



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



**INFLUENCIA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y
DURABILIDAD DE LA MEZCLA ASFÁLTICA CON SUSTITUCIÓN
PARCIAL DE POLIESTIRENO EXPANDIDO**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. MHAYER QUISPE ASLLA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO CIVIL

PUNO – PERÚ

2023



NOMBRE DEL TRABAJO

INFLUENCIA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y DURABILIDAD DE LA MEZCLA ASFÁLTICA CON SUSTITUCIÓN PARCIAL

AUTOR

MHAYER QUISPE ASLLA

RECuento de palabras

34749 Words

RECuento de caracteres

189044 Characters

RECuento de páginas

179 Pages

Tamaño del archivo

3.1MB

Fecha de entrega

Jul 31, 2023 8:44 AM GMT-5

Fecha del informe

Jul 31, 2023 8:46 AM GMT-5

● **15% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos

- 12% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 10% Base de datos de trabajos entregados
- 1% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● **Excluir del Reporte de Similitud**

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 10 palabras)



Firmado digitalmente por CASTILLO ARONI Emilio FAU 20145496170 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 31.07.2023 09:11:16 -05:00

V°B°

Firmado digitalmente por CASTILLO ARONI Emilio FAU 20145496170 soft
Motivo: Doy V°B°
Fecha: 31.07.2023 09:11:54 -05:00

Resumen



DEDICATORIA

Expreso mi agradecimiento a Dios por guiarme hacia el camino correcto, brindándome sabiduría y fuerza para enfrentar cada día. Dedico este logro a mis queridos padres, Vicente y Ubaldina, quienes me brindaron un apoyo incondicional a lo largo de mi camino de ser profesional. A mis hermanos Jefferson y Johan Fernando por compartir este camino conmigo. A todos ellos, les ofrezco mi profundo aprecio y respeto.

Mhayer Quispe Aslla



AGRADECIMIENTO

A la prestigiosa Universidad Nacional del Altiplano Puno, por haber permitido ser parte de ella y así mismo a la Facultad de Ingeniería Civil y Arquitectura, por brindarme la oportunidad de formarme profesionalmente, con los conocimientos, capacidades, habilidades y enseñanzas aportadas por todos (as) docentes de la Facultad de Ingeniería Civil y Arquitectura.

A los miembros del Jurado, Ing. Edgar V. Hurtado Chavez, Ing. Zenon Mellado Vargas e Ing. Cesar E. Guerra Ramos quienes, con su excelente capacidad y conocimiento científico, contribuyeron a través de sus observaciones y aportes en el desarrollo de la presente investigación.

A mi director y asesor de investigación de tesis, Ing. Emilio Castillo Aroni, por haberme brindado la oportunidad de recurrir a su capacidad, conocimiento científico, por impartir sus sabios conocimientos.

Mhayer Quispe Aslla



INDICE GENERAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

INDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

RESUMEN 18

ABSTRACT 19

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 20

1.2. FORMULACION DEL PROBLEMA 21

1.2.1. Problema general 21

1.2.2. Problemas específicos 21

1.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN 22

1.3.1. Hipótesis general 22

1.3.2. Hipótesis específicas 22

1.4. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO 22

1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN 23



1.5.1. Objetivo general	23
1.5.2. Objetivos específicos.....	23

CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS	24
2.1.1. Antecedentes internacionales:	24
2.1.2. Antecedentes nacionales:.....	27
2.1.3. Antecedentes locales o regionales	30
2.2. MARCO TEÓRICO	30
2.2.1. Mezclas asfálticas	30
2.2.2. Componentes de una mezcla asfáltica.....	33
2.2.3. Diseño de mezclas asfálticas mediante el método Marshall	43
2.2.4. Selección de las muestras de material	44
2.2.5. Especificaciones de la metodología.....	52
2.2.6. Polímeros.....	55
2.2.7. Asfalto modificado con polímero.....	56

CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	65
3.1.1. Tipo de investigación	65
3.1.2. Nivel de investigación	65



3.1.3. Población	65
3.1.4. Muestra	66
3.1.5. Delimitación temática.....	69
3.2. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	69
3.3. ENSAYOS DE CONTROL DE CALIDAD DE AGREGADOS.....	70
3.3.1. Agregados pétreos	70
3.3.2. Agregados utilizados para la elaboración de mezclas asfálticas	70
3.3.3. Desarrollo de los ensayos realizados en el agregado grueso	72
3.3.4. Desarrollo de los ensayos realizados en el agregado fino	82
3.3.5. Dosificación de agregados.....	94
3.3.6. Cemento asfáltico	95
3.4. DISEÑO PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS MÉTODO MARSHALL (ASFALTO CONVENCIONAL)	96
3.4.1. Parámetros Marshall	99
3.4.2. Gráficos Marshall (resultado final)	106
3.4.3. Cálculo del contenido óptimo de asfalto convencional.....	107
3.5. DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA POR EL METODO MARSHALL MODIFICADO CON POLIÉSTIRENO EXPANDIDO (EPS)	108
3.5.1. Obtención del porcentaje óptimo de EPS	109
3.6. DISEÑO PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS MÉTODO MARSHALL (ASFALTO MODIFICADO)	111



3.6.1. Parámetros Marshall	111
3.6.2. Gráficos Marshall (resultado final)	117
3.6.3. Cálculo del contenido óptimo de poliestireno Expandido (EPS)	118
3.7. ENSAYOS PARA CARACTERIZACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS Y DURABILIDAD DE LA MEZCLA ASFÁLTICA (CONVENCIONAL Y MODIFICADA)	119
3.7.1. Resistencia a compresión simple de mezclas asfálticas (MTC E 513 - 2013)	119
3.7.2. Caracterización de las mezclas bituminosas abiertas por medio del ensayo Cántabro de pérdida por desgaste (MTC E 515 - 2013).....	123
3.7.3. Ensayo de tracción indirecta NLT-346/90 "Resistencia a compresión diametral (ensayo brasileño) de mezclas bituminosas"	127
3.8. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS ESPECIALES	130
3.9. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	130
3.10. DISTRIBUCIÓN ESTADÍSTICA "T"1	130
3.11. PRUEBAS DE HIPÓTESIS ESTADÍSTICAS.....	131
3.11.1. Primera hipótesis	132
3.11.2. Interpretación para la primera hipótesis	137
3.11.3. Segunda hipótesis	137
3.11.4. Interpretación para la segunda hipótesis.....	144
3.12. CORRELACIÓN	144



