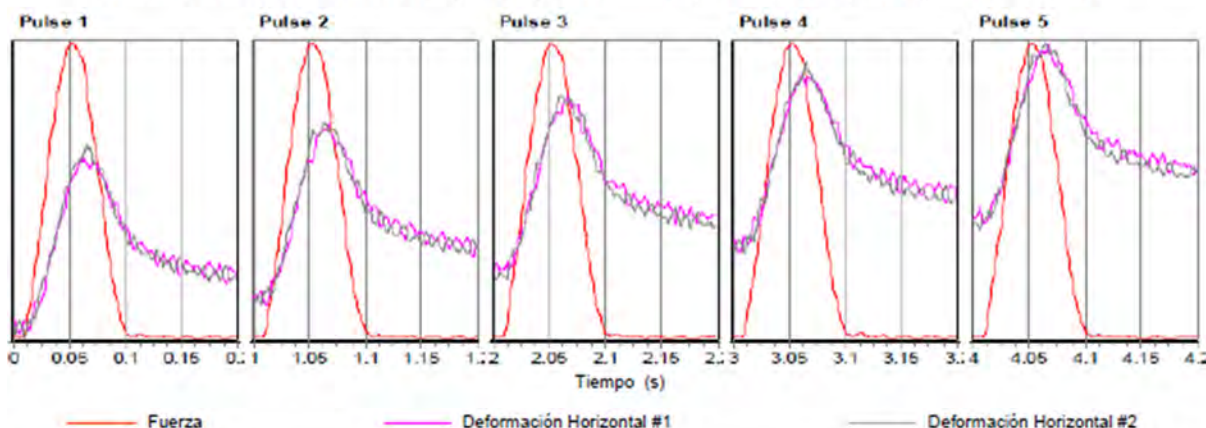
PARAMETROS INICIALES DE LA PRUEBA

TEMPERATURA A ALCANZAR : 20 (°C)
 FORMA DE ONDA : SINUSOIDAL
 ANCHO DE PULSO DE LA CARGA : 100 (ms)
 PERIODO DE DESCANSO : 900 (ms)
 PERIODO DE REPETICIÓN DE PULSO : 1000 (ms)
 NÚMERO DE PULSOS DE ACONDICIONAMIENTO : 5
 CARGA DE CONTACTO : 192 (N)
 CARGA CÍCLICA : 1728 (N)
 COEFICIENTE DE POISSON ESTIMADO : 0.35
 TIEMPO DE ACONDICIONAMIENTO A 20°C : 4 horas

RESULTADOS FINALES

FECHA Y HORA DE INICIO : lunes septiembre 8 2025 at 16:41
 PULSOS DE ACONDICIONAMIENTO : 5
 TEMPERATURA DEL NÚCLEO : 20.2 (°C)
 TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE : 19.7 (°C)

RESULTADOS DEL ENSAYO	PULSO 1	PULSO 2	PULSO 3	PULSO 4	PULSO 5	MEDIA	DESV. STAND.	% CV
MÓDULO RESILIENTE (Mpa)	5522	5455	5363	5367	5246	5390	93.50	1.73
FUERZA DE CARGA PICO (N)	1692	1689	1682	1686	1688	1687	3.49	0.21
FUERZA DE ASENTAMIENTO	191	192	192	191	193	192	1.03	0.54
DEFORMACIÓN TOTAL RECUPERABLE	3.02	3.05	3.09	3.09	3.17	3.08	0.05	1.64
DEFORMACIÓN HORIZONTAL RECUPERABLE #1 (µm)	1.40	1.56	1.50	1.40	1.60	1.49	0.08	5.35
DEFORMACIÓN HORIZONTAL RECUPERABLE #2 (µm)	1.62	1.49	1.58	1.69	1.57	1.59	0.07	4.13



MÉTODOS DE ENSAYO

- AASHTO TP 31 - 96 STANDARD TEST METHOD FOR DETERMINING THE RESILIENT MODULUS OF BITUMINOUS MIXTURES BY INDIRECT TENSION
- AASHTO T245 RESISTANCE TO PLASTIC FLOW OF BITUMINOUS MIXTURE USING MARSHALL APPARATUS
- AASHTO T283 RESISTANCE OF COMPACTED BITUMINOUS MIXTURE TO MOISTURE DAMAGE
- AASHTO T 312 PREPARING AND DETERMINING THE DENSITY OF ASPHALT MIXTURE SPECIMENS BY MEANS OF THE SUPERPAVE GYRATORY COMPACTOR

Rommel Vasquez Z.
 Laboratorio

Wendy Herencia
 Jefe del Área Técnica

Fecha de reporte : Lima, 09 de Setiembre del 2025



EXPEDIENTE M.R. / LMA
1090-2024-LAB TDM ASFALTOS

METODO DE PRUEBA ESTANDAR PARA DETERMINAR EL MODULO RESILIENTE DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS POR TENSION INDIRECTA

