

INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DE LA MEZCLA ASFÁLTICA EN EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE

HEMERSON LIZARBE ALARCÓN
EDWARD LEÓN PALACIOS
EDWIN CARLOS GARCIA SAEZ
YOBBER DE LA CRUZ MORALES



INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DE LA MEZCLA ASFÁLTICA EN EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE

HEMERSON LIZARBE ALARCÓN
EDWARD LEÓN PALACIOS
EDWIN CARLOS GARCIA SAEZ
YOBER DE LA CRUZ MORALES



Conselho Editorial

Prof. Dr. Adilson Tadeu Basquerote Silva - UNIDAVI
Prof. Dr. Astor João Schönell Júnior - IFFAR
Prof. Dr. Alan Ricardo Costa - UFRR
Prof. Dr. Allan Diêgo Rodrigues Figueiredo - UESPI
Profa. Dra. Andréia Bulaty - UNESPAR
Profa. Dra. Carla da Conceição de Lima - UFVJM
Prof. Dr. Camilo Darsie de Souza - UNISC
Profa. Dra. Clarice Caldeira Leite - UFRGS
Profa. Dra. Cecilia Decarli - UFRGS
Prof. Dr. Carlos Adriano Martins - UNICID
Prof. Dr. Christian Dennys Monteiro de Oliveira - UFCE
Profa. Dra. Dayse Marinho Martins - UFMA
Prof. Dr. Deivid Alex dos Santos - UEL
Prof. Dr. Dioni Paulo Pastorio - UFRGS
Prof. Dr. Douglas Manoel Antonio de Abreu Pestana dos Santos - FASESP
Profa. Dra. Elane da Silva Barbosa - UERN
Profa. Dra. Elen Gomes Pereira - IFBA
Profa. Dra. Francielle Benini Agne Tybusch - UFN
Prof. Dr. Francisco Odécio Sales - IFCE
Prof. Dr. Francisco Ricardo Miranda Pinto - UFCAT
Prof. Dr. Gilvan Charles Cerqueira de Araújo - UCB
Prof. Dr. Ismar Inácio dos Santos Filho - UFAL
Prof. Dr. Leonardo Bigolin Jantsch - UFSM
Profa. Dra. Liziany Müller Medeiros - UFSM
Profa. Dra. Marcela Mary José da Silva - UFRB
Prof. Dr. Mateus Henrique Köhler - UFSM
Prof. Dr. Michel Canuto de Sena - UFMS
Profa. Dra. Mônica Aparecida Bortolotti - UNICENTRO
Prof. Nilton David Vilchez Galarza - UPLA
Prof. Dr. Olavo Barreto de Souza - UEPB
Prof. Dr. Rafael Nogueira Furtado - UFABC
Prof. Dr. Roberto Araújo da Silva Vasques Rabelo - UNISANTOS
Prof. Dr. Rodrigo Toledo - USCS
Prof. Dr. Rodolfo Rodrigues de Souza - UERJ
Prof. Dr. Sidnei Renato Silveira - UFSM
Prof. Dr. Thiago Ribeiro Rafagnin - UFOB
Prof. Dr. Tomás Raúl Gómez Hernández - UCLV

Editor Chefe: Ivania Folmer
Bibliotecária: Eliete Marques da Silva
Projeto gráfico e Diagramação: Gabriel Eldereti Machado
Imagem capa: www.canva.com

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Influencia de la temperatura de la mezcla
asfáltica en el comportamiento mecánico de un
pavimento flexible [livro eletrônico] /
Hemerson Lizarbe Alarcón... [et al.]. --
Santa Maria, RS : Arco Editores, 2025.
PDF

Outros autores: Edward León Palacios, Edwin
Carlos Garcia Saez, Yober de La Cruz Morales.
Bibliografia.
ISBN 978-65-5417-523-4

1. Concreto – Efeito da temperatura
2. Pavimentos asfálticos I. Lizarbe Alarcón,
Hemerson. II. León Palacios, Edward. III. Garcia
Saez, Edwin Carlos. IV. Cruz Morales, Yober de la.

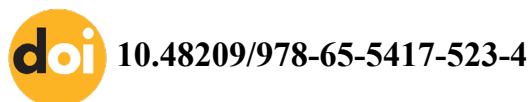
25-294688. 0

CDD-625. 8

Índices para catálogo sistemático:

1. Pavimentos : Engenharia 625.8

Eliete Marques da Silva - Bibliotecária - CRB-8/9380



Este livro é o resultado de uma pesquisa científica em atividades de ciência e tecnologia.
O trabalho foi revisado por pares acadêmicos externo antes de ser publicado.



CONTENIDO

DEDICATORIA.....	2
AGRADECIMIENTOS.....	3
RESUMEN.....	7
INTRODUCCIÓN.....	8
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	9
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA (MUNDIAL, PAÍS, REGIÓN)...	9
1.2. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA.....	11
1.2.1. ESPACIAL (GEOGRÁFICA).....	11
1.2.2. TEMPORAL.....	11
1.2.3. TEMÁTICA Y UNIDAD DE ANÁLISIS.....	11
1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	11
1.3.1. PROBLEMA GENERAL.....	11
1.3.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS.....	12
1.4. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	12
1.5. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN.....	12
1.6. OBJETIVOS.....	13
1.6.1. OBJETIVO GENERAL.....	13
1.6.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
2. MARCO TEÓRICO.....	14
2.1. Antecedentes.....	14
2.1.1. Investigaciones internacionales.....	14
2.1.2. Investigaciones nacionales.....	15
2.2. Bases teóricas.....	16
2.2.1. PAVIMENTOS.....	16
2.2.2. TIPOS DE PAVIMENTOS.....	16
2.2.3. TEMPERATURA DE LA MEZCLA ASFÁLTICA.....	18
2.2.4. ESTABILIDAD DE LA CARPETA ASFÁLTICA.....	18

2.2.5. RESISTENCIA A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE O AHUELLAMIENTO.....	18
2.2.6. LA RESISTENCIA A LA HUMEDAD.....	19
2.2.7. FENÓMENO STRIPPING.....	20
2.2.8. OXIDACIÓN O FLUIDEZ DEL LIGANTE DE LA MEZCLA.....	21
2.2.9 ESTABILIDAD DE MARSHALL.....	21
2.2.10 RETENCIÓN DE AHESIVIDAD SEGÚN ASTM D3625.....	27
2.2.11 baño maria.....	28
3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	29
3.1. ENFOQUE.....	29
3.2. Alcance (exploratorio, descriptivo, correlacional, explicativo).....	29
3.3. Diseño de investigación (tipos: experimental y/o no experimental).....	30
3.4. Hipótesis.....	30
3.4.1. HIPÓTESIS general.....	30
3.4.2. Hipótesis específicas.....	30
3.5. Operacionalización de variables, definición conceptual y operacional...31	
3.6. Técnicas e instrumentos.....	31
3.7. Técnicas estadísticas para el procesamiento de la información.....	32
3.7.1 Análisis de Varianza (ANOVA).....	32
3.7.2 Regresión Lineal Simple.....	33
3.7.3 Pruebas t de Student.....	33
3.8. DESARROLLO DEL TRABAJO.....	34
3.8.1. Estudio Granulométrico.....	34
4. RESULTADOS.....	60
4.1. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN.....	60
5. CONCLUSIONES.....	72
5.1. CONCLUSIONES.....	72
5.2. RECOMENDACIONES.....	73
5.3. TRABAJOS FUTUROS.....	74
6. BIBLIOGRAFÍA.....	75
SOBRE LOS AUTORES.....	79

RESUMEN

La presente investigación analiza la influencia de la temperatura de mezclado en el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas utilizadas en pavimentos flexibles, con el objetivo de identificar el rango térmico óptimo que garantice su resistencia estructural y durabilidad. Se formularon mezclas a temperaturas de 125 °C, 145 °C y 185 °C, evaluadas mediante el ensayo Marshall (ASTM D6927) para determinar la estabilidad y el flujo, y mediante el ensayo de retención de adhesividad (ASTM D3625) para analizar su comportamiento frente a la humedad.

Los resultados evidencian que una temperatura de 145 °C ofrece el mejor desempeño, con una estabilidad máxima de 4150.2 kgf y un flujo de 3.6 mm, en conformidad con el rango normativo de 2–4 mm. A temperaturas más bajas (125 °C), la mezcla presentó baja cohesión por la insuficiente fluidez del ligante, mientras que a temperaturas elevadas (185 °C), se observó pérdida de resistencia y adhesividad por exceso de fluidez y oxidación. En condiciones húmedas, la mezcla fabricada a 145 °C mostró adhesión completa, mientras que las otras presentaron desprendimiento parcial o flotación del asfalto.

Se concluye que un adecuado control de la temperatura de mezclado, centrado en un rango entre 150 °C y 165 °C, es determinante para asegurar la calidad, cohesión interna, y resistencia al stripping en mezclas asfálticas, optimizando así el desempeño y la vida útil de los pavimentos flexibles.

INTRODUCCIÓN

En la ingeniería vial, las mezclas asfálticas cumplen una función estructural esencial en los pavimentos flexibles. Sin embargo, su desempeño y durabilidad dependen de múltiples factores, entre ellos, la temperatura de mezclado, la cual influye directamente en la compactación, la cohesión interna, la adhesión entre el asfalto y el agregado, y la resistencia a la humedad. Una temperatura inadecuada puede provocar desde compactación deficiente hasta oxidación excesiva del ligante bituminoso, afectando gravemente la calidad del pavimento.

Esta investigación busca responder a la pregunta: ¿Cómo influye la temperatura de la mezcla asfáltica en el comportamiento mecánico de un pavimento flexible? Para ello, se plantearon como objetivos: evaluar la resistencia a la deformación permanente mediante el ensayo Marshall, analizar la resistencia a la humedad usando el método ASTM D3625 y establecer la relación entre la fluidez del ligante y el fenómeno de stripping. Las mezclas fueron preparadas a temperaturas de 125 °C, 145 °C y 185 °C, simulando diferentes condiciones comunes en obra.

Los resultados demuestran que el comportamiento óptimo se alcanza a 145 °C, temperatura que equilibra la fluidez del ligante, la resistencia mecánica y la adhesión asfalto-agregado. Este estudio aporta evidencia técnica para reforzar la importancia del control térmico en planta, proponiendo un rango ideal de trabajo entre 150 °C y 165 °C. Así, se contribuye al desarrollo de pavimentos más duraderos y funcionales frente a las condiciones del tráfico y la humedad ambiental.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del Problema (Mundial, País, Región)

El Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones (2016) indica que “Se entiende por “daño” o “falla” en un pavimento toda indicación de un desempeño insatisfactorio del pavimento, es decir, todo apartamiento de un comportamiento definido como “perfecto””, entonces, la importancia de detectar estas fallas y la evaluación de sus posibles causas, son indispensables y es responsabilidad de los profesionales y estudiantes de la Ingeniería Civil.

El Catálogo de Fallas y Reparaciones del MOPC afirma que los pavimentos flexibles y mixtos, presentan 4 grandes grupos de fallas: Deformaciones permanentes, Figuraciones o Agrietamientos, Desintegraciones y Otros modos de falla. Entre las deformaciones permanentes se incluyen el ahuellamiento, hundimiento, corrugación, corrimiento e hinchamiento, todas relacionadas con la acumulación de esfuerzos y deficiencias estructurales o de soporte. En cuanto a las figuraciones o agrietamientos, se pueden presentar fisuras longitudinales, transversales, en bloques, piel de cocodrilo, figuras reflejadas y figuras de arco, que surgen por movimientos térmicos, fatiga o deformación diferencial. Las desintegraciones comprenden desprendimiento o descubrimiento de agregados, peladuras, estrías longitudinales, baches, roturas de bordes y pulimento de la superficie, fenómenos que afectan la textura y resistencia del firme. Finalmente, se identifican otros modos de fallas como la exudación de asfalto, exudación de agua o bombeo, y los bacheos o reparaciones, que reflejan intervenciones o problemas relacionados con la expulsión de materiales y la pérdida de homogeneidad del pavimento.