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. CONTRASTACIÓN DE HIPOTESIS	157
4.1.1. Contrastación de hipótesis general	157
4.1.2. Contrastación de las hipótesis específicas	168
V. CONCLUSIONES.....	171
VI. RECOMENDACIONES.....	175
VII.REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	176
ANEXOS	180

Área : Transportes

Tema : Diseño de mezclas asfáltica

Línea de investigación : Transporte y Gestión Vial

FECHA DE SUSTENTACION: 09 de agosto de 2023



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de cemento asfáltico PEN.....	34
Tabla 2. Tipos de asfaltos líquidos RC.....	35
Tabla 3. Grados de asfalto recomendado para diferentes condiciones de temperatura.	36
Tabla 4. Requerimientos para los agregados gruesos.....	52
Tabla 5. Requerimientos para los agregados finos.....	52
Tabla 6. Gradación que debe cumplir para el diseño de mezcla asfáltica en caliente (MAC)	53
Tabla 7. Requisitos para mezcla de concreto bituminoso	54
Tabla 8. Vacíos mínimos en el agregado mineral (VMA)	55
Tabla 9. Resumen propiedades físicas.....	61
Tabla 10. Resumen propiedades químicas	62
Tabla 11. Cantidad de briquetas Marshall realizadas para el diseño óptimo de mezcla asfáltica en caliente convencional.....	67
Tabla 12. Cantidad de briquetas Marshall realizadas para el diseño óptimo de mezcla asfáltica en caliente Modificado.	68
Tabla 13. Cantidad de ensayos Resistencia a compresión simple.....	68
Tabla 14. Cantidad de ensayos Cántabro de pérdida por desgaste.	69
Tabla 15. Cantidad de ensayos Tracción indirecta.	69
Tabla 16. Ensayos realizados para la caracterización de los agregados gruesos.....	71
Tabla 17. Ensayos realizados para la caracterización de los agregados finos.....	71
Tabla 18. Granulometría del agregado grueso.....	73
Tabla 19. Ensayo de durabilidad (MTC E 209).....	75



Tabla 20. Resistencia de los agregados gruesos de tamaños menores por abrasión o impacto en la máquina de los ángeles.....	77
Tabla 21. Determinación de partículas chatas y alargadas (MTC e 221, ASTM 04711)..	78
Tabla 22. Determinación de partículas fracturadas (AST M D 5821).....	79
Tabla 23. Determinación de sales solubles en agregados (MTC E 219).....	80
Tabla 24. Determinación del peso específico y absorción del agregado grueso (ASTM C-128, MTC E 206)	82
Tabla 25. Granulometría del agregado fino natural.....	84
Tabla 26. Equivalente de arena (ASTM D 2419).....	85
Tabla 27. Angularidad del agregado fino (MTC E 222)	86
Tabla 28. Ensayo de azul de metileno (ASSHTO TP 57)	87
Tabla 29. Límites de consistencia malta N.º 40 (ASTM D-424).....	89
Tabla 30. Ensayo de durabilidad (MTC E 209).....	91
Tabla 31. Determinación de sales solubles en agregados (MTC E 219).....	92
Tabla 32. Gravedad específica y absorción (ASTM C-121)	93
Tabla 33. Gradación de agregados para el diseño de mezcla asfáltica MAC-2	94
Tabla 34. Especificaciones del cemento asfáltico Pen 120 – 150	96
Tabla 35. Cálculo del peso unitario de la muestra compactada.....	99
Tabla 36. Peso específico Bulk de la combinación de agregados	100
Tabla 37. Porcentaje de asfalto absorbido	101
Tabla 38. Porcentaje de asfalto absorbido	102
Tabla 39. Contenido de asfalto efectivo	103
Tabla 40. Porcentaje VMA en mezcla compactada.....	104
Tabla 41. Porcentaje de vacíos de aire en la mezcla compactada	104



Tabla 42. Vacíos llenos con asfalto	105
Tabla 43. Propiedades físico mecánicas	106
Tabla 44. Cálculo del peso unitario de la muestra compactada.....	112
Tabla 45. Peso específico bulk de la combinación de agregados	112
Tabla 46. Peso efectivo de los agregados modificado.....	113
Tabla 47. Porcentaje de asfalto absorbido modificado.....	114
Tabla 48. Contenido de asfalto efectivo modificado.....	115
Tabla 49. Porcentaje VMA en mezcla compactada modificado.	115
Tabla 50. Porcentaje de vacíos de aire en la mezcla compactada modificado.	116
Tabla 51. Vacíos llenos con asfalto modificado.....	117
Tabla 52. Características físico mecánicas del asfalto modificado.	117
Tabla 53. Resumen resultados de ensayos para caracterización de propiedades mecánicas y durabilidad de la mezcla asfáltica (convencional y modificada)	130
Tabla 54. Distribución estadística "t"	131
Tabla 55. Análisis variable Estabilidad Marshall.....	134
Tabla 56. Análisis estadístico variable de Estabilidad Marshall	135
Tabla 57. Análisis variable Flujo Marshall.	135
Tabla 58. Análisis estadístico variable de Flujo Marshall.....	136
Tabla 59. Análisis variable Compresión simple.....	140
Tabla 60. Análisis estadístico variable compresión simple.....	140
Tabla 61. Análisis variable cántabro de pérdida por desgaste.....	141
Tabla 62. Análisis estadístico variable cántabro de pérdida por desgaste.....	142
Tabla 63. Análisis variable tracción indirecta	142
Tabla 64. Análisis estadístico variable tracción indirecta	143



Tabla 65. Correlación de Pearson.....	145
Tabla 66. Resultado finales Ensayo Marshall	157
Tabla 67. Resultado finales Ensayos Especiales	158
Tabla 68 Comparación de resultados de estabilidad con Arévalo y Lucho ,2019	159
Tabla 69. Comparación de resultados de flujo con Arévalo y Lucho, 2019.....	161
Tabla 70. Comparación de resultados de flujo con Arévalo y Lucho, 2019.....	162
Tabla 71. Comparación de resultados factor de rigidez con Arévalo y Lucho, 2019.....	164
Tabla 72. Comparación de resultados ensayo de cántabro de pedida por desgaste con Modera, 2018.	166
Tabla 73. Comparación de resultados ensayo de tracción indirecta con Modera 2018...	168