AASHTO TP-31

PROYECTO : "EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FOTOCATALÍTICAS Y MECÁNICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CON ADICIÓN DEL DIOXÍDO DE TITANIO PARA CARPETAS ASFÁLTICAS DE PAVIMENTOS FLEXIBLES, CUSCO-2022"
UBICACIÓN : DEPARTAMENTO DE CUSCO, PROVINCIA CUSCO, DISTRITO CUSCO
SOLICITANTE : TESIS "UNIVERSIDAD NACIONAL SAN ANTONIO ABAO DEL CUSCO"
REFERENCIA : PROPORCIONES DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE ENVIADO POR EL SOLICITANTE
F. DE RECEPCIÓN : 28/08/2025

INFORMACIÓN DE LAS MUESTRAS O ESPECIMENES DE ENSAYO

CANTERA : CANT. MORRO BLANCO - COMBAPATA
DESCRIPCIÓN : PIEDRA CHANCADA 37.6% - ARENA CHANCADA 37.6% - ARENA ZARANDADA 16.75%
FILLER (%) : 2% DIOXÍDO DE TITANIO
BITUMEN : ASFALTO SÓLIDO PÉN 120/150
TIPO DE COMPACTACIÓN : COMPACT. MARSHALL
CONTENIDO DE ASFALTO : 6.05 %

DIMENSIONES DEL ESPECIMEN

DIÁMETRO : 101.9 mm
ALTO : 64.1 mm
ÁREA TRANSVERSAL : 8155.3 mm²

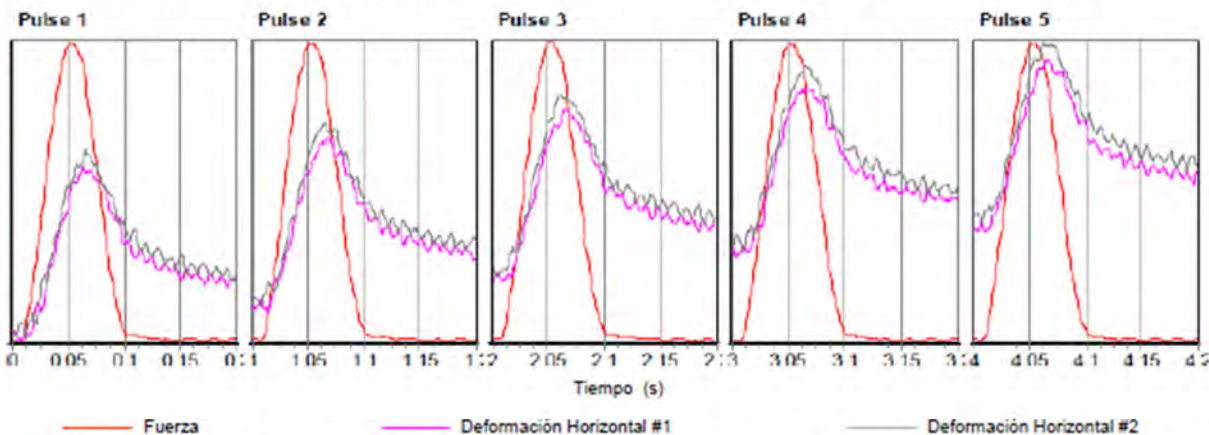
PARAMETROS INICIALES DE LA PRUEBA

TEMPERATURA A ALCANZAR : 20 (°C)
FORMA DE ONDA : SINUSOIDAL
ANCHO DE PULSO DE LA CARGA : 100 (ms)
PERIODO DE DESCANSO : 900 (ms)
PERIODO DE REPETICIÓN DE PULSO : 1000 (ms)
NÚMERO DE PULSOS DE ACONDICIONAMIENTO : 5
CARGA DE CONTACTO : 192 (N)
CARGA CÍCLICA : 1728 (N)
COEFICIENTE DE POISSON ESTIMADO : 0.35
TIEMPO DE ACONDICIONAMIENTO A 20°C : 4 horas

RESULTADOS FINALES

FECHA Y HORA DE INICIO : lunes septiembre 8 2025 at 16:45
PULSOS DE ACONDICIONAMIENTO : 5
TEMPERATURA DEL NÚCLEO : 20.3 (°C)
TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE : 20.0 (°C)

RESULTADOS DEL ENSAYO	PULSO 1	PULSO 2	PULSO 3	PULSO 4	PULSO 5	MEDIA	DESV. STAND.	% CV
MÓDULO RESILIENTE (Mpa)	5230	5261	5237	5216	5143	5218	39.95	0.77
FUERZA DE CARGA PICO (N)	1679	1676	1683	1680	1676	1679	2.57	0.15
FUERZA DE ASENTAMIENTO	191	194	192	191	193	192	1.14	0.59
DEFORMACIÓN TOTAL RECUPERABLE	3.29	3.27	3.30	3.31	3.35	3.30	0.03	0.78
DEFORMACIÓN HORIZONTAL RECUPERABLE #1 (µm)	1.52	1.60	1.60	1.49	1.68	1.58	0.07	4.25
DEFORMACIÓN HORIZONTAL RECUPERABLE #2 (µm)	1.78	1.66	1.69	1.81	1.67	1.72	0.06	3.49