En este contexto, surge la necesidad de analizar en mayor profundidad las causas subyacentes que favorecen la aparición de estas fallas, considerando que entre los factores constructivos críticos se encuentra la temperatura de

la mezcla asfáltica al momento de su fabricación y colocación. Una temperatura de mezclado inadecuada puede alterar significativamente las propiedades volumétricas y mecánicas de la mezcla, afectando su densidad, su resistencia a la deformación permanente, su capacidad de adherencia y su durabilidad frente a las solicitaciones del tráfico y el clima. Estas deficiencias pueden manifestarse posteriormente en forma de ahuellamientos, corrugaciones, fisuras de piel de cocodrilo, desprendimientos o incluso exudación de ligante, reduciendo la vida útil del pavimento y generando mayores costos de mantenimiento y rehabilitación.

Según el Manual de Diseño de Pavimentos Flexibles del Asphalt Institute (MS-2, 9th ed., 2014), temperaturas de mezcla demasiado bajas pueden generar compactación insuficiente y alto contenido de vacíos, aumentando la susceptibilidad al daño por humedad (stripping) y a la deformación permanente (rutting), mientras que temperaturas excesivamente altas pueden oxidar prematuramente el ligante, volviéndolo frágil y favoreciendo el agrietamiento. Además de la temperatura de mezclado, otras causas relevantes que pueden contribuir a la generación de fallas son la calidad de los materiales empleados, el contenido de ligante, el diseño estructural inadecuado, las cargas de tráfico superiores a las previstas, las deficiencias en el control de compactación, el drenaje deficiente y las condiciones climáticas extremas.

Por ello, se plantea la interrogante de hasta qué punto la temperatura de la mezcla asfáltica durante el proceso constructivo influye directamente en la aparición y severidad de los diferentes tipos de fallas descritos por el MOPC. Abordar esta problemática permitirá no solo identificar una causa técnica relevante en el desempeño de los pavimentos flexibles, sino también proponer rangos óptimos de temperatura de mezclado y colocación que mejoren la calidad constructiva y extiendan la vida útil de las infraestructuras viales. Esta investigación, por lo tanto, busca contribuir con información técnica que sirva de base para la actualización de especificaciones y buenas prácticas en el diseño y construcción de pavimentos asfálticos.

1.2. Delimitación Del Problema

1.2.1. Espacial (Geográfica)

Para el desarrollo de este trabajo de investigación se trabajará con los materiales pétreos de la cantera “La Moderna”, localizada en la zona de Pucapampa-chillico, anexo Simpapata San José de Tiellas que se encuentra a 45 minutos de la ciudad de Huamanga.

1.2.2. Temporal

Mayo – julio del 2025.

1.2.3. Temática y Unidad de Análisis

- La temperatura de la mezcla asfáltica en el sistema internacional o Grados Celsius °C, utilizando un termómetro.
- La resistencia de la carpeta asfáltica a la deformación permanente o ahuellamiento en Kg/cm², estimada a partir del ensayo de Estabilidad de Marshall que brindará la máxima carga que puede soportar la carpeta asfáltica antes de fallar, en kN.
- La resistencia a la humedad, evaluado de forma cualitativa empleando el ensayo ASTM D3625 para muestras sometidas a una simulación de exposición a temperaturas altas con el equipo de Baño María.
- Estudio teórico del fenómeno Stripping y su relación con la oxidación o fluidez del ligante de la mezcla.

Se ensayará con 6 muestras preparadas a diferentes temperaturas para cada ensayo a realizarse en el laboratorio.

1.3. Formulación Del Problema

1.3.1. Problema General

¿Cómo influye la temperatura de la mezcla asfáltica en el comportamiento mecánico de un pavimento flexible?

1.3.2. Problemas Específicos

- ✓ ¿Cómo varía la resistencia a la deformación permanente o ahuellamiento de una carpeta asfáltica a diferentes temperaturas de mezclado?
- ✓ ¿cómo influye la temperatura de mezclado de la carpeta asfáltica en la resistencia a la humedad, evaluado mediante el ensayo ASTM D3625?
- ✓ ¿Cómo se relaciona la oxidación o fluidez del ligante bituminoso por variaciones de temperatura con el fenómeno de stripping en la mezcla asfáltica?

1.4. Justificación e Importancia

Las mezclas asfálticas son regularmente consideradas como materiales fundamentales para la construcción de pavimentos debido a su resistencia y capacidad para soportar cargas. Por tanto, el control de la temperatura en mezclas asfálticas representa un aspecto clave en la calidad y el comportamiento mecánico de los pavimentos flexibles. Esto se debe a que el ligante asfáltico cambia sus propiedades según la temperatura, afectando la facilidad de compactación, la adherencia entre los agregados y la capacidad de la mezcla para soportar cargas. Si la mezcla no se mantiene dentro del intervalo térmico óptimo durante su colocación (entre 140°C y 160°C), pueden generarse problemas como la compactación deficiente, excesos de vacíos o envejecimiento prematuro del asfalto. Además, una vez en servicio, las variaciones térmicas del ambiente influyen notablemente: a altas temperaturas pueden provocar deformaciones permanentes, mientras que el frío intenso puede generar fisuras por contracción. Por estas razones, es esencial considerar la temperatura tanto en el proceso constructivo como en el diseño de la mezcla, para asegurar un pavimento duradero, resistente y funcional bajo distintas condiciones climáticas.

1.5. Limitaciones de la Investigación

Aun no se ha observado alguna limitación para el desarrollo de este trabajo de investigación.

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo General

Determinar la temperatura óptima de mezclado que garantice la resistencia y durabilidad de las mezclas asfálticas utilizadas en pavimentos flexibles, mediante la evaluación de sus propiedades mecánicas y la adhesión asfalto-agregado.

1.6.2. Objetivos Específicos

- ✓ Evaluar la variación de la resistencia a la deformación permanente o ahuellamiento de mezclas asfálticas fabricadas a diferentes temperaturas de mezclado, mediante el ensayo de estabilidad Marshall.
- ✓ Analizar el efecto de la temperatura de mezclado sobre la resistencia a la humedad de la mezcla asfáltica, utilizando el ensayo de retención de adhesividad según ASTM D3625.
- ✓ Establecer la relación entre la oxidación o fluidez del ligante bituminoso, causada por variaciones de temperatura de mezclado, y la aparición del fenómeno de stripping en la mezcla asfáltica.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

En nuestra búsqueda de información adicional sobre el tema, hemos identificado varios trabajos investigación relevantes:

2.1.1. Investigaciones internacionales

Se han realizado investigaciones internacionales que exploran la influencia de la temperatura en el comportamiento mecánico de la carpeta asfáltica:

- Tai Nguyen, HT, Do, TT, Tran, VT, Phan, TN, Pham, TA y Nguyen, ML (2021). Determinación de la deformación por fluencia de mezclas asfálticas a temperaturas intermedias y altas mediante el ensayo de recuperación de fluencia. Este artículo presenta un método para determinar la fluencia de mezclas asfálticas a temperaturas intermedias y altas, donde se produce la deformación permanente
- Gubler, M. Partl, F. Canestrari, A. Grilli. (2005) Influencia del agua y la temperatura en las propiedades mecánicas de pavimentos asfálticos seleccionados. Esta investigación evalúa cómo la presencia de agua y las variaciones de temperatura afectan las propiedades mecánicas de pavimentos asfálticos. Se destaca que tanto el agua como las temperaturas extremas pueden deteriorar significativamente la resistencia y durabilidad del pavimento.
- Guoping Qian et al. (2021). Modelo unificado de resistencia de mezclas asfálticas considerando el efecto de la temperatura. Este estudio propone un modelo de resistencia basado en la Teoría Unificada de Resistencia (UST) que incorpora el efecto de la temperatura. Se realizaron ensayos de tracción directa, compresión uniaxial y resistencia al corte en mez-

clas asfálticas a diferentes temperaturas. Los resultados mostraron que las propiedades mecánicas disminuyen con el aumento de la temperatura, especialmente entre 5 °C y 40 °C, donde se observa una disminución lineal significativa.

2.1.2. Investigaciones nacionales

Asimismo, se han llevado a cabo pocas investigaciones a nivel nacional. A continuación, se destacan algunas de las más relevantes:

- (Rodríguez Moran, 2020): En su investigación estableció, que, a temperaturas menores de 125°C, el efecto del diferencial de temperatura entre el agregado y el ligante asfáltico en la adherencia de la mezcla asfáltica en caliente, la adherencia pierde más de un 55%, ya que a temperaturas bajas la mezcla pierde porcentaje de adherencia natural. Usar una temperatura dentro del rango de 125°C a 130°C como mínimo permite conservar el porcentaje de adherencia hasta en un 29.78% de pérdida mínima proyectada. Además, los efectos del diferencial de temperatura menores a 125°C y mayores a 180°C afectan directamente a los valores de estabilidad; como también disminuyen los valores de resistencia de las briquetas ensayadas, obteniendo valores por debajo del mínimo requerido por la normativa Marshall (830 kg).
- (Arellano Loayza & Cáceres Candia, 2018): En su investigación, se determinó que es recomendable colocar carpetas asfálticas mayores a 3” en una sola capa a fin de hacerle frente al gradiente térmico que fluctúa entre -15°C a 20°C y que la compactación se desarrolle mientras la mezcla asfáltica en caliente se encuentre dentro de un rango de 120°C a 130°C, además se tiene en consideración la radiación que es 4 a 5 veces mayor que la existente en la costa lo cual promueve aceleraciones en el proceso de envejecimiento y oxidación de la carpeta. Para evitar este problema, en el diseño de la mezcla asfáltica es indispensable que el porcentaje de vacíos se encuentre en un rango de 2% a 4% y es deseable que tienda al menor de 2% en zonas que se encuentren por encima de los 3000 msnm.

- (Vargas Malpartida, 2019): En su investigación, determina una temperatura aceptable de compactación es de 138.5°C con lo cual se consigue una mezcla que cumple con todas las condiciones establecidas por el MTC, alcanzando una estabilidad de 1318.86 kgf, flujo de 3.52 mm, porcentaje de vacíos de 5 y peso específico bulk de 2.864 g/cm³. Además, esta temperatura se encuentra dentro del rango establecido en la carta de Viscosidad – Temperatura, lo cual significa una mejora en la adherencia y consistencia de los materiales.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Pavimentos

- La American Association of State Highway and Transportation Officials [AASHTO] (1993) define el pavimento como una estructura multicapa construida sobre la subrasante de una carretera, diseñada para distribuir las cargas de tráfico y las condiciones ambientales a lo largo de su vida útil.
- El pavimento por definición, es una estructura heterogénea de suelos y rocas naturales, que el ingeniero toma, procesa y transforma, para formar capas resistentes que, en su conjunto, soporten cargas que le transmitirán los vehículos y sujetas a los agentes naturales de la región, durante toda su vida útil de servicio. (TÉLLEZ Rodolfo, s.f.)
- El Pavimento es una estructura de varias capas construida sobre la subrasante del camino para resistir y distribuir esfuerzos originados por los vehículos y mejorar las condiciones seguridad y comodidad para el tránsito. (MTC, págs. 23-24)

2.2.2. Tipos de Pavimentos

Según el manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, Sección: Suelos y Pavimentos (2013), los tipos de pavimento por lo general son los siguientes:

- ✓ Pavimentos Flexibles.
- ✓ Pavimentos Semirrígidos.
- ✓ Pavimentos Rígidos.

PAVIMENTO FLEXIBLE: El pavimento flexible se compone de capas granulares (subbase, base) y una capa de rodadura formada por materiales bituminosos como aglomerantes, agregados y, en caso de ser necesario, aditivos. Se percibe principalmente como una capa de rodadura asfáltica encima de capas granulares: mortero asfáltico, tratamiento bicapa superficial, micro pavimentos, macadam asfáltico, mezclas asfálticas en frío y mezclas asfálticas en caliente.

PAVIMENTO SEMIRRÍGIDO: El pavimento semirrígido es un tipo de pavimento que se compone principalmente de capas asfálticas con un espesor total de bituminoso (carpeta asfáltica en caliente sobre una base tratada con asfalto); también se conoce como pavimento semirrígido a la estructura que consta de carpeta asfáltica sobre una base tratada con cemento o sobre una base tratada con cal. La categoría de pavimento semirrígido abarca los pavimentos con adoquines.