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Cantera y planta chancadora, Morro Blanco, distrito de San Salvador (Agregado Grueso y Arena Chancada)	42
Figura 2. Tendencia de las curvas de las propiedades de diseño Marshall	51
Figura 3. Proceso de muestreo del agregado grueso	72
Figura 4. Proceso del Análisis Granulométrico por tamizado del agregado grueso.	73
Figura 5. Solución de sulfato de magnesio para ser utilizado en el ensayo	74
Figura 6. Muestras listas para Iniciar un nuevo ciclo de inmersión	75
Figura 7. Muestra lista para ser introducida en la máquina de Abrasión de los Ángeles..	76
Figura 8. Muestras listas para Iniciar un nuevo ciclo de inmersión	76
Figura 9. Separación de partículas chatas y alargadas.....	78
Figura 10. Caras fracturadas de la muestra.....	79
Figura 11. Peso de las muestras después de ser ensayadas	80
Figura 12. Peso de la muestra lista para ser ensayada	81
Figura 13. Peso de la muestra sumergida en agua destilada.....	81
Figura 14. Proceso de selección del material	83
Figura 15. Proceso del análisis granulométrico por tamizado de los agregados finos	83
Figura 16. Resultado obtenido luego de haberse realizado el ensayo de granulometría de los agregados finos	84
Figura 17. Agregado Fino entrando al proceso de decantación para luego medir la altura del material fino.....	85
Figura 18. Proceso de ensayo de angularidad de los agregados finos.....	86
Figura 19. Peso del compuesto de azul de metileno para ser utilizado en el ensayo	87



Figura 20. Resultado obtenido después de haberse realizado el ensayo de azul de metileno en los agregados finos.....	87
Figura 21. Equipo empleado para la determinación del límite líquido Copa de Casagrande, ranurador y tarro	88
Figura 22. Muestras obtenidas para determinar el contenido de humedad a los 25 golpe	89
Figura 23. Solución de sulfato de magnesio para ser utilizado en el ensayo	90
Figura 24. Resultante al someter al ciclo N° 05 por sulfato de magnesio en los agregados finos	91
Figura 25. Peso de las muestras después de ser ensayadas	92
Figura 26. Muestra entrando al estado de superficie seca	93
Figura 27. Curva granulométrica de la dosificación de agregados.....	95
Figura 28. Gráficos de ensayos Marshall	107
Figura 29. PEN 120-150 distribuidos en tres recipientes de 500gr c/u.	109
Figura 30. Incorporación del POLIMERO EPS al cemento asfáltico, a una temperatura de 170°C.....	110
Figura 31. Cemento asfáltico modificado con Poliestireno expandido al 15%	111
Figura 32. Gráficos de ensayo Marshall asfalto modificado	118
Figura 33. Espécimen listo para ser ensayado a carga uniaxial.....	122
Figura 34. Realización del ensayo de resistencia a compresión simple de mezclas asfálticas	123
Figura 35. Peso de las muestras antes de ser sometidas al ensayo de cántabro de pérdida por desgaste	126
Figura 36. Resultado de la primera probeta luego de ser sometida a desgaste mediante la máquina de los ángeles	126



Figura 37. Espécimen listo para ser sometido al ensayo de tracción indirecta	129
Figura 38. Espécimen luego de ser sometido al ensayo de tracción indirecta.....	129
Figura 39. Comparación de estabilidad Marshall Asfaltos convencional y modificado .	159
Figura 40. Comparación de Flujo Marshall, Asfaltos convencional y modificado	160
Figura 41. Comparación de porcentaje de vacíos, Asfaltos convencional y modificado	161
Figura 42. Comparación de los vacíos llenos de cemento asfáltico, asfaltos convencional y modificado	163
Figura 43. Comparación estabilidad/flujo, asfaltos convencional y modificado	164
Figura 44. Comparación resistencia de compresión simple, asfaltos convencional y modificado	165
Figura 45. Comparación ensayo de cántabro de pedida por desgaste, asfaltos convencional y modificado	166
Figura 46. Comparación ensayo de tracción indirecta asfaltos convencional y modificado	167



ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

EPS: Poliestireno expandido

MAC-2: Mezcla asfáltica en caliente con huso granulométrico tipo 2.

PEN 120-150: Cemento asfáltico de penetración 120-150.

C.A.: Cemento asfáltico.

TMN: Tamaño máximo nominal

ASTM: American society of testing materials

ASSTHO: American association of state highway and transportation officials.

EG-2013: Especificaciones técnicas generales para la construcción, 2013.

MTC: Ministerio de Transportes y Comunicaciones.



RESUMEN

El presente trabajo de investigación se efectuó en la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional del Altiplano Puno. Tiene como propósito fundamental el determinar la influencia en las propiedades mecánicas y durabilidad de la mezcla asfáltica en caliente con sustitución parcial de poliestireno expandido como una propuesta para aprovechar este material termoplástico en el campo de la infraestructura vial, a pesar de haber sido demostrado ser beneficioso en aplicaciones de construcción sus características y propiedades son poco aprovechadas. La metodología de la investigación es de enfoque cuantitativo con un diseño cuasiexperimental de nivel explicativo, que busca realizar ensayos de laboratorio para evaluar el comportamiento mecánico y durabilidad de la mezcla asfáltica al sustituir parcialmente con partículas de poliestireno expandido (EPS). Se elaboraron probetas con diferentes porcentajes de poliestireno 1.5% , 3.0% y 4.5% , en sustitución por peso de cemento asfáltico, siendo un total 41 probetas de dimensiones normalizadas de prueba 2.5”de altura nominal por 4” de diámetro, para los ensayos de estabilidad y flujo Marshall, Cántabro de pérdida por desgaste, tracción indirecta y 12 probetas de dimensiones normalizadas de prueba 4” de espesor por 4” de altura, para los ensayos de resistencia a la compresión simple e inmersión- compresión; separadas en grupos de control adquiriendo dos tipos de mezclas convencional y modificada. El resultado que se obtuvo es el porcentaje óptimo de poliestireno expandido con 3.4% de EPS, con el propósito final de efectuar comparaciones sobre las características mecánicas más relevantes de la mezcla asfáltica (resistencia a la carga, estabilidad/flujo, durabilidad y cohesión) mediante ensayos de laboratorio especiales, llegando a la conclusión que las mezclas asfálticas modificadas con poliestireno expandido si influye en las propiedades mecánicas y durabilidad, presentando mejoras con valores superiores a las mezclas convencionales.