MÉTODOS DE ENSAYO

- AASHTO TP 31 - 95 STANDARD TEST METHOD FOR DETERMINING THE RESILIENT MODULUS OF BITUMINOUS MIXTURES BY INDIRECT TENSION
- AASHTO T245 RESISTANCE TO PLASTIC FLOW OF BITUMINOUS MIXTURE USING MARSHALL APPARATUS
- AASHTO T283 RESISTANCE OF COMPACTED BITUMINOUS MIXTURE TO MOISTURE DAMAGE
- AASHTO T 312 PREPARING AND DETERMINING THE DENSITY OF ASPHALT MIXTURE SPECIMENS BY MEANS OF THE SUPERPAVE GYRATORY COMPACTOR

Rommel Vazquez Z.
Laboratorista

Wendy Herencia
Jefe del Área Técnica

Fecha de reporte : Lima, 09 de Setiembre del 2025



EXPEDIENTE M.R. / LMA

109C-2025-LAB TDM ASFALTOS

METODO DE PRUEBA ESTANDAR PARA DETERMINAR EL MODULO RESILIENTE DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS POR TENSION INDIRECTA

AASHTO TP-31

PROYECTO : "EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FOTOCATALÍTICAS Y MECÁNICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CON ADICIÓN DEL DÍOXIDO DE TITANIO PARA CARPETAS ASFÁLTICAS DE PAVIMENTOS FLEXIBLES, CUSCO-2022"
 UBICACIÓN : DEPARTAMENTO DE CUSCO, PROVINCIA CUSCO, DISTRITO CUSCO
 SOLICITANTE : TESIS "UNIVERSIDAD NACIONAL SAN ANTONIO ABAO DEL CUSCO"
 REFERENCIA : PROPORCIONES DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE ENVIADO POR EL SOLICITANTE

F. DE RECEPCIÓN : 28/08/2025

INFORMACIÓN DE LAS MUESTRAS O ESPECÍMENES DE ENSAYO

CANTERA : CANT. MORRO BLANCO - COMBAPATA
 DESCRIPCIÓN : PIEDRA CHANCADA 37.6% - ARENA CHANCADA 37.6% - ARENA ZARANDADA 16.75%
 FILLER (%) : 2% DÍOXIDO DE TITANIO
 BITUMEN : ASFALTO SÓLIDO PEN 120/150

TIPO DE COMPACTACIÓN : COMPACT. MARSHALL
 CONTENIDO DE ASFALTO : 6.05 %

DIMENSIONES DEL ESPECÍMEN

DIÁMETRO : 101.9 mm
 ALTO : 62.9 mm

ÁREA TRANSVERSAL : 8155.3 mm²

PARÁMETROS INICIALES DE LA PRUEBA

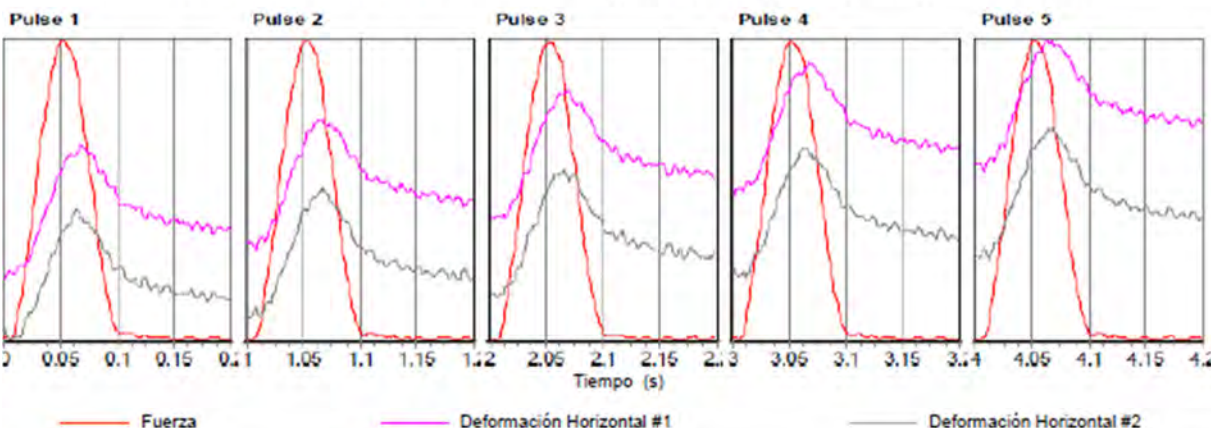
TEMPERATURA A ALCANZAR : 20 (°C)
 FORMA DE ONDA : SINUSOIDAL
 ANCHO DE PULSO DE LA CARGA : 100 (ms)
 PERÍODO DE DESCANSO : 900 (ms)
 PERÍODO DE REPETICIÓN DE PULSO : 1000 (ms)