PAVIMENTO RÍGIDO: El pavimento rígido es una estructura de pavimento que se compone específicamente de una capa de subbase granular. Sin embargo, esta capa puede ser de base granular, o puede ser estabilizada con cemento, asfalto o cal, y una capa de rodadura de losa de hormigón de cemento hidráulico como aglomerante, agregados y, en caso de ser necesario, aditivos. Los pavimentos rígidos se clasifican en tres categorías.:

- ✓ Pavimento de concreto simple con juntas.
- ✓ Pavimento de concreto con juntas y refuerzo de acero en forma de fibras o mallas.
- ✓ Pavimento de concreto con refuerzo continuo.

2.2.3. Temperatura de la Mezcla Asfáltica

La temperatura de mezclado de una mezcla asfáltica en caliente, según el Asphalt Institute (2007), se define como aquella temperatura específica a la que el asfalto debe ser calentado para alcanzar una viscosidad cinemática de 170 ± 20 centistokes (equivalente a 0.17 ± 0.02 Pa·s en el sistema métrico). Esta temperatura se determina ajustando la curva de viscosidad vs. temperatura obtenida en el laboratorio hasta el rango mencionado. De forma complementaria, la temperatura de compactación se define como la temperatura a la cual el asfalto debe alcanzar una viscosidad cinemática de 280 ± 30 centistokes (0.28 ± 0.03 Pa·s) para permitir una compactación adecuada sin pérdida prematura de calor.

El ASTM, 2015 define dos puntos de ensayo ($135\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $165\text{ }^{\circ}\text{C}$) y a partir de ellos se interpolan las temperaturas de mezclado y compactación según los criterios de viscosidad.

2.2.4. Estabilidad de la Carpeta Asfáltica

“La estabilidad es su capacidad de resistir desplazamientos y deformaciones bajo las cargas de tránsito. Un pavimento estable mantiene su forma y lisura bajo cargas repetidas, mientras el inestable desarrolla ahuellamientos, ondulaciones y otras que indican cambios en la mezcla” (Asphalt-Institute, 2007, pág. 29).

La estabilidad en el diseño de pavimentos según AASHTO 2017 es un concepto fundamental que garantiza la durabilidad y el buen desempeño del pavimento a lo largo de su vida útil, considerando factores como la resistencia a la deformación, la confiabilidad y las condiciones de operación.

2.2.5. Resistencia a la Deformación Permanente o Ahuellamiento

“Esta propiedad se refiere a la capacidad de la mezcla asfáltica para resistir la deformación y el desplazamiento, debidos a las cargas que resultan del tránsito vehicular” (IMT, pág. 4).

Desde el punto de vista mecanicista, existen dos tipos de falla principales en las mezclas asfálticas, que son la deformación permanente y el fisuramiento por fatiga. La deformación permanente es generada por deformación plástica del concreto asfáltico y/o por deformación de la subrasante. Cuando a un material granular se le inducen ciclos de carga y descarga, parte de la deformación total (ξ_t) que se genera es recuperada y se le conoce como la deformación resiliente (ξ_r). Aquella deformación que no se recupera se acumula con cada repetición del ciclo y se le denomina deformación permanente (ξ_p) (Néstor Huamán Guerrero, Carlos M. Chang Albitres, pág. 25).

“El ahuellamiento es una deformación permanente acumulada que ocurre en los pavimentos flexibles como resultado del desplazamiento del material, ya sea dentro de la mezcla asfáltica o en las capas subyacentes, debido a la repetida acción de cargas del tráfico” (Asphalt Institute, 2007).

Figura 01: Ahuellamiento



Fuente: Delbono, H. L., & Rebollo, O. R. (2017). Ahuellamiento en pavimentos asfálticos utilizando geosintéticos.

2.2.6. La Resistencia a la Humedad

Según el AASHTO 2011, La resistencia a la humedad del asfalto es una propiedad fundamental en el diseño de mezclas asfálticas, ya que determina la capacidad de la mezcla para mantener su integridad estructural y funcional frente a la acción del agua. La humedad, cuando penetra en el pavimento, puede interferir en la adhesión entre el ligante asfáltico y los agregados minerales, debilitando la mezcla y favoreciendo procesos de desprendimiento o stripping, lo cual compromete su durabilidad.

Según lo descrito por Powell & Brown, 2003 podemos entender que la resistencia a la humedad de las mezclas asfálticas se refiere a la capacidad que tiene la mezcla para conservar la unión efectiva entre el ligante asfáltico y los agregados minerales aun cuando se expone a la presencia de agua, un agente que puede infiltrarse fácilmente en los vacíos del pavimento. Esta propiedad es fundamental para garantizar la durabilidad del asfalto, ya que, si el agua logra debilitar la adherencia entre sus componentes, se produce una pérdida progresiva de cohesión interna, que da inicio a un proceso de deterioro conocido como stripping o desprendimiento por humedad. Este fenómeno, que puede parecer imperceptible al inicio, desencadena con el tiempo la aparición de fisuras, desprendimientos superficiales y baches, afectando tanto la funcionalidad como la vida útil del pavimento. Además, si no se controla adecuadamente, el daño por humedad puede extenderse hacia las capas inferiores del sistema vial, comprometiendo su estabilidad estructural. Por estas razones, es esencial que el diseño de mezclas asfálticas contemple materiales compatibles, adecuados niveles de compactación y, de ser necesario, el uso de aditivos anti desprendimiento que ayuden a mejorar la resistencia de la mezcla frente a la acción del agua y así asegurar un pavimento más duradero y resistente a las condiciones climáticas adversas.

2.2.7. Fenómeno Stripping

“El stripping es la pérdida de adherencia entre el ligante asfáltico y los agregados en una mezcla asfáltica, típicamente causada por la infiltración de agua, lo que lleva a una reducción en el rendimiento y la durabilidad del pavimento.” (AASHTO, 2005). La norma AASHTO T 283 plantea un procedimiento de laboratorio diseñado para evaluar qué tan vulnerable es una mezcla asfáltica compactada frente a la acción del agua. En otras palabras, permite conocer si el pavimento tiene la capacidad de mantener su integridad estructural cuando se expone a condiciones de humedad. Esto es especialmente importante porque la presencia de agua puede debilitar la unión entre el asfalto (ligante) y los agregados minerales que lo componen, lo que ocasiona una pérdida progresiva de

cohesión en la mezcla. Como resultado, el pavimento empieza a mostrar signos de deterioro antes de lo esperado, tales como fisuras, baches y desprendimientos del asfalto (fenómeno conocido como stripping)

Según la National Asphalt Pavement Association (NAPA, 2013), el stripping se define como el proceso mediante el cual el agua causa la pérdida de adhesión entre el ligante asfáltico y la superficie de los agregados, lo que conlleva a un deterioro progresivo de la mezcla asfáltica.

2.2.8. Oxidación o Fluidez del Ligante de la Mezcla

La oxidación es un proceso químico por el cual algunos componentes del asfalto reaccionan con el oxígeno del aire, lo que provoca un endurecimiento progresivo del ligante con el paso del tiempo. Generando un impacto directo en su fluidez, ya que reduce su capacidad de deformación sin agrietamiento. (Asphalt Institute, 2007)

“La oxidación del ligante es un fenómeno de envejecimiento que afecta negativamente la durabilidad de la mezcla asfáltica, ya que endurece el asfalto y reduce su capacidad de deformación sin agrietarse.” (Huang, 2004, pág. 213)

“La fluidez del ligante afecta directamente la resistencia a deformaciones permanentes y al agrietamiento térmico, siendo un parámetro de suma importancia en el diseño de mezclas asfálticas durables.” (AASHTO, 2017)

2.2.9. Estabilidad de Marshall

El Ensayo Marshall es un procedimiento ideado para clasificar las mezclas asfálticas empleando asfalto sólido y material granular de tamaño no mayor a 1 pulgada (Minaya Gonzalez & Ordóñez Huamán, Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos, 2006).

En el Perú el método Marshall es usado para el diseño de mezclas asfálticas, donde se determinan la resistencia a las cargas y su deformación a una temperatura de 60°C, conocidas como Estabilidad y fluencia. (Menéndez

Acurio, Ingeniería de Pavimentos - Materiales, 2016, pág. 257). Es necesario señalar que la temperatura máxima adoptada para la realización del ensayo no corresponde a la registrada en las regiones, en la cuales un pavimento podría alcanzar temperaturas más elevadas o más bajas que lo establecido, ocurriendo que los parámetros mecánicos reales difieran a los del diseño. En tal sentido se percibe una gran importancia en la evaluación de la estabilidad y fluencia respecto al cambio de temperatura y es evidente la necesidad de conocer una relación correspondiente para su determinación a cualquier condición.

Para proyectos de diseño de mezcla “los resultados de los ensayos de estabilidad y fluencia deberán resultar del promedio de un mínimo de 3 muestras (briquetas) por cada incremento de contenido de ligante, variando en incrementos de 0.5% sobre un rango de contenido de ligante”, este es seleccionado en base a la experiencia y datos históricos de los materiales componentes. La temperatura de ensayo es de 60°C escogida por considerarse que es la temperatura promedio del pavimento asfáltico en el verano, (Reyes, Madrid & Salas, 2007).

Requerimientos Generales de Construcción según EG-2013

En las tablas 1 y 2 se describen las exigencias planteadas por nuestra normatividad nacional para el desarrollo de una mezcla asfáltica.

Tabla 1: Requisitos para mezcla de concreto bituminoso

Parámetro de Diseño	Clase de Mezcla		
	A	B	C
Marshall MTC E 504			
1. Compactación, número de golpes por lado	75	50	35
2. Estabilidad (mínimo)	8,15 kN	5,44 kN	4,53 kN
3. Flujo 0,01" (0,25 mm)	8-14	8-16	8-20
4. Porcentaje de vacíos con aire (1) (MTC E 505)	3-5	3-5	3-5
5. Vacíos en el agregado mineral	Ver Tabla 423-10		
Inmersión – Compresión (MTC E 518)			
1. Resistencia a la compresión Mpa mín.	2,1	2,1	1,4
2. Resistencia retenida % (mín.)	75	75	75
Relación Polvo – Asfalto (2)	0,6-1,3	0,6-1,3	0,6-1,3
Relación Estabilidad/flujo (kg/cm) (3)	1.700-4.000		
Resistencia conservada en la prueba de tracción indirecta AASHTO T 283	80 Mín.		

(1) A la fecha se tienen tramos efectuados en el Perú que tienen el rango 2% a 4% (es deseable que tienda al menor 2%) con resultados satisfactorios en climas fríos por encima de 3.000 m.s.n.m. que se recomienda en estos casos.

(2) Relación entre el porcentaje en peso del agregado más fino que el tamiz 0,075 mm y el contenido de asfalto efectivo, en porcentaje en peso del total de la mezcla.

(3) Para zonas de clima frío es deseable que la relación Est. /flujo sea de la menor magnitud posible.

(4) El Índice de Compactabilidad mínimo será 5.

El Índice de Compactabilidad se define como:
$$\frac{1}{\text{GEB } 50 - \text{GEB } 5}$$

Siendo GEB50 y GEB5, las gravedades específicas bulk de las briquetas a 50 y 5 golpes.

Fuente. Datos tomados del Manual de Carreteras EG-2013, Tabla 423-06.

En la tabla 2. se describen las exigencias planteadas por nuestra normatividad nacional para el desarrollo de una mezcla asfáltica.

Tabla 2: Vacíos mínimos en el agregado mineral (VMA)

Tamiz	Vacíos mínimos en agregado mineral %	
	Marshall	Superpave
2,36 mm (N.º 8)	21	-
4,75 mm (N.º 4)	18	-
9,50 mm (3/8")	16	15
12,5 mm (½")	15	14
19,0 mm (3/4")	14	13
25,0 mm (1")	13	12
37,5 mm (1 ½")	12	11
50,0 mm (2")	11,5	10,5

Fuente. Datos tomados del Manual de Carreteras EG-2013, Tabla 423-08

En la tabla 3. Temperatura del Ensayo de estabilidad y flujo.