Palabras clave: Mezcla asfáltica, poliestireno expandido, pavimento flexible, propiedades mecánicas.



ABSTRACT

This research work was carried out at the Professional School of Civil Engineering of the Universidad Nacional del Altiplano Puno. Its main purpose is to determine the influence on the mechanical properties and durability of the hot asphalt mixture with partial substitution of expanded polystyrene as a proposal to take advantage of this thermoplastic material in the field of road infrastructure, although it has been shown to be beneficial in construction applications, its characteristics and properties are little used.. The research methodology is of quantitative approach with a quasi-experimental design of explanatory level, which seeks to carry out laboratory tests to evaluate the mechanical behavior and durability of the asphalt mixture when partially replaced with expanded polystyrene particles (EPS). Test specimens were prepared with different percentages of polystyrene 1.5% , 3.0% and 4.5% , in substitution by weight of asphalt cement, In total, 41 test specimens of standardized test dimensions 2.5" nominal height by 4" diameter, for the tests of stability and Marshall flow, Cantabrian wear loss, indirect traction and 12 test specimens of standardized test dimensions 4" thick by 4" high, for the tests of resistance to simple compression and immersion-compression; separated in control groups acquiring two types of conventional and modified mixes. The result obtained is the optimum percentage of expanded polystyrene with 3.4% EPS, to finally make comparisons of the most important mechanical properties of the asphalt mix (load resistance, stability/flow, durability and cohesion) by means of special laboratory tests, reaching the conclusion that the asphalt mixes modified with expanded polystyrene do influence the mechanical properties and durability, presenting improvements with higher values than conventional mixes.

Key word: Asphalt mix, expanded polystyrene, flexible pavement, mechanical properties.



CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La presente investigación “Influencia en las propiedades mecánicas y durabilidad de la mezcla asfáltica con sustitución parcial de poliestireno expandido”. Surge ante la necesidad inminente de adquirir mayor conocimiento en lo que viene a ser los pavimentos flexibles, específicamente en el diseño de mezclas asfálticas al incorporar nuevos materiales, como en esta investigación se añadió perlas de poliestireno expandido, para evaluar el comportamiento en sus propiedades mecánicas como estabilidad y flujo; y así mismo realizar una comparativa de la mezcla asfáltica convencional con la modificada para determinar su durabilidad de la misma, en base a ensayos de laboratorio.

Es importante indicar que las carreteras nacionales pavimentadas han aumentado progresivamente desde 1990 en términos absolutos (kilómetros); de 5,740 Km (36%) a 16,647 Km. (65%); sin embargo, en términos relativos (porcentaje de la RVN existente) no ha mostrado la misma tendencia, lo cual se explica por la incorporación de nuevas carreteras no pavimentadas a la RVN, principalmente en el año 2007. (MTC, 2015, pág. 9)

Motivado por esta carencia y que hacen que el asfalto puro en la actualidad por sí solo ya no posean las mejores propiedades y tengan un deterioro prematuro, razones que han sido atribuidas principalmente al incremento de los niveles de tráfico y a las condiciones climatológicas extremas. Por lo tanto, la modificación del asfalto con polímeros naturales o sintéticos de acuerdo con (Yongbing et al. 2017), es la solución principal utilizada para resolver este problema.



La durabilidad de las mezclas asfálticas en caliente está relacionada directamente con el clima del lugar de ubicación de estos, además de otros parámetros como carga, suelo, humedad, proceso constructivo, entre otros; los que en su conjunto influyen para un determinado comportamiento del pavimento que traerá como consecuencia fallas prematuras y baja durabilidad de las carpetas asfálticas. (Huaman, 2011, pág. 17)

Frente a las circunstancias mencionadas, junto con la incorporación de tecnologías constructivas innovadoras y otros materiales, se encontró una solución evidente al adaptar la mezcla asfáltica. Un ejemplo es la utilización de polímeros, que ha permitido mejorar significativamente el rendimiento de los pavimentos, resultando en beneficios como periodos de diseño y vida útil superiores a los de los pavimentos convencionales y la gran importancia que pueda representar tanto como en el aspecto económico además de preservar el medio ambiente dando una opción de reciclaje a materiales no biodegradables, con la adicción de Poliestireno Expandido Reciclado por lo cual contribuya con tal fin y asegurando la durabilidad necesaria de las carreteras del mundo.

1.2. FORMULACION DEL PROBLEMA

1.2.1. Problema general

¿De qué manera influye la sustitución parcial del poliestireno expandido en las propiedades mecánicas y durabilidad de la mezcla asfáltica?

1.2.2. Problemas específicos

PE1: ¿Cómo obtener propiedades de estabilidad y flujo de ambas mezclas en caliente convencional y modificada con partículas de poliestireno expandido para comparación de resultados.?



PE2: ¿Como mejorar las propiedades mecánicas de una mezcla a base de poliestireno expandido con las que presentan las mezclas asfálticas convencionales?

PE3: ¿Cuál es el porcentaje óptimo de partículas de poliestireno expandido con la dosificación adecuada de agregados y asfalto usando el método Marshall para la mezcla asfáltica en caliente modificada?

1.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1. Hipótesis general

La sustitución parcial del poliestireno expandido influye en las propiedades mecánicas y durabilidad de la mezcla asfáltica.

1.3.2. Hipótesis específicas

HE1: Influye en las propiedades de estabilidad y flujo de la mezcla asfáltica en caliente modificada con partículas de poliestireno expandido en comparación de la mezcla asfáltica convencional.

HE2: Mejora las propiedades mecánicas de una mezcla a base de poliestireno expandido a comparación de las que presentan las mezclas asfálticas convencionales.

HE3: Con el método Marshall se obtuvo el porcentaje óptimo de poliestireno expandido, con la dosificación adecuada de agregados y asfalto para la mezcla asfáltica en caliente modificada.