NÚMERO DE PULSOS DE ACONDICIONAMIENTO : 5
 CARGA DE CONTACTO : 192 (N)
 CARGA CÍCLICA : 1728 (N)
 COEFICIENTE DE POISSON ESTIMADO : 0.35
 TIEMPO DE ACONDICIONAMIENTO A 20°C : 4 horas

RESULTADOS FINALES

FECHA Y HORA DE INICIO : lunes septiembre 8 2025 at 16:50
 PULSOS DE ACONDICIONAMIENTO : 5
 TEMPERATURA DEL NÚCLEO : 20.4 (°C)
 TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE : 20.1 (°C)

RESULTADOS DEL ENSAYO	PULSO 1	PULSO 2	PULSO 3	PULSO 4	PULSO 5	MEDIA	DEV. STAND.	% CV
MODULO RESILIENTE (Mpa)	5344	5418	5331	5208	5316	5323	67.52	1.27
FUERZA DE CARGA PICO (N)	1685	1682	1680	1677	1686	1682	3.16	0.19
FUERZA DE ASENTAMIENTO	194	190	192	194	191	192	1.75	0.91
DEFORMACIÓN TOTAL RECUPERABLE	3.11	3.06	3.11	3.18	3.13	3.12	0.04	1.19
DEFORMACIÓN HORIZONTAL RECUPERABLE #1 (µm)	1.51	1.46	1.52	1.54	1.50	1.51	0.03	1.79
DEFORMACIÓN HORIZONTAL RECUPERABLE #2 (µm)	1.60	1.60	1.59	1.63	1.63	1.61	0.02	1.11



MÉTODOS DE ENSAYO

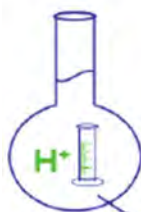
- AASHTO TP 31 - 96 STANDARD TEST METHOD FOR DETERMINING THE RESILIENT MODULUS OF BITUMINOUS MIXTURES BY INDIRECT TENSION
- AASHTO T245 RESISTANCE TO PLASTIC FLOW OF BITUMINOUS MIXTURE USING MARSHALL APPARATUS
- AASHTO T283 RESISTANCE OF COMPACTED BITUMINOUS MIXTURE TO MOISTURE DAMAGE
- AASHTO T 312 PREPARING AND DETERMINING THE DENSITY OF ASPHALT MIXTURE SPECIMENS BY MEANS OF THE SUPERPAVE GYRATORY COMPACTOR

Rommel Vasquez Z.
 Laboratorista

Wendy Herencia
 Jefe del Área Técnica

Fecha de reporte : Lima, 09 de Setiembre del 2025

Anexo 03. Reporte de ensayo de autolimpieza laboratorio QUIMICALAB



MC QUIMICALAB

De: Ing. Gury Manuel Cumpa Gutiérrez
LABORATORIO DE CIENCIAS NATURALES
AGUAS, SUELOS, MINERALES Y MEDIO AMBIENTE
 RUC N° 10465897711 - COVIDUC A4 - SAN SEBASTIÁN Cel: 946887776

INFORME N° LQ 0211-25
ANÁLISIS QUÍMICO DE RODAMINA

SOLICITA :

- ALEJANDRO MARCIAL AGUILAR ZAMBRANO.
- JOSE PANTOJA OLAVE.

PROYECTO : "EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FOTOCATALÍTICAS Y MECÁNICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CON ADICIÓN DEL DIÓXIDO DE TITANIO PARA CARPETAS ASFÁLTICAS DE PAVIMENTOS FLEXIBLES, CUSCO - 2022"

MUESTRAS :

- M₀**.- Concentración de Rodamina Inicial.
M₁.- 0% de TiO₂ – B1.
M₂.- 0% de TiO₂ – B2.
M₃.- 0% de TiO₂ – B3.
M₄.- 2% de TiO₂ – B1.
M₅.- 2% de TiO₂ – B2.
M₆.- 2% de TiO₂ – B3.
M₇.- 4% de TiO₂ – B1.
M₈.- 4% de TiO₂ – B2.
M₉.- 4% de TiO₂ – B3.
M₁₀.- 6% de TiO₂ – B1.
M₁₁.- 6% de TiO₂ – B2.
M₁₂.- 6% de TiO₂ – B3.
M₁₃.- 8% de TiO₂ – B1.
M₁₄.- 8% de TiO₂ – B2.
M₁₅.- 8% de TiO₂ – B3.