Tabla 3: Factores de Estabilidad de Correlación A

Volumen del espécimen, cm ^{3B}	Espesor del espécimen ^A		Razón de la Correlación
	mm	Pulg	
200 - 213	25,4	1,00 (1)	5,56
214 - 225	27	1,06 (1 1/16)	5
226 - 237	28,6	1,12 (1 1/8)	4,55
238 - 250	30,2	1,19 (1 3/16)	4,17
251 - 264	31,8	1,25 (1 1/4)	3,85
265 - 276	33,3	1,31 (1 5/16)	3,57
277 - 289	34,9	1,38 (1 3/8)	3,33
290 - 301	36,5	1,44 (1 7/16)	3,03
302 - 316	38,1	1,50 (1 1/2)	2,78
317 - 328	39,7	1,56 (1 9/16)	2,5
329 - 340	41,3	1,62 (1 5/8)	2,27
341 - 353	42,9	1,69 (1 11/16)	2,08
354 - 367	44,4	1,75 (1 3/4)	1,92
368 - 379	46	1,81 (1 13/16)	1,79
380 - 392	47,6	1,88 (1 7/8)	1,67
393 - 405	49,2	1,94 (1 15/16)	1,56
406 - 420	50,8	2,00 (2)	1,47
421 - 431	52,4	2,06 (2 1/16)	1,39
432 - 443	54	2,12 (2 1/8)	1,32
444 - 456	55,6	2,19 (2 3/16)	1,25
457 - 470	57,2	2,25 (2 1/4)	1,19
471 - 482	58,7	2,31 (2 5/16)	1,14
483 - 495	60,3	2,38 (2 3/8)	1,09
496 - 508	61,9	2,44 (2 7/16)	1,04
509 - 522	63,5	2,50 (2 1/2)	1
523 - 535	65,1	2,56 (2 9/16)	0,96
536 - 546	66,7	2,62 (2 5/8)	0,93
547 - 559	68,3	2,60 (2 11/16)	0,89
560 - 573	69,8	2,75 (2 3/4)	0,86
574 - 585	71,4	2,81 (2 13/16)	0,83
586 - 598	73	2,88 (2 7/8)	0,81
599 - 610	74,6	2,94 (2 15/16)	0,78
611 - 626	76,2	3,00 (3)	0,76

^A Mide la estabilidad del espécimen multiplicado por la relación para el espesor de la muestra es igual a la estabilidad corregida para 2 ½" (63,5 mm) del espécimen.

^B La relación Volumen-espesor se basa en un diámetro de la probeta de 4" (101,6 mm)

Fuente. Manual de Ensayo de Materiales MTC 2016.

Parámetros Volumétricos Marshall

A. Gravedad Específica Bulk

La gravedad específica Bulk de una mezcla asfáltica compactada es la

relación entre el peso de la muestra en el aire con el peso de agua equivalente al volumen de la muestra. Se determina mediante la siguiente formula:

$$G_{mb} = \frac{W_D}{W_{SSD} - W_{SUB}}$$

Donde:

G_{mb} = Gravedad específica Bulk de la muestra compactada.

W_D = Peso de la muestra seca en el aire (g)

W_{SSD} = Peso de la muestra en su condición saturada superficialmente seca (g)

W_{SUB} = Peso de la muestra sumergida (g)

W_{SSD} = Peso del volumen de agua correspondiente al volumen de la muestra a 25°C.

B. Contenido de Asfalto

Es la relación entre el peso de asfalto y el peso total de la mezcla, expresada en porcentaje. Se determina mediante la siguiente fórmula:

$$CA = \frac{W_b}{W_{mb}} \times 100$$

Donde:

CA = Contenido de asfalto (%)

w_b = Peso del asfalto

w_{mb} = Peso total de la mezcla compactada.

PROCEDIMIENTO

Este modo operativo está destinado para su empleo con mezclas densas bituminosas de laboratorio y aquellas producidas en planta, con agregados hasta de 25 mm de tamaño máximo y para recompactación de muestras de pavimentos asfálticos.

El ensayo se realizará teniendo en cuenta las referencias normativas de ASTM-D6926: “Standard Practice for Preparation of Bituminous Specimens Using Marshall Apparatus”.

FINALIDAD

Determinar a partir de la preparación y compactación de especímenes de mezcla bituminosa para pavimentación, de altura nominal de 64 mm y 102 mm

de diámetro, el diseño de una mezcla asfáltica y calcular sus diferentes parámetros de comportamiento, por medio del método manual Marshall.

PROCEDIMIENTO

Muestras de Ensayo.

Preparación de Agregados, Secar los agregados a peso constante. El secado en horno será hecho de 105 °C a 110 °C. Después del secado, separa los agregados por tamizado en seco en las fracciones deseadas. Las fracciones mínimas siguientes son las recomendadas:

- 25 a 19 mm (1 a ¾ pulg)
- 19 a 12,5 mm (¾ a ½ pulg)
- 12,5 a 9,5 mm (½ a 3/8 pulg)
- 9,5 a 4,75 mm (3/8 a N°4)
- 4,75 a 2,36 mm (N°4 a N°8)
- 2,36 mm (pasante la N°8)

Determinación de temperaturas de mezcla y compactación:

El cemento asfáltico empleado en preparar las muestras será calentado para producir viscosidades de $0,17 \pm 0,02$ Pa.s y $0,28 \pm 0,03$ Pa.s para mezclado y compactado respectivamente. La selección de las temperaturas de compactación y mezclado a viscosidades de $0,17 \pm 0,02$ Pa.s y $0,28 \pm 0,03$ Pa.s, respectivamente no aplican a asfaltos modificados. El usuario contactará con el productor para establecer los rangos apropiados de temperaturas de compactación y mezclado.

Preparación de la Mezcla

Las muestras podrán ser preparados en una o varias briquetas que contengan suficiente material para tres o cuatro muestras.

Acondicionar las briquetas simples en contenedores de metal cubiertos en horno a 8 °C a 11 °C por encima de la temperatura de compactación establecida en 6.1.2 para un mínimo de 1 h y máximo de 2 h.

Calentar las mezclas por un período de tiempo antes de la compactación puede resultar en especímenes que tengan propiedades diferentes de aquellos

que son compactados inmediatamente después de su mezclado (el criterio Marshall Original está basado en un procedimiento sin curado).

Compactación de Muestras

Limpiar completamente el molde ensamblado y la cara del martillo de compactación y calentarlos ambos en agua hirviendo en horno ó en una placa calentadora a temperatura entre 90 y 150 °C. Colocar un pedazo de papel no absorbente cortado del tamaño de la base del molde antes de introducir la mezcla. Colocar la mezcla en el molde, chusear vigorosamente la mezcla con una espátula calentada 15 veces alrededor del perímetro y 10 veces en el interior. Colocar otra pieza de papel no absorbente para que encaje en la parte superior de la mezcla.

Cuando se lleva a cabo la compactación con el martillo operado manualmente, coger el eje del martillo con la mano tan cerca de la perpendicular de la base del molde ensamblado como sea posible. En este procedimiento original Marshall ningún aparato mecánico de cualquier tipo debe ser empleado para restringir el manubrio del martillo en posición vertical durante la compactación.

2.2.10. Retención de Ahesividad Según Astm D3625

Uno de los modos de falla más frecuentes del asfalto mezclado en caliente (HMA) es la desintegración de los agregados con el tiempo debido a pérdida de adhesión/unión entre el ligante asfáltico y el agregado, este fenómeno, se denomina “stripping” y, en términos más amplios, se aborda como daño inducido por la humedad en HMA (por ejemplo, Xiao y Amirkhanian, 2009; Christensen y otros, 2015; Ali y otros, 2019). El efecto de deterioro de la humedad sobre el HMA es alteración progresiva de la integridad de la mezcla debido a la acción del agua al remover o “despojar” el Asfalto.

Referencia Normativa: ASTM D 3625 “Standard Practice For Effect of Water on Bituminous-Coated Aggregate Using Boiling Water”.

El Ensayo determina la pérdida de adherencia en mezclas de agregado no compactadas revestidas con bitumen, debido a la acción del agua hervida.

Esta práctica es usada como un indicador de la susceptibilidad relativa al agua del agregado revestido con bitumen, pero no debería ser usado como una medida de rendimiento en campo porque tal correlación no ha sido establecida. Si se indica la pérdida de adhesión debido al agua, se deberían ejecutar ensayos por otros procedimientos para evaluar la mezcla más profundamente. (Manual de Ensayo de Materiales MTC 2016).

2.2.11. baño maria

El daño por humedad, resultado de una reducción en la adhesión del asfalto y la superficie del agregado, o por falla cohesiva en la estructura interna del mastic asfáltico, depende de varias variables que incluyen: tipo de mezcla asfáltica, propiedades del asfalto y el agregado, características del tráfico y el ambiente, técnicas constructivas y el uso de aditivos (Tarrer y Wagh, 1991).

Sin embargo, la presencia de humedad en los poros del agregado y en el interfaz entre el asfalto y el agregado es el factor principal en los problemas relacionados al “stripping” o desnudamiento.

3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Enfoque

La investigación utiliza un enfoque cuantitativo, fundamentado en la recolección y análisis de datos numéricos de las temperaturas de mezclado y el comportamiento mecánico del pavimento (resistencia a la deformación permanente, resistencia a la humedad y el fenómeno de stripping en la mezcla asfáltica) obtenidos mediante los ensayos de laboratorio planteados. Este enfoque facilita la medición de la influencia de la temperatura de mezclado en el comportamiento mecánico del pavimento flexible y en tal sentido encontrar una temperatura de mezclado idóneo.

3.2. Alcance (exploratorio, descriptivo, correlacional, explicativo)

El alcance de nuestra investigación es exploratorio y explicativo:

- Exploratorio: La investigación tiene como propósito determinar la temperatura adecuada de mezclado para obtener un adecuado comportamiento mecánico del pavimento flexible en Ayacucho, dado que este tema no ha sido investigado en nuestra región, por tal motivo solo se usa las temperaturas recomendadas por el MTC y los cuales no contemplan aspectos ambientales y los materiales de cada región del país.
- Explicativo: El estudio pretende explicar cómo y por qué las diferentes temperaturas de mezclado afectan el comportamiento mecánico del pavimento flexible cuando se utilizan materiales de la zona y de esta manera se buscará establecer las relaciones de causa y efecto bajo los resultados de los ensayos de laboratorio.

3.3. Diseño de investigación (tipos: experimental y/o no experimental)

El diseño de la investigación es experimental ya que mediante ensayos de laboratorio se recolectan datos para la determinación de la temperatura adecuada de mezclado para garantizar un buen comportamiento mecánico. Se utilizarán métodos controlados para manipular la variable independiente (temperatura de mezclado) y observar el efecto de estas sobre las variables dependientes (resistencia a la deformación permanente, resistencia a la humedad y el fenómeno de stripping en la mezcla asfáltica).

3.4. Hipótesis

3.4.1. Hipótesis General

La temperatura de la mezcla asfáltica tiene una significativa influencia en el comportamiento mecánico de un pavimento flexible.

3.4.2. Hipótesis específicas

- La resistencia a la deformación permanente o ahuellamiento de una carpeta asfáltica es mayor cuando la mezcla asfáltica es preparada a mayor temperatura.
- La mezcla asfáltica preparada a temperaturas óptimas, entre 140°C Y 160°C, presenta una mayor resistencia a la humedad ya que es menos susceptible al daño por agua según los resultados del ensayo ASTM D3625, donde se analiza de forma rápida y visual la afinidad entre el asfalto y los agregados.
- A temperaturas elevadas de mezclado, mayores a 180°C, la oxidación del ligante reduce su adhesión con los agregados, lo que incrementa la susceptibilidad al stripping en la mezcla asfáltica.

3.5. Operacionalización de variables, definición conceptual y operacional

En el presente trabajo de investigación tenemos tanto variables independientes, dependientes y controladas para cada cuestión y objetivo, a continuación, detallaremos.