1.4. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

El presente trabajo de investigación se realizó para evaluar las propiedades mecánicas (Estabilidad - Fluencia) y durabilidad de los asfaltos modificados con poliestireno expandido (EPS)



El estudio muestra resultados de los ensayos practicados a los materiales intervinientes en una mezcla asfáltica, el cual permitirá la aplicación o no del estudio realizado; mostrando el verdadero comportamiento de los materiales el cual ayudará a mejorar el procedimiento existente para el diseño de mezclas asfálticas y un diseño adecuado.

1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1. Objetivo general

Determinar la influencia en las propiedades mecánicas y de durabilidad de la mezcla asfáltica al sustituir parcialmente con poliestireno expandido.

1.5.2. Objetivos específicos

OE1: Realizar ensayos de laboratorio para obtener propiedades de estabilidad y flujo de ambas mezclas en caliente convencional y modificada con partículas de poliestireno expandido, para comparación de resultados.

OE2: Analizar las mejoras en las propiedades mecánicas de una mezcla a base de poliestireno expandido a comparación de las que presentan las mezclas asfálticas convencionales.

OE3: Determinar el porcentaje óptimo de partículas de poliestireno expandido, con la dosificación adecuada de agregados y asfalto, usando el método Marshall para la mezcla asfáltica en caliente modificada.



CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS

Este capítulo es muy importante para la realización eficiente de la investigación, una mejor comprensión de la investigación en curso y evitar posibles errores. Además, brindamos una guía clara sobre cómo llevar a cabo la investigación, cómo ampliar el alcance de la investigación y cómo adaptarla específicamente para enfocarse principalmente en los problemas planteados. Su enfoque permite alcanzar de forma más fiable las metas planteadas sin desviarse de los objetivos de la investigación.

2.1.1. *Antecedentes internacionales:*

Parra (2018), En su tesis sobre “Sustitución parcial del asfalto en una mezcla para pavimento a base de polímeros reciclados.” Su objetivo fue explorar los beneficios potenciales del poliestireno para emplearlo como elemento principal del aglutinante debido a la versatilidad y reciclaje de este último. En la metodología utilizada se realizaron pruebas de laboratorio basadas en los estándares AASHTO y ASTM para verificar las propiedades físicas y mecánicas. El resultado de esta investigación, muestra que, además de sustituir el 100% del asfalto, los valores a compresión y tensión son incrementados y la resistencia a la deformación aumenta sin presencia de agrietamientos superficiales por cambios de temperatura (3,100 Mpa).

Fernández & Ruiz (2018). En su tesis sobre "Mezcla asfáltica modificada con poliestireno por vía seca" de la Pontificia Universidad Católica de Ecuador, se realizaron pruebas de laboratorio para comparar las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica modificada con poliestireno y una mezcla asfáltica convencional. El contenido de



poliestireno utilizado en las muestras fue del 10%, 20%, 30% y 40% en relación al volumen del bitumen, con contenidos de asfalto que variaron entre el 5.0% y el 7.0%. El método utilizado para el estudio fue el ensayo Marshall. Los resultados obtenidos indicaron que las propiedades evaluadas, como la gravedad específica, la abrasión, el equivalente de arena y la resistencia a los sulfatos de los agregados pétreos, se encontraban dentro de los parámetros permitidos. El tipo de cemento asfáltico utilizado fue el AC-20. El porcentaje óptimo de asfalto obtenido fue del 5.8%. La estabilidad máxima se logró con un contenido del 25% de poliestireno en relación a la mezcla convencional, lo que resultó en un aumento del 22% en la resistencia en comparación con la mezcla convencional. En cuanto al flujo y los porcentajes de vacíos (VA) de las mezclas modificadas, no se observaron variaciones significativas. Esto lleva a la conclusión de que la adición de poliestireno no afecta la capacidad del pavimento para reducir deformaciones, pero sí aumenta la resistencia bajo cargas pesadas.

Guamanquispe (2017). En su tesis sobre “Análisis de las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas con adición de caucho de llanta reciclado.” Su objetivo es Comparar las Propiedades Mecánicas del asfalto modificado con polímeros reciclados (caucho de llanta), en relación a un asfalto tradicional. La metodología utilizada se fundamentó en la investigación de nivel exploratorio, de carácter descriptivo y de carácter correlacional. El resultado de esta investigación arrojó que las briquetas ensayadas nos revelan un mejoramiento de las propiedades en las mezclas asfálticas modificadas con un porcentaje de vacíos que se presenta en los ensayos aumenta según va aumentando el porcentaje del contenido asfáltico y el porcentaje de la fibra de caucho.



Segura (2017). En su tesis sobre “Estudio del comportamiento físico y mecánico de mezclas asfálticas; con materiales reutilizables en la construcción como escoria de acero.” Su objetivo fue evaluar ventajas y desventajas del uso de escoria de acero como agregado en mezclas asfálticas, de acuerdo a procedimientos y especificaciones normalizadas. La metodología utilizada es que, al realizar diferentes muestras, se obtuvo la muestra 5,5% en porcentaje de asfalto para efectuar los diseños y evaluar el comportamiento de la mezcla asfáltica. Los resultados que se obtuvo fue establecer el contenido del asfalto donde deberían contener las muestras elaboradas con AC 60-70 sería del 5,5%. Con este valor se cumplen los parámetros de estabilidad, flujo y porcentaje de vacíos para un nivel de tránsito pesado, asimismo con la sumatoria de todos los datos obtenidos con los diferentes porcentajes de escoria; en los cuales se puede observar el efectivo funcionamiento de este agregado para la mezcla asfáltica.

Sánchez (2006). En su tesis sobre “Análisis comparativo de las características físicas entre el asfalto convencional y el asfalto modificado con poliestireno y llanta triturada.” El propósito de este estudio fue determinar la diferencia entre el asfalto convencional y el asfalto modificado con poliestireno y llantas trituradas. La metodología utilizada se basa en estudios experimentales en los que se manipulan las condiciones iniciales para inducir, evaluar y controlar los efectos. Esto permitió determinar cómo los modificadores afectan las propiedades físicas del cemento asfáltico convencional. Los resultados mostraron que el aglutinante de asfalto modificado con poliestireno y el neumático triturado tenían temperaturas de reblandecimiento más altas en comparación con el cemento asfáltico convencional. Además, se observó que estas temperaturas aumentaban en proporción al nivel de modificador en el asfalto.