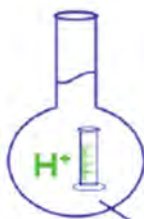
DISTRITO : SAN SEBASTIAN.
PROVINCIA : CUSCO.
DEPARTAMENTO : CUSCO.
FECHA DE INFORME : 17/07/25

RESULTADOS:

DETERMINACIONES	M ₀
Absorbancia (A)	1.401

COLEGIO DE INGENIEROS DEL PERÚ
 CONSEJO DEPARTAMENTAL CUSCO

 Ing. Gury Manuel Cumpa Gutiérrez
 INGENIERO QUÍMICO
 CIP 234338



MC QUIMICALAB

De: Ing. Gury Manuel Cumpa Gutiérrez
 LABORATORIO DE CIENCIAS NATURALES
 AGUAS, SUELOS, MINERALES Y MEDIO AMBIENTE
 RUC N° 10465897711 - COVIDUC A4 - SAN SEBASTIÁN Cel: 946887776

RESULTADOS:

DETERMINACIONES	PRUEBA	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆
Absorbancia (A)	4 hrs	1.263	1.247	1.235	1.111	1.106	1.132
	26 hrs	0.837	0.832	0.833	0.384	0.386	0.388

DETERMINACIONES	PRUEBA	M ₇	M ₈	M ₉	M ₁₀	M ₁₁	M ₁₂
Absorbancia (A)	4 hrs	0.922	0.914	0.895	0.814	0.805	0.819
	26 hrs	0.154	0.137	0.149	0.083	0.062	0.071

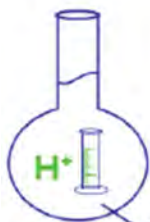
DETERMINACIONES	PRUEBA	M ₁₃	M ₁₄	M ₁₅
Absorbancia (A)	4 hrs	0.701	0.683	0.712
	26 hrs	0.031	0.024	0.039

MÉTODO DE ANÁLISIS: Espectrofotometría.

NOTA: Longitud de onda = 554 nm.


 COLEGIO DE INGENIEROS DEL PERÚ
 CONSEJO DEPARTAMENTAL CUSCO
 Ing. Gury Manuel Cumpa Gutiérrez
 INGENIERO QUÍMICO
 CIP 238338

Anexo 04. Reporte de ensayo purificación de aire laboratorio QUIMICALAB



MC QUIMICALAB

De: Ing. Gury Manuel Cumpa Gutiérrez
LABORATORIO DE CIENCIAS NATURALES
AGUAS, SUELOS, MINERALES Y MEDIO AMBIENTE
 RUC N° 10465897711 - COVIDUC A4 - SAN SEBASTIÁN Cel: 946887776

INFORME N°LQ 0210-25 **ANÁLISIS QUÍMICO DE GASES**

SOLICITA

- ALEJANDRO MARCIAL AGUILAR ZAMBRANO.
- JOSE PANTOJA OLAVE.

PROYECTO : "EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FOTOCATALÍTICAS Y MECÁNICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CON ADICIÓN DEL DIÓXIDO DE TITANIO PARA CARPETAS ASFÁLTICAS DE PAVIMENTOS FLEXIBLES, CUSCO - 2022"

MUESTRAS

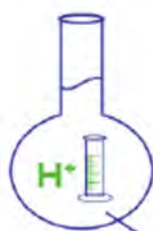
- M₁- 0% de TiO₂ – B1.
- M₂- 0% de TiO₂ – B2.
- M₃- 0% de TiO₂ – B3.
- M₄- 2% de TiO₂ – B1.
- M₅- 2% de TiO₂ – B2.
- M₆- 2% de TiO₂ – B3.
- M₇- 4% de TiO₂ – B1.
- M₈- 4% de TiO₂ – B2.
- M₉- 4% de TiO₂ – B3.
- M₁₀- 6% de TiO₂ – B1.
- M₁₁- 6% de TiO₂ – B2.
- M₁₂- 6% de TiO₂ – B3.
- M₁₃- 8% de TiO₂ – B1.
- M₁₄- 8% de TiO₂ – B2.
- M₁₅- 8% de TiO₂ – B3.

DISTRITO : SAN SEBASTIAN.
PROVINCIA : CUSCO.
DEPARTAMENTO : CUSCO.
FECHA DE INFORME : 16/07/25

RESULTADOS:

Tiempo de exposición : 1 Hora

DETERMINACIONES	UNIDAD	PRUEBA	M ₁	M ₂	M ₃
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	ppm	Inicial	8.619	8.617	8.618
		Final	8.611	8.608	8.612



MC QUIMICALAB

De: Ing. Gury Manuel Cumpa Gutiérrez
 LABORATORIO DE CIENCIAS NATURALES
 AGUAS, SUELOS, MINERALES Y MEDIO AMBIENTE
 RUC N° 10465897711 - COVIDUC A4 - SAN SEBASTIÁN Cel: 946887776

RESULTADOS:

Tiempo de exposición : 1 Hora

DETERMINACIONES	UNIDAD	PRUEBA	M ₄	M ₅	M ₆
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	ppm	Inicial	8.615	8.617	8.614
		Final	6.014	6.010	6.016

DETERMINACIONES	UNIDAD	PRUEBA	M ₇	M ₈	M ₉
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	ppm	Inicial	8.613	8.615	8.617
		Final	5.274	5.278	5.273

DETERMINACIONES	UNIDAD	PRUEBA	M ₁₀	M ₁₁	M ₁₂
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	ppm	Inicial	8.617	8.614	8.616
		Final	4.572	4.570	4.575

DETERMINACIONES	UNIDAD	PRUEBA	M ₁₃	M ₁₄	M ₁₅
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	ppm	Inicial	8.618	8.619	8.621
		Final	3.761	3.758	3.766

MÉTODO DE ANÁLISIS: Electroquímico (Método equivalente – Método automático) – Aeroqual S300.