- **VARIABLE INDEPENDIENTE**

- Tanto en la pregunta general y las preguntas específicas, la variable independiente es la temperatura de la mezcla asfáltica, ya que se evaluará el comportamiento mecánico variando estas temperaturas, seis veces, medidos en °C.

- **VARIABLES DEPENDIENTES**

El comportamiento mecánico del pavimento flexible, en esta investigación, que se evalúa variando las temperaturas de mezcla, se caracteriza de 3 maneras, por su resistencia a la deformación permanente o ahuellamiento, la resistencia a la humedad y su susceptibilidad al fenómeno Stripping.

- Resistencia a la deformación permanente o ahuellamiento, que se obtendrá a partir de la prueba directa de Estabilidad Marshall sobre el área transversal de la muestra en kg/cm².

- Resistencia a la humedad, evaluada de forma visual, sometiendo la muestra a una temperatura de 100°C durante 10 minutos en el equipo Baño María, empleando el ensayo ASTM D3625.

- Estudio teórico de la relación de la oxidación del ligante bituminoso con el fenómeno Stripping, y la comparación con la parte experimental.

3.6. Técnicas e instrumentos

- **Técnicas**

Según Baena (2017) “son los pasos que ayudan al método a conseguir su propósito”, se refiere a las etapas o acciones que nos ayudan a recolectar, procesar y analizar la información.(p.45)

La técnica a utilizar en nuestra investigación es la observación. Ya que se va a variar las temperaturas de la mezcla asfáltica, a diferentes magnitudes y se tomará nota del comportamiento mecánico del pavimento con cada una de las temperaturas, esto con la finalidad de obtener rangos óptimos de temperatura de mezclado.

- Instrumentos

Segun Baena (2017) “son los que apoyan a las técnicas en su objetivo”(p.45)

En nuestro caso serán las guías de observación, los cuales se tomarán durante el desarrollo de la prueba.

3.7. Técnicas estadísticas para el procesamiento de la información

Para analizar los datos obtenidos de los ensayos experimentales, se utilizarán técnicas estadísticas que permitirán validar las hipótesis y entender la relación entre las variables estudiadas. Utilizaremos las siguientes técnicas:

3.7.1. Análisis de Varianza (Anova)

“El análisis de varianza (ANOVA) es una técnica estadística utilizada para comparar las medias de tres o más grupos independientes para determinar si existe una diferencia estadísticamente significativa entre ellas.” (Montgomery, 2019, p. 45)

Se utilizará el ANOVA para comparar las medias de diferentes probetas de la mezcla asfáltica, preparadas a diferentes temperaturas e ir evaluando las variaciones que presentan sus propiedades mecánicas. La técnica permitirá determinar si las diferencias observadas en las propiedades mecánicas (como la resistencia a la deformación permanente y la resistencia a la humedad) entre los grupos son estadísticamente significativas.

- **ANOVA de un factor:** Se empleará cuando se quiera comparar la temperatura sobre las propiedades mecánicas de la carpeta asfáltica, en este caso caracterizado de tres manesas.

Si el valor p obtenido del ANOVA es menor que el nivel de significancia (por ejemplo, 0.05), se rechaza la hipótesis nula y se concluye que al menos una de las medias de los grupos es significativamente diferente.

3.7.2. Regresión Lineal Simple

“La regresión lineal simple es una técnica estadística utilizada para modelar la relación entre una variable dependiente y una variable independiente. El objetivo es ajustar una línea recta que minimice la suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores observados y los valores predichos.” (Kutner, Nachtsheim, & Neter, 2004, p. 78)

Esta técnica se utilizará para modelar la relación entre la temperatura de la mezcla asfáltica (variable independiente) y sus propiedades mecánicas (variable dependiente).

• **Regresión Lineal Simple:** Se ajustará una línea recta que mejor describa la relación entre dos variables. La ecuación de la línea será de la forma $Y = a + bX$, donde “Y” es el comportamiento mecánico de la carpeta asfáltica y “X” es la temperatura del mezclado.

Los coeficientes de la regresión indican la dirección y la magnitud del impacto de cada variable independiente en la variable dependiente. Un coeficiente significativamente diferente de cero indica una relación estadísticamente significativa.

3.7.3. Pruebas T de Student

“La prueba t de Student se utiliza para comparar las medias de dos grupos para determinar si las diferencias observadas son estadísticamente significativas. Esta técnica es especialmente útil en experimentos controlados donde se comparan dos condiciones o tratamientos.” (Field, 2018, p. 225)

Se usarán las pruebas t de Student para comparar las medias de dos grupos y determinar si existe una diferencia significativa.

- **Prueba t de Student para muestras independientes:** Compara las medias de dos grupos independientes (por ejemplo, carpeta asfáltica con temperatura del rango preestablecido y carpeta asfáltica con temperaturas variadas).

3.8. Desarrollo del Trabajo

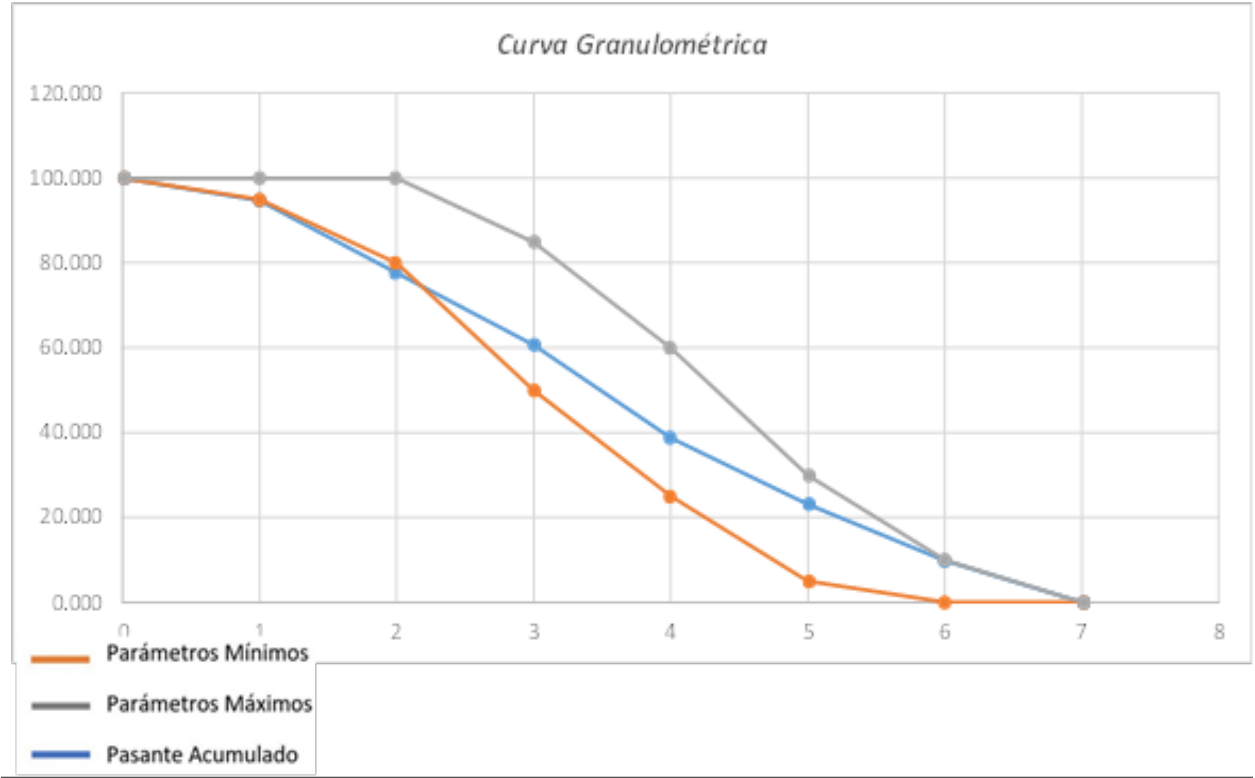
3.8.1. Estudio Granulométrico

El estudio granulométrico del agregado es el análisis que determina la distribución de tamaños de las partículas que lo componen, mediante el uso de tamices de diferentes aberturas. Este estudio permite conocer cómo se distribuyen los tamaños desde las partículas más finas hasta las más gruesas en una muestra. Cuyo uso sirve para diseñar mezclas con la proporción adecuada de partículas finas y gruesas, logrando una mejor compactación, menor cantidad de vacíos y mayor estabilidad. En mezclas asfálticas y de concreto, una granulometría bien controlada mejora la resistencia, durabilidad y trabajabilidad del material, reduciendo problemas como fisuras, ahuellamiento o desprendimientos.



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO

Proyecto: Trabajo semestral de Pavimentos.			Norma: NTP 400.037			
Solicitante: Ing. Hemerson Lizarbe Alarcón.			Muestra: 1000 g			
Material: Piedra chancada.			Fecha de Muestreo: 25 de junio del 2025.			
Procedencia: Cantera "La moderna"			Fecha del ensayo: 27 de junio del 2025.			
TAMIZ ASTM	Abertura	Peso(g) Retenido	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado	% Que pasa	Datos de análisis granulométrico
3/4"	19.05	0	0.00	0.00	100.00	Peso de la muestra: 1000g Peso seco: 979 g
1/2"	12.7	58	5.80	5.80	94.20	
3/8"	9.525	81	8.10	13.90	86.10	
N°4	4.76	229	22.90	36.80	63.20	
N°10	2	278	27.80	64.60	35.40	
N°40	0.426	200	20.00	84.60	15.40	
N°80	0.18	74	7.40	92.00	8.00	
N°200	0.074	20	2.00	94.00	6.00	
FONDO		60	6.00	100.00	0.00	



3.8.2. Diseño de Mezcla

El diseño de mezcla asfáltica es un componente clave para asegurar que el pavimento flexible tenga la resistencia y durabilidad requeridas frente a las cargas de tránsito y condiciones ambientales. En el contexto de esta investigación, el diseño de la mezcla es especialmente relevante porque define las proporciones de agregados y ligante asfáltico que, combinadas con la temperatura de mezclado y colocación, determinan las propiedades mecánicas finales del pavimento. Una mezcla bien diseñada pero mal manejada térmicamente puede perder cohesión, presentar vacíos excesivos o deformarse bajo carga, lo que hace esencial comprender sus parámetros para evaluar la influencia de la temperatura en su desempeño.

Debido a la complejidad de esta, tomamos como referencia el prediseño de la mezcla asfáltica en caliente método Marshall – ASTM D-1559, que ha sido elaborado por el Laboratorio N° 2 – Mecánica de Suelos y Pavimentos de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería a solicitud del CONSORCIO LA MAR (NORCA EIRL – GEOCONSULT S.A.). Esto, para la ejecución del proyecto “Mejoramiento de la carreta departamental Ay-102 Tambo- San Miguel en la región Ayacucho”. Este estudio se adjunta como el Anexo N°1 de esta investigación y a continuación presentamos la dosificación para una briqueta de 1200 g de mezcla asfáltica en caliente.

Tabla 04: Dosificación de materiales para la mezcla asfáltica

<i>Dosificación para una briqueta de 1200 g.</i>			
		1200	Para 12 muestras
Grava o piedra chancada de 1/2"	36.90%	442.8	5313.6
Arena gruesa	56.70%	680.4	8164.8
Arena fina	0.90%	10.8	129.6
Asfalto	5.50%	66	792
	100.00%	1200	

Fuente: Creación propia.

3.8.3. Registro Fotográfico del Proceso de Ensayos

En esta sección se detalla los ensayos y procedimientos realizados en laboratorio. A través de las fotografías, se ilustra las metodologías empleadas en el presente trabajo.

Con la finalidad de cumplir nuestro primer objetivo, que consiste en evaluar la variación de la resistencia a la deformación permanente o ahuellamiento de mezclas asfálticas fabricadas a diferentes temperaturas de mezclado, mediante el ensayo de estabilidad Marshall; procedimos a obtener nuestras muestras correspondientes con la dosificación anteriormente detallada.

Figura 2: Pesado de piedra chancada de ½” para la Muestra 1.



Fuente: Creación propia.

Figura 3: Pesado de arena gruesa para la Muestra 1.