Zuluaga, Gomez, & Correa (2021). “Estudio realizado en Colombia sobre Desarrollo de un asfalto altamente modificado con polímero SBS a partir de un asfalto base convencional de la refinería Ecopetrol Barrancabermeja 60-70 variando la concentración de polímero.” Su objetivo fue obtener un asfalto con una recuperación elástica por torsión superior al 80%, a partir de una mezcla homogenizada de polímero SBS con asfalto Ecopetrol Barrancabermeja 60-70. La metodología utilizada se basó en realizar pruebas y ensayos de laboratorio de todos los asfaltos en estudio se realizaron en el laboratorio acreditado por el Organismo Nacional de Acreditación de Colombia – ONAC, de la prestigiosa compañía de ingeniería Pavimentos Colombia S.A.S., usando la metodología recomendada por la firma KratonTM, documento que hace parte de la serie 101[8] para la modificación de cementos asfálticos y en el cual se indican los pasos que se deben seguir para obtener un asfalto altamente modificado con polímero SBS – HiMA; por lo tanto, una vez caracterizado el cemento asfáltico base Ecopetrol 60-70 proveniente de la refinería de Barrancabermeja, se procedió a establecer las cantidades de asfalto y polímero para cada una de las adiciones

2.1.2. Antecedentes nacionales:

Pinedo (2018). En su tesis sobre “Diseño de adoquines para pisos de tránsito liviano reaprovechando residuos de poliestireno expandido, agregados y emulsión asfáltica.” Su objetivo fue obtener el diseño de un adoquín para piso de tránsito liviano reaprovechando residuos de poliestireno expandido, agregados y emulsión asfáltica. La metodología utilizada es de enfoque cuantitativo siendo éste de diseño experimental. El resultado que se obtuvo fue, que la calidad del agregado mezclado tiene influencia en la cantidad de emulsión asfáltica y esto influye en forma positiva en la fabricación de adoquines para tránsito liviano, según los ensayos realizados, la resistencia a la compresión superó el valor de 290 kg/cm²



en promedio de por cada unidad, las unidades fabricadas y ensayadas se obtuvo un valor de 295.32 kg/cm², lo que significa estamos por encima del valor esperado.

Balarezo & Tanaka (2022). En su tesis sobre “Análisis del uso de residuos plásticos reciclados en la estabilidad, durabilidad e impermeabilidad de una mezcla asfáltica.” El propósito principal de la investigación fue evaluar cómo el uso de residuos plásticos reciclados afecta la estabilidad, durabilidad e impermeabilidad de una mezcla asfáltica a nivel mundial. La metodología utilizada fue de tipo descriptivo y no experimental, con un enfoque transversal. El muestreo se llevó a cabo de manera no probabilística, basándose en el juicio de expertos. Para recolectar los datos, se utilizó la técnica de revisión documental y se emplearon hojas de cálculo en Excel para organizar la información de los diferentes artículos. Los resultados indicaron que la propiedad de estabilidad y el porcentaje de vacíos, que influye directamente en las características de durabilidad e impermeabilidad, mostraron valores satisfactorios cuando se añadió un porcentaje de plástico en el rango del 0.1% al 1.6%.

Valdes, Calibi & Sanchez (2015). “Estudio realizado en Chile sobre Evaluación de la durabilidad de mezclas asfálticas en función de las propiedades físicas de los áridos.” El propósito de este estudio fue evaluar la durabilidad de diferentes mezclas asfálticas en términos de envejecimiento y resistencia al agua, teniendo en cuenta las propiedades físicas de los agregados utilizados. La metodología utilizada incluyó 12 mezclas asfálticas con 3 agregados con diferente morfología y mineralogía, y 4 asfaltos, incluyendo 2 asfaltos convencionales, 1 asfalto de alto módulo y 1 asfalto modificado con polímeros. Los resultados obtenidos revelaron que el método de Zingg utilizado para la caracterización física de los agregados no proporciona suficiente información para predecir el comportamiento de las mezclas estudiadas., ya que este método considera solo la fracción gruesa de los



agregados. Sin embargo, se observó que las esquinas y la textura superficial de las micropartículas del agregado, evaluadas por los parámetros PI, tienen un impacto significativo en la resistencia de la mezcla a la humedad y al envejecimiento.

Arévalo & Lucho (2019). en su investigación titulada, “Influencia de la incorporación de poliestireno en las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas en caliente, Lima-2019”. El propósito central consistió en encontrar la cantidad adecuada de poliestireno a añadir para mejorar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas. El enfoque de la investigación fue de tipo aplicado, con un diseño preexperimental y un enfoque cuantitativo. Los resultados obtenidos indicaron que la adición de poliestireno mejora las propiedades de las mezclas asfálticas, siendo óptimo un porcentaje del 0.3% de poliestireno. Además, se determinó que este material termoplástico es confiable ya que influye en la rigidez, estabilidad, contenido de vacíos y otras propiedades relacionadas con la trabajabilidad, estabilidad, flexibilidad e impermeabilidad de las mezclas asfálticas.

Galdós (2022), En su tesis sobre “Resistencia mecánica de mezcla asfálticas en frío con adición de poliestireno expandido, Huancayo, Junín, 2021.” Su objetivo fue Determinar cuánto varía la resistencia mecánica de la mezcla asfálticas en frío con adición de poliestireno expandido, Huancayo, Junín. La metodología utilizada se fundamentó en la investigación de nivel explicativo, de tipo de investigación aplicada y de carácter correlacional. Entre los resultados se obtuvo que la densidad bulk (G) promedio de la mezcla asfáltica tradicional fue de 2.28, mientras que para la mezcla con adición de 0.01%, 0.02%, 0.03% y 0.04% de poliestireno fue de 2.23, 2.19, 2.18 y 2.17. Para estabilidad (kg-f), el promedio para la mezcla tradicional fue de 929.00, mientras para las mezclas modificadas fue de 1471.00, 1315.33, 1160.67 y 1235.00. En cuanto al porcentaje de vacíos la media convencional fue de 5.20, y



para las modificadas fueron de 3.93, 4.60, 4.90 y 5.13. Para flujo, la media fue de 7.20, 8.20, 11.27, 11.63 y 10.10 para la mezcla convencional y los diferentes porcentajes modificados. Para la humedad, la media convencional fue de 5.70; y para las mezclas modificadas fue de 1.37, 1.33, 1.50 y 1.40.