COLEGIO DE INGENIEROS DEL PERU
 CONSEJO DEPARTAMENTAL CUSCO

 Ing. Gury Manuel Cumpa Gutiérrez
 INGENIERO QUIMICO
 CIP 238336

Anexo 05. Panel fotográfico

FIGURA NRO. 1: Recolección de agregado fino de COMBAPATA, donación de la planta de asfalto Caicay



FIGURA NRO. 2: Laboratorio de diseño de Mezclas en planta de asfalto Caicay



FIGURA NRO. 3: Granulometría del agregado grueso cantera morro blanco



FIGURA NRO. 4: Cuarteo del agregado grueso cantera morro blanco



FIGURA NRO. 5: Granulometría y tamizado agregado fino



FIGURA NRO. 6: Peso específico y absorción agregado grueso

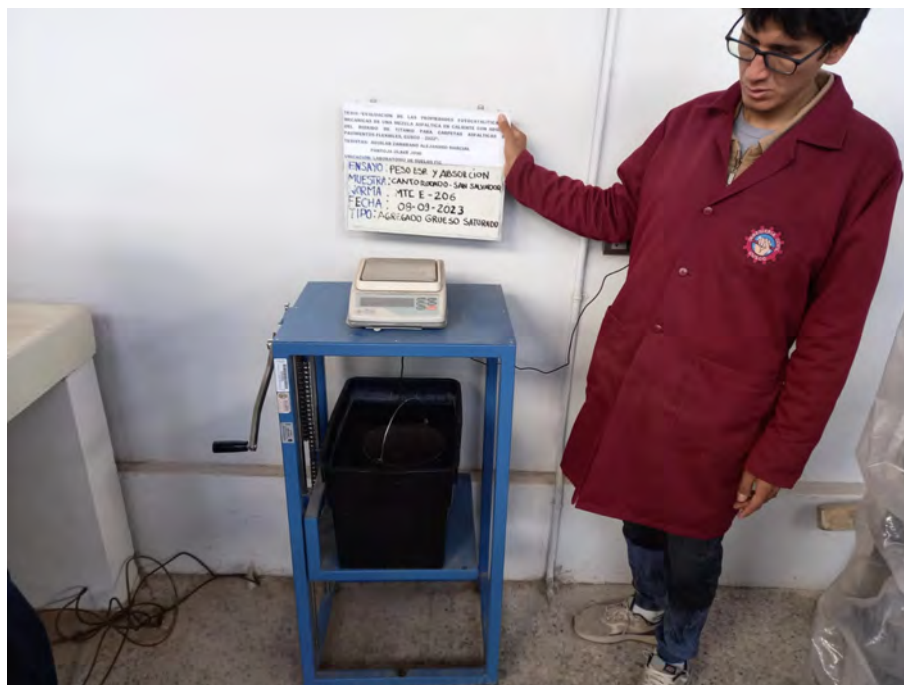


FIGURA NRO. 7: Ensayo de partículas chatas y alargadas agregado grueso



FIGURA NRO. 8: Ensayo partículas chatas y alargadas agregado grueso

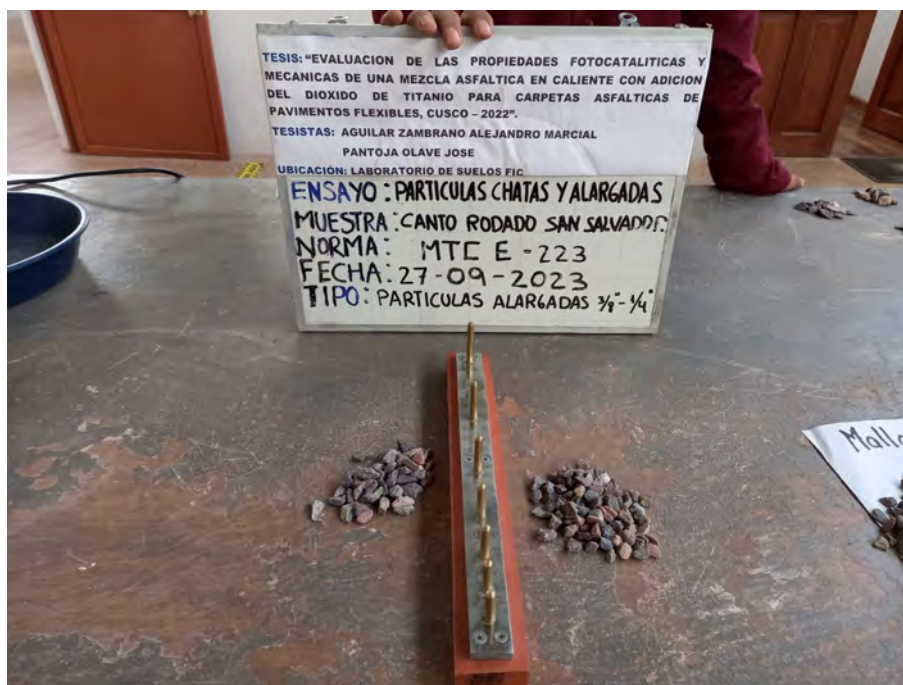


FIGURA NRO. 9: Ensayo equivalente de arena agregado grueso