Fuente: Creación propia.

Figura 4: Pesado de arena fina para la Muestra 1.



Fuente: Creación propia.

Figura 5: Preparación y fraccionamiento de asfalto en proporciones para las muestras correspondientes.



Fuente: Creación propia.

Figura 6: Pesado del asfalto PEN 85/100 para la Muestra 1.



Fuente: Creación propia.

Figura 7: Componentes para la Muestra 1.



Fuente: Creación propia.

Figura 8: Pesado de piedra chancada de ½" para la Muestra 2.



Fuente: Creación propia.

Figura 9: Pesado de arena gruesa para la Muestra 2.



Fuente: Creación propia.

Figura 10: Pesado de arena fina para la Muestra 2.



Fuente: Creación propia.

Figura 11: Pesado del asfalto PEN 85/100 para la Muestra 2.



Fuente: Creación propia.

Siguiendo la misma dinámica se hizo el pesado de los componentes de las 3 muestras, para cumplir el objetivo 1, como a continuación se muestra.

Figura 12: Componentes para la Muestra 2.



Fuente: Creación propia.

Figura 13: Componentes para la Muestra 3.



Fuente: Creación propia.

Figura 14: Combinación de los componentes de las Muestras 1, 2 y 3.



Fuente: Creación propia.

Con la finalidad de cumplir nuestro segundo objetivo, que consiste en analizar el efecto de la temperatura de mezclado sobre la resistencia a la humedad de la mezcla asfáltica, utilizando el ensayo de retención de adhesividad según ASTM D3625; procedimos a obtener nuestras muestras correspondientes con la dosificación anteriormente detallada. Cabe recalcar que se ha trabajado con 250 g de la combinación de los componentes de los 1200 g de muestra y con la siguiente dosificación de asfalto.

Tabla 05: Dosificación de materiales para el ensayo de retención de adhesividad según ASTM D3625 de 250 g.

<i>Dosificación para ensayo de retención de adhesividad según ASTM D3625 de 250g</i>			
		250	Para 3 muestras
Grava o piedra chancada 1/2"	36.90%	92.25	276.75
Arena gruesa	56.70%	141.75	425.25
Arena fina	0.90%	2.25	6.75
Asfalto	5.50%	13.75	41.25
	100.00%	250	750

Fuente: Creación propia.

Figura 15: Componentes para la Muestra 4.



Fuente: Creación propia.

Figura 16: Componentes para la Muestra 5.



Fuente: Creación propia.

Figura 17: Componentes para la Muestra 6.



Fuente: Creación propia.

Figura 18: Combinación de los componentes de las Muestras 1, 2, 3, 4, 5 y 6.



Fuente: Creación propia.

Figura 20: 3 muestras de 250 g de la combinación de los componentes de las Muestras 4, 5 y 6.



Fuente: Creación propia.

Figura 21: Pesado de 13.75 g de asfalto PEN 85/100 para las Muestras 4,5 y 6.



Fuente: Creación propia.

➤ PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO 1: ESTABILIDAD MARSHALL

Al tener las muestras debidamente pesadas de acuerdo a la dosificación prevista, pasamos a realizar nuestras mezclas asfálticas a diferentes temperaturas, empleando una cocina convencional y un termómetro de laboratorio.

Figura 22: Secado y calentamiento de los componentes pétreos de la muestra para la briqueta 1, a una temperatura controlada de 185 °C.



Fuente: Creación propia.

Figura 23: Acondicionamiento térmico y mezclado homogéneo de los componentes de la muestra para la briqueta 1, a una temperatura controlada de 185 °C, con la ayuda de un termómetro de laboratorio, tazones de acero, espátulas y guantes.



Fuente: Creación propia.

Figura 24: La mezcla asfáltica, previamente calentada y homogeneizada, se vierte cuidadosamente en el molde metálico cilíndrico previamente tratado con agente desmoldante, petróleo, para evitar adherencias



Fuente: Creación propia.

Figura 25: Compactación de 75 golpes por cara empleando el martillo de compactación Marshall.



Fuente: Creación propia.

Figura 26: Secado y calentamiento de los componentes pétreos de la muestra para la briqueta 2, a una temperatura controlada de 145 °C.



Fuente: Creación propia.

Figura 27: Mezclado homogéneo de los componentes de la muestra para la briqueta 2, a una temperatura controlada de 145 °C, con la ayuda de un termómetro de laboratorio, tazones de acero, espátulas y guantes.



Fuente: Creación propia.

Figura 28: Compactación de 75 golpes por cara empleando el martillo de compactación Marshall.



Fuente: Creación propia.

Figura 29: Secado y calentamiento de los componentes pétreos de la muestra para la briqueta 3, a una temperatura controlada de 125 ° C.



Fuente: Creación propia.

Figura 30: Mezclado homogéneo de los componentes de la muestra para la briqueta 3, a una temperatura controlada de 125 °C, con la ayuda de un termómetro de laboratorio, tazones de acero, espátulas y guantes.



Fuente: Creación propia.

Figura 31: Compactación de 75 golpes por cara empleando el martillo de compactación Marshall.



Fuente: Creación propia.

Figura 32: Reposo durante un período de 24 horas a temperatura ambiente de las briquetas 1, 2 y 3, en sus respectivos moldes de acero.





Fuente: Creación propia.

➤ PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO 2: RETENCIÓN DE ADHESIVIDAD SEGÚN ASTM D3625

Este ensayo permite evaluar la resistencia de la adhesión entre el ligante asfáltico y el agregado frente a la acción del agua, utilizando el método del agua hirviendo. Su objetivo principal es identificar el grado de susceptibilidad al fenómeno de stripping, que se manifiesta como la pérdida de adhesividad en presencia de humedad.

Figura 33: Acondicionamiento térmico y mezclado homogéneo de los componentes de la muestra representativa de 250 g de la muestra 4, a una temperatura controlada de 145 °C.



Fuente: Creación propia.

Figura 34: Se calienta agua en un recipiente metálico hasta alcanzar ebullición (100 °C).



Fuente: Creación propia.

Figura 35: Se añade la mezcla homogénea, mezclada a 145°C , una vez enfriada a los 85°C , al agua hirviendo.



Fuente: Creación propia.

Figura 36: Se deja hirviendo junto a la mezcla asfáltica durante 10 minutos.



Fuente: Creación propia.

Figura 37: Acondicionamiento térmico y mezclado homogéneo de los componentes de la muestra representativa de 250 g de la muestra 5, a una temperatura controlada de 125 °C.



Fuente: Creación propia.

Figura 38: Se añade la mezcla homogénea, mezclada a 125° C, una vez enfriada a los 85°C, al agua hirviendo.



Fuente: Creación propia.

Figura 39: Acondicionamiento térmico y mezclado homogéneo de los componentes de la muestra representativa de 250 g de la muestra 6, a una temperatura controlada de 185 °C.



Fuente: Creación propia.

Figura 40: Se añade la mezcla homogénea, mezclada a 185° C, una vez enfriada a los 85°C, al agua hirviendo y se deja ahí durante 10 minutos.



Fuente: Creación propia.

Figura 41: Condiciones finales de la resistencia de la adhesión entre el ligante asfáltico y el agregado frente a la acción del agua, a 3 temperatura de mezclado, 125° C, 145° C y 185°C para su posterior análisis y evaluación.



Fuente: Creación propia.

4. RESULTADOS

4.1. Análisis e Interpretación

4.1.1. Análisis e interpretación de los resultados del ensayo de Estabilidad Marshall

Figura 42: Desmoldeo de las probetas de las tres muestras preparadas a diferentes temperaturas, 125° C, 145° C y 185°C.



Fuente: Creación propia.

El proceso del desmoldeo se ha desarrollado de manera fácil y satisfactoria debido a que se usó el petróleo, como agente desmoldante, antes de vaciar la mezcla en los moldes correspondientes. Posteriormente, colocamos las probetas en el Baño María.

Figura 43: Sumersión de las probetas de las tres muestras preparadas a diferentes temperaturas, 125° C, 145° C y 185°, al Baño María, previamente calentado a 60 °C, durante 40 minutos.



Fuente: Creación propia.

La sumersión de las probetas Marshall en un baño María a 60 °C durante 40 minutos se realiza para simular las condiciones térmicas reales que experimenta un pavimento en servicio. Este proceso permite uniformar la temperatura en toda la probeta, garantizar la reproducibilidad del ensayo y evaluar adecuadamente el comportamiento viscoelástico del asfalto bajo carga. Así se obtiene una medición confiable de la estabilidad y fluencia de la mezcla asfáltica.

A continuación, se retira las probetas del baño María y se coloca inmediatamente en el equipo Marshall, entre dos platos de prueba, con el objetivo de aplicar la carga axial hasta que la muestra falle; de esta manera se identifica la carga máxima que soporta la probeta.

Figura 44: Carga máxima que soporta la probeta 3, medida en kg*f, preparado a una temperatura de 125° C.



MUESTRA N° 03
T=125°C
2956.70 kgf

Fuente: Creación propia

Figura 45: Proceso de ensayo de estabilidad Marshall de la probeta 2, cuya carga máxima que soportó fue de 4150.2 kg*f, preparado a una temperatura de 145° C.



MUESTRA N° 02
T=145°C
4150.20 kgf

Fuente: Creación propia

Figura 46: Carga máxima que soporta la probeta 1, medida en kg*f, preparado a una temperatura de 185° C.



MUESTRA N° 01
T=185°C
3036.30 kgf

Fuente: Creación propia

Para el respectivo análisis e interpretación de los resultados, presentamos el procesamiento de datos en las siguientes tablas:

Tabla 06: Dimensiones de la muestra N°01.

MUESTRA N° 01		
T=185°C		
N°	Altura (mm)	Diámetro (mm)
1	66.14	103.01
2	67.80	102.43
3	67.31	101.95

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 07: Dimensiones de la muestra N°02.

MUESTRA N° 02		
T=145°C		
N°	Altura (mm)	Diámetro (mm)
1	66.27	101.43
2	66.01	101.61
3	66.14	100.7

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 08: Dimensiones de la muestra N°03.

MUESTRA N° 03		
T=125°C		
N°	Altura (mm)	Diámetro (mm)
1	66.81	101.51
2	67.07	101.72
3	67.19	100.95

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 09: Resultados del ensayo de Estabilidad Marshall.

Muestra	Temperatura de mezclado	Espesor promedio (mm)	Diámetro promedio (mm)	Estabilidad Máx. (kg)
N° 01	185°C	67.08	102.46	309.62
N° 02	145°C	66.14	101.25	423.20
N° 03	125°C	67.02	101.39	301.50

Fuente: Elaboración propia.

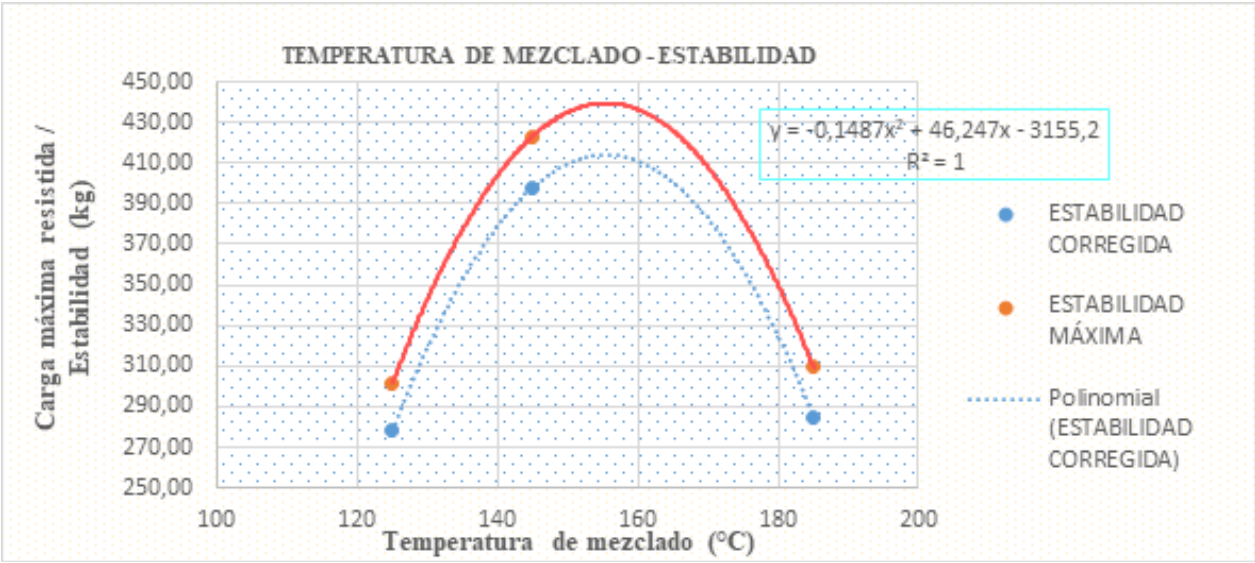
De lo anterior, se calcula su diámetro y altura promedio de las 3 probetas respectivamente. Además, se hace la conversión de carga máxima resistida en kg*f a kg, considerando la gravedad de 9.81 kg/cm².