2.1.3. Antecedentes locales o regionales

No existe información.

2.2. MARCO TEÓRICO

2.2.1. Mezclas asfálticas

Según (Padilla, 2004) Una mezcla asfáltica en general es una combinación de asfalto y agregados minerales pétreos en proporciones exactas, mezclados a temperatura constante para finalmente ser compactada y colocada. Se utiliza para construir superficies de carreteras. El principal propósito del pavimento es ofrecer una superficie de rodaje que garantice la comodidad, seguridad y eficiencia económica para los usuarios de las vías de comunicación, facilitando así el tránsito de los vehículos. Además, el pavimento debe transmitir adecuadamente las cargas generadas por el tráfico a la explanada subyacente para que esta pueda soportarlas de manera efectiva.

Al llevar a cabo el diseño y el proyecto, es de vital importancia tomar en consideración dos aspectos fundamentales:

- La durabilidad: Este aspecto determina los materiales y espesores de las distintas capas utilizadas en la construcción del pavimento. Es importante asegurarse de que el pavimento sea lo suficientemente fuerte para soportar los rigores del tráfico y las condiciones ambientales a las que estará sujeto.



- Propósito estético y funcional: Determina la textura y condición superficial requerida para la capa superior del pavimento, denominada capa de rodadura o capa de pavimento. Estas capas deben cumplir con los estándares de seguridad, brindar soporte y drenaje adecuados para evitar accidentes y brindar comodidad y conveniencia al usuario.

2.2.1.1. Funcionalidad de las mezclas asfálticas

Según (Padilla, 2004) Las mezclas asfálticas sirven para soportar directamente las acciones de los neumáticos y transmitir las cargas a las capas inferiores, proporcionando unas condiciones adecuadas de rodadura, cuando se emplean en capas superficiales; y como material con resistencia simplemente estructural o mecánica en las demás capas. Los materiales estructurales puros se pueden describir de diferentes maneras. Los métodos comunes para evaluar algunas de sus propiedades son la cohesión y la fricción interna. También se puede caracterizar por un factor de rigidez longitudinal y otro factor de rigidez transversal, o valores de estabilidad y deformación. Como con cualquier material, aquí se deben considerar la resistencia a la fractura, las leyes de fatiga y la deformación plástica.

Según (Padilla, 2004) El comportamiento de la mezcla depende de circunstancias externas a ellas mismas, tales como son el tiempo de aplicación de la carga y de la temperatura. Por ello, las propiedades y características de estos materiales deben estar muy relacionadas con factores como la temperatura y el tiempo de exposición. Por lo tanto, es importante comprender completamente la reología de los materiales.

Según (Padilla, 2004) Estos aspectos funcionales del firme están principalmente asociados con la textura y la regularidad superficial del pavimento. La reología de las mezclas se está investigando a fondo tanto de forma experimental como teórica, con resultados prácticos inmediatos y la posibilidad de adaptar de forma más eficaz las formulaciones y los



materiales utilizados a las condiciones reales de cada pavimento. Por ejemplo, los métodos de diseño de pavimentos de carreteras se pueden ajustar fácilmente a las condiciones climáticas locales y de velocidad de los vehículos.

2.2.1.2. Propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas

Alarcón (2003) Las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica son importantes para garantizar su durabilidad y resistencia a las cargas del tráfico. En esta investigación nos centramos en las propiedades mecánicas más importantes de una mezcla asfáltica, las cuales vienen a ser:

Resistencia a la carga: La mezcla debe ser capaz de soportar las cargas de tráfico sin deformarse excesivamente. Se evalúa mediante ensayos de resistencia a la compresión, como el ensayo Marshall o el ensayo de carga indirecta.

Estabilidad: Se refiere a la capacidad de la mezcla para mantener su forma y resistir la deformación permanente bajo cargas repetidas. Se evalúa mediante el ensayo de estabilidad y flujo de Marshall.

Flujo: determina la deformación plástica que experimenta una muestra de mezcla asfáltica cuando se somete a una carga vertical y una temperatura específica. Esta deformación se conoce como flujo y se expresa en unidades de centímetros. Se evalúa mediante el ensayo de estabilidad y flujo de Marshall.

Durabilidad: La mezcla debe ser capaz de resistir el desgaste y deterioro causados por el tráfico, la exposición a condiciones climáticas adversas y los agentes químicos. Se evalúa mediante ensayos de resistencia al desgaste, como el ensayo de desgaste por abrasión o el ensayo de pérdida de masa por inmersión en agua.



Cohesión: La mezcla debe ser capaz de resistir deformaciones plásticas y esfuerzos de corte, como los que se producen por la acción del tráfico y las variaciones de temperatura. Una alta cohesión en la mezcla asfáltica garantiza una mayor resistencia al agrietamiento, la deformación permanente y la formación de baches. Se evalúa mediante ensayos de flexibilidad, como el ensayo de flexión con viga o el ensayo de tracción indirecta.

En resumen, en una mezcla asfáltica se debe buscar la optimización de las propiedades mecánicas, como la estabilidad y el flujo, así como la durabilidad, que se refiere a la resistencia a la fatiga (Fajardo Cachay, y otros, 2014 pág. 11).

2.2.2. Componentes de una mezcla asfáltica

2.2.2.1. Asfalto

Según (Valle, 1963) El asfalto es un producto milenario y que gracias a la tecnología y al desarrollo de la humanidad ha variado su forma, su manejo, e inclusive, sus características, haciéndolo más maleable para el hombre.

Es un material viscoso y adhesiva que se encuentra en el petróleo crudo, compuesta principalmente de bitumen. El asfalto forma parte de los constituyentes del petróleo y la mayoría de los petróleos crudos contienen cierta cantidad de esta sustancia, llegando en ocasiones a estar casi completamente compuestos por asfalto. Sin embargo, algunos petróleos crudos no contienen asfalto en absoluto. En base a la proporción de asfalto los petróleos se clasifican por lo común en:

- a) Petróleos crudos en base asfáltica
- b) Petróleos crudos en base parafina (contiene parafina, pero no asfalto)
- c) Petróleos crudos en base mixta (contiene parafina y asfalto)



Según (Valle, 1963) El petróleo crudo, extraído de los pozos, es separado en sus constituyentes o fracciones en una refinería. La separación principal se realiza mediante el proceso de destilación. Después de la separación, los ingredientes se refinan o procesan en productos que cumplen requisitos especiales.