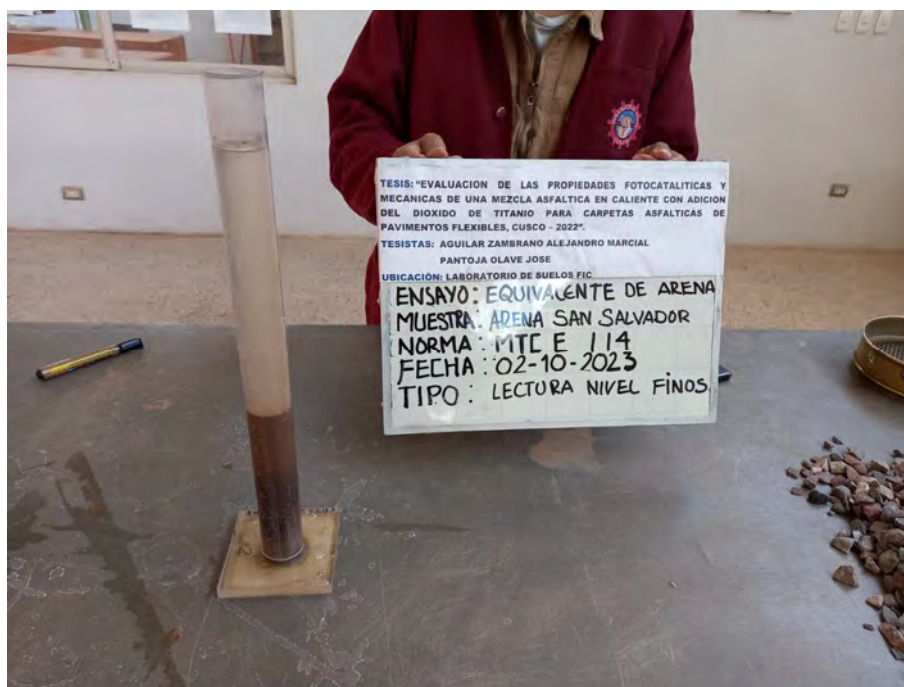


FIGURA NRO. 10: Ensayo de abrasión de los ángeles al agregado grueso



FIGURA NRO. 11: Ensayo de equivalente de arena agregado fino



FIGURA NRO. 12: Alfalto PEN120/150 usado en la presente investigacion



FIGURA NRO. 13: Tamizado del agregado para el fraccionamiento en el ensayo Marshall



FIGURA NRO. 14: Tamizado para fraccionamiento de agregado segun indica la norma



FIGURA NRO. 15: Calentamiento de materiales y equipos de compactación Marshall



FIGURA NRO. 16: Produccion de mezcla asfaltica por el metodo marshall



FIGURA NRO. 17: Medicion de temperatura de mezclado para fabricacion de briquetas



FIGURA NRO. 18: Equipo de compactacion Marshall



FIGURA NRO. 19: Recolección de datos de briquetas ensayadas



FIGURA NRO. 20: Acondicionamiento de las briquetas para su rotura en la prensa Marshall