Tabla 10: Carga máxima resistida o estabilidad corregida con los factores de estabilidad de correlación A, DEL Manual de Ensayo de MTC.

Factor de correlación	Estabilidad corregida (kg)
0.9205	285.00
0.9405	398.02
0.9220	277.98

Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 01: Curva de relación entre la estabilidad y la temperatura de mezclado.



Fuente: Elaboración propia.

La gráfica titulada “Temperatura de mezclado vs. Estabilidad” representa la relación entre la temperatura de mezclado de una mezcla asfáltica y su resistencia medida como estabilidad Marshall. En el eje horizontal se presenta la temperatura de mezclado (°C), y en el eje vertical la carga máxima resistida por la probeta (kg). Se incluyen dos conjuntos de datos: la estabilidad corregida (puntos azules) y la estabilidad máxima observada (puntos naranjas), ambas acompañadas por la curva de tendencia polinómica.

El comportamiento mostrado por las curvas es parabólico invertido, lo que evidencia que la estabilidad no crece de forma lineal con el aumento de temperatura, sino que existe una temperatura óptima de mezclado a la cual la mezcla asfáltica alcanza su máxima resistencia. En este caso, dicha temperatura óptima se encuentra alrededor de los 155 °C a 160 °C, según lo indicado por

el vértice de la curva roja (estabilidad máxima). Esta zona corresponde al punto donde se obtiene un equilibrio ideal entre la viscosidad del ligante asfáltico y la trabajabilidad de la mezcla.

A 125 °C, se observa que la mezcla presenta una baja estabilidad, lo cual se atribuye a la insuficiente fluidez del ligante, que impide una compactación adecuada y una correcta adherencia entre los agregados. Aumentando la temperatura a 145 °C, la mezcla mejora notablemente su estabilidad, acercándose al valor máximo. Sin embargo, al llegar a 185 °C, la estabilidad vuelve a disminuir, lo que se debe a la excesiva fluidez del ligante que puede provocar pérdida de estructura interna, mayor desplazamiento de los agregados y riesgo de segregación. Esta caída en la resistencia a altas temperaturas confirma que una temperatura elevada no garantiza mejor comportamiento mecánico.

Cabe resaltar que la ecuación de la curva polinómica de la estabilidad máxima es $y = -0.1487x^2 + 46.247x - 3155.2$, con un coeficiente de determinación $R^2 = 1$, lo que indica un ajuste perfecto a los datos experimentales. Este resultado da alta confiabilidad al análisis de tendencia y a la determinación del punto óptimo de temperatura.

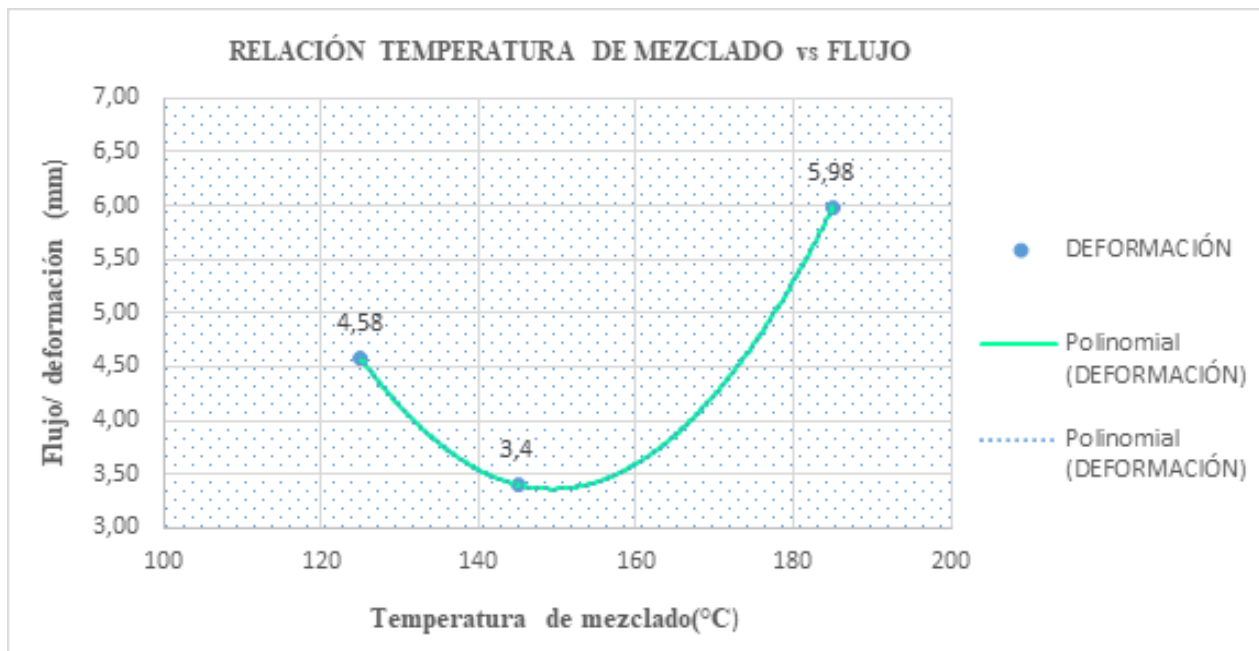
En síntesis, la gráfica demuestra que la temperatura de mezclado tiene un efecto directo y significativo en la estabilidad Marshall. Existen rangos térmicos que deben respetarse para garantizar que la mezcla asfáltica presente un buen desempeño mecánico. Mezclar a temperaturas fuera del rango óptimo, como 125 °C o 185 °C, puede comprometer seriamente la durabilidad del pavimento. Por ello, controlar adecuadamente este parámetro en planta y durante la ejecución es fundamental para asegurar la calidad de la mezcla y la vida útil de la estructura vial.

Tabla 11: Resultados del flujo Marshall.

Muestra	Temperatura de mezclado	Flujo (mm)	Factor de correlación	Flujo corregido (mm)
N° 01	185°C	5.98	0.9205	5.50
N° 02	145°C	3.4	0.9405	3.20
N° 03	125°C	4.58	0.9220	4.22

Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 02: Curva de relación entre la temperatura de mezclado y el flujo o deformación.



Fuente: Elaboración propia.

La gráfica muestra una relación no lineal entre la temperatura de mezclado de la mezcla asfáltica (eje X) y la deformación Marshall o flujo (eje Y), expresada en milímetros. Se evidencia una curva con tendencia en forma de “U”, que refleja un punto mínimo de deformación alrededor de los 145 °C, y valores más elevados a 125 °C y 185 °C. Este comportamiento indica que la temperatura de mezclado tiene un impacto directo en la capacidad de la mezcla para resistir deformaciones bajo carga.

A 125 °C, la mezcla presenta un flujo de aproximadamente 4.6 mm, lo cual puede estar asociado a una mezcla poco trabajable, con agregados posiblemente mal recubiertos debido a la alta viscosidad del ligante asfáltico a esa temperatura. Esta condición genera una matriz frágil y menos cohesiva, que ante la carga produce una deformación considerable. Por otro lado, a 185 °C, aunque la mezcla se vuelve muy fluida, el flujo asciende a valores superiores a 5.98 mm, lo cual es aún más desfavorable. Esto se debe a que el asfalto pierde capacidad de cohesión por exceso de fluidez, facilitando deformaciones excesivas por plastificación de la mezcla. Ambas condiciones representan

riesgos para el comportamiento a largo plazo del pavimento, principalmente en forma de ahuellamiento y fluencia plástica.

El punto óptimo identificado se da a 145 °C, donde la deformación es mínima, aproximadamente 3.2 mm, y se encuentra dentro del rango recomendado por el Manual de Carreteras del MTC (2.0 a 4.0 mm) y la norma ASTM D6927, que establecen ese intervalo como el aceptable para mezclas asfálticas en caliente. En este punto, la mezcla tiene suficiente temperatura para permitir un buen recubrimiento y compactación de los agregados, sin llegar a niveles que disminuyan su cohesión interna. Este equilibrio térmico garantiza una respuesta estructural adecuada, con buen desempeño frente a cargas de tránsito sin riesgo de deformaciones permanentes.

En resumen, el análisis del gráfico demuestra que el flujo Marshall sirve como un indicador clave de la flexibilidad y resistencia plástica de la mezcla asfáltica. Valores elevados de flujo, como los que se obtienen a temperaturas muy bajas o muy altas, indican un comportamiento indeseable en servicio, mientras que valores moderados, dentro del rango normativo, reflejan una mezcla bien diseñada y óptimamente trabajada. Este análisis resalta la importancia de controlar rigurosamente la temperatura de mezclado durante la producción de mezclas asfálticas, ya que una selección inadecuada puede derivar en fallas prematuras del pavimento como ahuellamiento, fisuración o pérdida de estabilidad estructural.

4.1.2. Análisis e interpretación de los resultados del ensayo de retención de adhesividad según ASTM D3625

Figura 47: Condiciones finales de la resistencia de la adhesión entre el ligante asfáltico y el agregado frente a la acción del agua, a 3 temperatura de mezclado, 125° C, 145° C y 185° C para su análisis y evaluación.



Fuente: Creación propia.

En este ensayo, se evaluó la adherencia del asfalto al agregado luego de someter las muestras a inmersión en agua hirviendo. Las diferencias visuales observadas entre las tres muestras reflejan cómo la temperatura de mezclado influye en la capacidad del ligante para adherirse y mantenerse unido a los agregados bajo condiciones de humedad severa.

Muestra 5 (izquierda, 125 °C):

Se observa un ligero desprendimiento del asfalto, lo que indica una adhesividad deficiente. Esta temperatura de mezclado es relativamente baja, lo que puede provocar que el asfalto no fluya ni recubra completamente los

agregados durante la mezcla. Además, la alta viscosidad del ligante a esta temperatura puede limitar su capacidad de penetración en la textura superficial del agregado, favoreciendo el desprendimiento ante la presencia de agua. Esto sugiere una mayor susceptibilidad al stripping en condiciones reales de servicio, sobre todo en zonas húmedas o con tránsito pesado.

Muestra 4 (central, 145 °C):

No se observan desprendimientos visibles de asfalto, lo que indica una excelente retención de adhesividad. Esta temperatura parece ser la óptima para lograr una adecuada cobertura de los agregados y una fuerte interacción físico-química entre el asfalto y la superficie pétreo. El ligante logra un equilibrio ideal entre fluidez y cohesión, lo que se traduce en una mezcla menos vulnerable al daño por humedad. Esta muestra representa las condiciones ideales de mezclado, cumpliendo con los estándares establecidos por la norma ASTM D3625 y el Manual de Carreteras del MTC.

Muestra 6 (derecha, 185 °C):

Se observa asfalto flotante o desprendido en el agua, lo que indica un exceso de temperatura durante la mezcla. A esta temperatura, el asfalto puede volverse demasiado fluido, reduciendo su viscosidad hasta un punto donde ya no se adhiere adecuadamente al agregado. Esto genera un recubrimiento superficial débil y fácilmente alterable por la acción del agua. Además, las altas temperaturas pueden deteriorar los componentes volátiles del ligante, comprometiendo su capacidad de adherencia. Este comportamiento refleja una adhesividad inestable, con riesgo elevado de fallas por desprendimiento en campo.

5. CONCLUSIONES

5.1. Conclusiones

5.1.1. Conclusión del objetivo general

- Evaluando las propiedades mecánicas de la carpeta asfáltica como la estabilidad o carga máxima que puede resistir la probeta, la deformación bajo la aplicación de carga, la evaluación de la retención de la adhesividad bajo condición extremas de humedad, se sintetiza determinando que la temperatura óptima es de 145° C, cuyo rango evaluado con la curva de tendencia puede ir de 150 °C a 165°C.
- Temperaturas por debajo de este rango generan mezclas con deficiente compactación y baja cohesión interna, mientras que temperaturas superiores comprometen la resistencia estructural y durabilidad frente a la humedad, debido a la excesiva fluidez del asfalto.

5.1.2. Conclusión del objetivo específico 1

- Respecto a la resistencia a la deformación permanente (estabilidad Marshall), se observó que la mezcla fabricada a 145 °C alcanzó la mayor estabilidad, con un valor de 4150.2 kg*f, lo que indica una excelente cohesión interna y capacidad de resistir cargas aplicadas. A 125 °C, la estabilidad fue de solo 2956.7 kg*f, debido a la insuficiente fluidez del ligante asfáltico, lo que dificultó la compactación. Por otro lado, a 185 °C la estabilidad alcanzó 3036.3 kg*f, posiblemente por la excesiva fluidez del asfalto que provocó pérdida de resistencia estructural.
- Estos rangos térmicos deben respetarse para garantizar que la mezcla asfáltica presente un buen desempeño mecánico. Mezclar a temperaturas fuera del rango óptimo, como 125 °C o 185 °C, puede comprometer seriamente la durabilidad del pavimento. Por ello, controlar adecuadamente

este parámetro en planta y durante la ejecución es fundamental para asegurar la calidad de la mezcla y la vida útil de la estructura vial.

- Esta investigación demuestra que el flujo Marshall sirve como un indicador clave de la flexibilidad y resistencia plástica de la mezcla asfáltica. Valores elevados de flujo, como los obtenidos bajo las temperaturas de mezclado 125 °C y 185°, indican un comportamiento indeseable en servicio, mientras que valores moderados, dentro del rango normativo, reflejan una mezcla bien diseñada y óptimamente trabajada. Con una temperatura de mezclado de 145°C se muestra un equilibrio entre la resistencia y la flexibilidad óptima del concreto asfáltico, cuyo valor de 3.6 mm está dentro del rango estipulado por el ASTM D6927 (2–4 mm).

5.1.3. Conclusión del objetivo específico 2

- El ensayo de retención de adhesividad (ASTM D3625) mostró resultados visuales que respaldan el comportamiento mecánico observado. A 125 °C, se evidenció desprendimiento parcial del asfalto en la superficie del agregado, lo que implica una deficiente humectación inicial y una menor resistencia a la humedad. A 145 °C, la muestra presentó adherencia completa, sin signos de desprendimiento, lo cual refleja un óptimo nivel de cohesión y resistencia al stripping. En contraste, a 185 °C se observó flotación del ligante asfáltico, indicando pérdida de adhesión debido a una viscosidad demasiado baja y un recubrimiento inestable.

5.2. Recomendaciones

Se presentan algunas recomendaciones para el resultado satisfactorio de la investigación:

- Manipular y producir las probetas de la mezcla asfáltica en caliente, usando guantes quirúrgicos y mascarillas para evitar daños en la salud.
- Realizar los ensayos respectivos en laboratorio para clasificar y evaluar la calidad del material pétreo en laboratorio tales como granulometría, la prueba de abrasión de Los Ángeles, etc.

- Usar fuentes bibliográficas confiables para respaldar el aspecto teórico del tema de investigación.
- Elegir un tema de investigación cuyo desarrollo se pueda realizar en el laboratorio de la universidad, dado que lo contrario genera gastos mayores para el estudiante.

5.3. Trabajos Futuros

Si bien es cierto, esta investigación solo trabajó con 6 muestras representativas a diferentes temperaturas para sus dos ensayos de laboratorio, es de interés común seguir desarrollando trabajos futuros en base a esta investigación, como:

- Estimar el rango óptimo de temperatura de mezclado, utilizando mayor cantidad de probetas a diferentes temperaturas, se sugiere que pueda ser mayor a los 35, teniendo controlada variables como la temperatura ambiente y la temperatura de los equipos metálicos, que se usan a la hora de la compactación.

6. BIBLIOGRAFÍA

Davidović, N., Bonić, Z., & Prolović, V. (2012). *Waste glass as additive to clayey material in Subgrade and embankment of road pavement* (Vol. Architecture and Civil Engineering 10).

AASHTO. (2017).

Alhassan, A., Yashal, E., & Majid, A. (2023). *Environmental Impact of Recycled Glass in Soil Stabilization*.

Arellano Loayza, L. L., & Cáceres Candia, C. S. (2018). *Importancia de la evaluación a las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas en caliente a más de 3000 msnm para el proyecto carretera desvío Imperial-Pampas*. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC).

Asphalt Institute. (2007).

Asphalt Institute. (2007).

Asphalt Institute. (2014). *MS-2 Métodos de diseño de mezclas asfálticas*. Lexington, KY.

Asphalt-Institute. (2007). *MANUAL DEL ASFALTO. MANUAL DEL ASFALTO*.

Builes, J., Pérez, E., & Romero, C. (2019). *missions from the Lime Industry: A Comprehensive Review*.

Carhuapoma Najarro, C., & Tito Sánchez, J. (2021). *Propuesta de mejora del comportamiento mecánico de pavimentos flexibles mediante la aplicación de polvo de fibra de vidrio reciclado sobre subrasante arcillosa de baja plasticidad aplicada al tramo I de la carretera Rodríguez de Mendoza, Amazonas - Perú*. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC).

Cerna Vasquez, M. A. (2021). *Adición de polvo de vidrio reciclado en la estabilización de suelos en el AA.HH. Villa Hermosa, Nuevo Chimbote (Perú). Revista Agunkuyaa*.

Chalabi, Z., & Mott, J. (2014). *Energy Use in Glass Production*.

Fernández, L., & Morales, R. (2020). *Impact of Lime Application on Soil Chemistry*.

García, J., López, A., & Soto, M. (2021). *Environmental Impact of Silica Sand Extraction in Coastal Regions*.

Gheju, M. (2011). *Stabilization of clayey soils with lime*.

Gheju, M. (2011). *Stabilization of clayey soils with lime. Journal of Materials in Civil Engineering*.

González, P., Martínez, J., & Rodríguez, L. (2023). Sostenibilidad en la estabilización de suelos: una revisión de alternativas ecológicas. *revista de Ingeniería Ambiental*.

Haro Marchena, L. M., Cerna Vásquez, M. A., & Valdivivieso Velarde, A. Y. (2021). Adición de polvo de vidrio reciclado en la estabilización de suelos en el asentamiento humano Villa Hermosa, Nuevo Chimbote. *Agunkuya*, 25.

Haro Marchena, L., Cerna Vásquez, M. A., & Valdivieso Velarde, A. Y. (2021). Adición de polvo de vidrio reciclado en la estabilización de suelo en el asentamiento humano de Villa Hermosa, Nuevo Chimbote. *Revista Agunkuyâa*.

Huamán, D. J. (2021). USO DEL CONCRETO Y VIDRIO RECICLADO EN LA CAPACIDAD DE CARGA DE SUELOS ARCILLOSOS: UNA REVISIÓN LITERARIA. *Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo*, 14.

Huang. (2004). *Pavement Analysis and Design*.

IMT. (s.f.). *imt.mx*. Obtenido de <https://www.imt.mx/archivos/publicaciones/publicaciontecnica/pt267.pdf>

Instituto Geofísico del Perú. (2022). *Evaluación de la calidad del suelo en zonas sísmicas*.

Jones, D. (2018). *imestone Extraction and Biodiversity: An Environmental Perspective*.

Kahn, M. (2020). Energy Consumption and CO₂ Emissions in the Lime Production Process.

Kazmi, D., Williams, D., & Serati, M. (2020). Waste glass in civil engineering applications. *International Journal of Applied Ceramic Technology*.

Kucera, P. L. (2021). The feasibility of using asphalt concrete with a high percentage of recycled asphalt material in a railway trackbed layer. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020>.

Mendoza, A., & Torres, C. (2021). Estabilización de suelos mediante aditivos ecológicos: un enfoque sostenible. *Revista de Ingeniería Civil*.

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS Y COMUNICACIONES. (2016). IDENTIFICACIÓN DE FALLAS EN PAVIMENTOS Y TÉCNICAS DE REPARACIÓN. *DIRECCIÓN GENERAL DE REGLAMENTOS Y SISTEMAS*, 212.

Ministerio del Ambiente. (29 de 03 de 2024). *gob.pe*. Obtenido de *gob.pe*: <https://www.gob.pe/institucion/minam/noticias/927317-minam-realiza-campa-na-recicla-ya-en-ayacucho-por-semana-santa>

Ministerio del Ambiente. (2024). *Informe sobre el impacto ambiental de aditivos químicos en la estabilización de suelos*. Lima, Perú.

Monja, B. B. (2022). *Estabilización de suelos arcillosos usando vidrio reciclado molido para su*. Obtenido de *tesis.usat.edu.pe*: https://tesis.usat.edu.pe/bitstream/20.500.12423/5368/8/TL_SoberonMonjaBrayan.pdf

Mosa, A. (2017). MODIFICATION OF SUBGRADE PROPERTIES USING WASTE MATERIAL.

MTC. (s.f.). MANUAL DE CARRETERAS. *SECCIÓN SUELOS Y PAVIMENTOS*.

Néstor Huamán Guerrero, Carlos M. Chang Albitres. (s.f.). LA DEFORMACIÓN PERMANENTE EN LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS Y EL CONSECUENTE DETERIORO DE LOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS EN EL PERÚ.

Nirmala, R., & Shanmugapriya, M. (2017). Feasibility Study on Enhancing the Properties of Subgrade Material using Waste Glass. *Int J Chem Sci*.

Recycling Council of Alberta. (2021). *The Benefits of Glass Recycling*.

Rodríguez Moran, M. Á. (2020). *Efecto del diferencial de temperatura agregado - asfalto en la adherencia y estabilidad de la mezcla asfáltica para parches*. HUANCAYO.

Safa, Y. A., & Abed, M. S. (2020). *A study on the effect of lime stabilization on the engineering properties of clay soil*. International Journal of Civil Engineering and Technology.

Sato, T., Nakazawa, K., & Suzuki, H. (2022). *Life Cycle Assessment of Hydrated Lime Production*.

Silmin Iberica. (27 de 07 de 2005). *optimusferreteria.com*. Obtenido de optimusferreteria.com:https://www.optimusferreteria.com/resources/documents/9696228_FS.pdf

Sinha, A., & Raghavan, V. (2015). Carbon Footprint of Glass Production.

TÉLLEZ Rodolfo. (s.f.). *instituto mexicano del transporte*. Obtenido de <https://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=361&IdBoletin=134#:~:text=El%20pavimento%20por%20definici%C3%B3n%2C%20es,su%20vida%20%C3%BAtil%20de%20servicio>.

Vargas Malpartida, E. J. (2019). Efecto de la temperatura de mezcla-compacción y la distancia de transporte en las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica en caliente en la región Centro. HUANCAYO.

SOBRE LOS AUTORES

Hemerson Lizarbe Alarcón

Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3682-7061>

E-mail: hemerson.lizarbe@unsch.edu.pe

Edward León Palacios

Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4305-9582>

email: edward.leon@unsch.edu.pe

Edwin Carlos Garcia Saez

Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5760-3070>

E-mail: edwin.garcia@unsch.edu.pe

Yober De La Cruz Morales

Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1937-0875>

E-mail: yober.delacruz@unsch.edu.pe

INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DE LA MEZCLA ASFÁLTICA EN EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE

www.arcoeditores.com
contato@arcoeditores.com
(55)99723-4952