FIGURA NRO. 21: Equipo para la realización del ensayo Rice

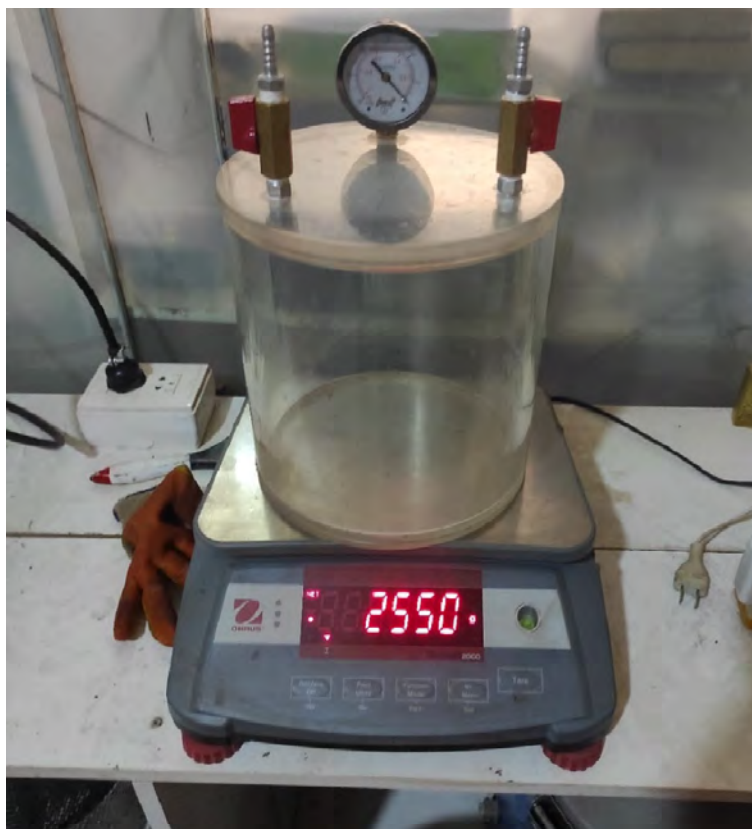


FIGURA NRO. 22: Realización del ensayo Rice

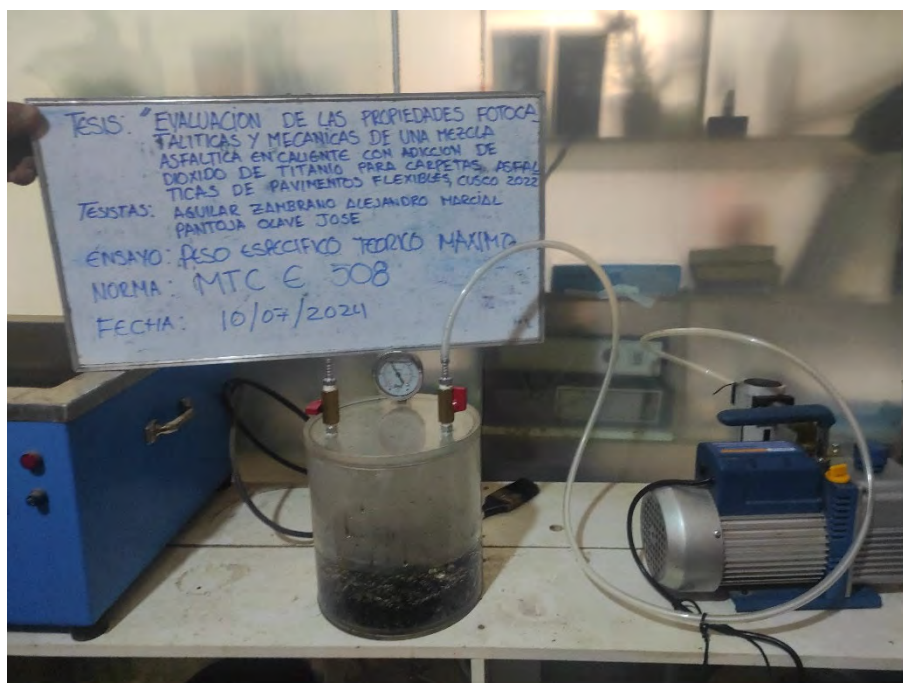


FIGURA NRO. 23: Rotura de briqueta en la prensa Marshall



FIGURA NRO. 24: Realizacion del ensayo de Autolimpieza



FIGURA NRO. 25: Briquetas con el reactivo de Rodamina para la prueba de colorimetría



FIGURA NRO. 26: Ensayo de autolimpieza



FIGURA NRO. 27: Espectrofotometro con el que se realizaron los ensayos de autolimpieza mediante la coloracion



FIGURA NRO. 28: Ensayo de la colorancia en el espectrofotómetro



FIGURA NRO. 29: Ensayo Purificación de aire



FIGURA NRO. 30: Briquetas con los diferentes porcentajes de Dióxido de titanio



FIGURA NRO. 31: Ensayo MODULO RESILIENTE de la briqueta con adición de dióxido de titanio, TDM-Lima



FIGURA NRO. 32: Ensayo MODULO RESILIENTE de la briqueta convencional, TDM-Lima

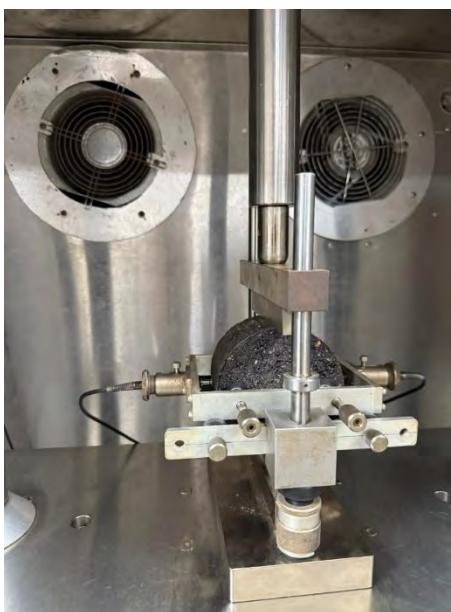


FIGURA NRO. 33: Ensayo para resistencia a la tensión usando cabezal LOTTMAN muestra en condición húmeda



FIGURA NRO. 34: Ensayo para resistencia a la tensión usando cabezal LOTTMAN muestra en condición seca