Según (Valle, 1963) De esta manera es como el asfalto, parafina, nafta, aceites lubricantes y otros productos útiles de alta calidad se obtienen en una refinería de petróleo procesado, dependiendo de la naturaleza del crudo que está procesado. El asfalto, al ser el componente más pesado del petróleo, no se evapora ni se hierve durante el proceso de destilación. En lugar de ello, se obtiene como un residuo o subproducto del proceso. Sin embargo, este residuo de asfalto tiene un alto valor en diversos usos ingenieriles.

2.2.2.1.1. Tipos de asfaltos

Según (Valle, 1963) Los asfaltos empleados en la pavimentación de carreteras son los siguientes:

a. Cemento asfáltico o Bitumen

Los asfaltos utilizados en trabajos de pavimentación son una mezcla de asfaltos refinados y aceites fluidificantes que les confieren la consistencia adecuada, de grados de penetración (PEN):

Tabla 1. *Tipos de cemento asfaltico PEN*

TIPO	UTILIZACION
CA 40- 50	Mastico para sellado de juntas
PEN 60- 70	En concreto asfaltico
PEN 85 -100	En concreto asfaltico
PEN 120-150	En concreto asfaltico

Fuente: *Carreteras calles y aeropistas - Raúl Valle Rodas*

Las dos cifras indican los límites máximos y mínimos de la penetración.

Según (Valle, 1963) Se llama termoplástico porque se ablanda cuando se calienta y se solidifica cuando se enfría. Esta combinación única de propiedades y propiedades es la razón principal por la que el asfalto juega un papel tan importante en el mantenimiento y restauración de las superficies de las carreteras.

Según (Valle, 1963) El asfalto es un material impermeable, adhesivo y cohesivo que resiste instantáneamente altas cargas y fluye bajo tensión constante, lo que lo hace ideal para la construcción de carreteras y realiza las siguientes funciones:

- Haga que la estructura de la carretera sea impermeable, a prueba de humedad y evite de manera efectiva la infiltración de agua de lluvia.
- Crea enlaces fuertes y fuerzas cohesivas entre los agregados, evitando el deterioro bajo cargas de vehículos. Al mismo tiempo, se aumenta la capacidad de carga de la estructura y se puede reducir el espesor.

b. Asfaltos líquidos

- **Curado rápido (rc).** ES asfalto con gasolina como reductor de agua se identifica con las letras "RC" (Rapid Curing) seguidas de un número que indica grado en viscosidad cinemática en centistokes como medida. De acuerdo a esto, se tienen los siguientes asfaltos RC. (Leiva, 2018)

Tabla 2. *Tipos de asfaltos líquidos RC*

GRADO	RESIDUO ASFALTICO EN VOLUMEN
RC- 70	55%
RC- 250	65%
RC-800	75%
RC-3000	80%

Fuente: *Carreteras calles y aeropistas - Raúl Valle Rodas*

c. Asfaltos emulsionados



- De asentamiento rápido: RS-1 y RS-2
- De asentamiento medio: M5-1
- De asentamiento lento: 55-1

2.2.2.2. Tipo de cemento asfáltico empleado en la investigación

La presente investigación está orientada a obtener y evaluar la mejor proporción de polímero (EPS) para la elaboración de mezclas asfálticas en caliente, y también hacer un diseño de mezcla adecuado para las solicitaciones de tráfico pesado, el cemento asfáltico convencional empleado en el diseño fue PEN 120 – 150 proveniente de la refinería Conchan-Petro Perú (Lima), basado en la normativa EG-2013 del MTC, de acuerdo a la temperatura media anual y la recomendaciones para zonas de altura mayor a 3000 msnm, se hace la selección del cemento asfáltico.

Tabla 3. *Recomendaciones sobre los grados de asfalto adecuados para diversas condiciones de temperatura.*

Temperatura de Aplicación	Grado del asfalto
Fío, para temperatura media anual ≤ 7 °C	PEN 120/150, 85/100
Templado, para temperatura media anual entre 7 °C y 24 °C	PEN 85/100, 60/70
Caliente, temperatura media anual ≥ 24 °C	PEN 60/70/ 40/50

Fuente: *Reglamento Nacional de Edificaciones 2010 Norma CE.010 Pavimentos Urbanos*

2.2.2.3. Agregados pétreos

Según (Smith & Collis, 1994) Son materiales granulares solidos inertes que se emplean en los firmes de las carreteras con o sin adición de elementos activos y con



granulometrías adecuadas; se utilizan para la fabricación de productos artificiales resistentes, mediante su mezcla con materiales ligantes asfálticos.

2.2.2.3.1. Tipos de agregados pétreos

Según (Smith & Collis, 1994) El tipo de agregado pétreo se puede determinar, de acuerdo a la procedencia y a la técnica empleada para su aprovechamiento, se pueden clasificar en los siguientes tipos:

a) Agregados naturales.

(Smith & Collis, 1994) Se refiere a los materiales que solo se emplean después de ajustar su tamaño para satisfacer los requisitos específicos de su destino final.

b) Agregados de trituración.

(Smith & Collis, 1994) Estos materiales se obtienen al triturar diversas rocas de cantera o al utilizar las granulometrías no aceptadas de los agregados naturales. Se incluyen todos los materiales de cantera que cumplan con las propiedades físicas requeridas.

2.2.2.3.2. Clasificación de agregados

a) Agregado grueso

Según el Sistema de Clasificación de Suelos SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos), se denomina agregado grueso a la porción del agregado pétreo total que permanece retenido en el tamiz de tamaño número 4..

- **Granulometría**

La granulometría del tamaño de las partículas es la propiedad física fundamental original de cada grupo de partículas y tiene una gran influencia en la resistencia mecánica del grupo (esqueleto mineral). Las partículas sustancialmente continuas se usan comúnmente para lograr la máxima



compacidad del paquete, aunque también se usan partículas discontinuas en ciertas mezclas asfálticas. Para hacer coincidir la medición del tamaño de partícula con la zona estándar, comience con fracciones homogéneas que se mezclen en las proporciones adecuadas. El análisis del tamaño de las partículas se realiza a través de un proceso de tamizado utilizando procedimientos similares a los del suelo.

El tamaño máximo del agregado generalmente está limitado por consideraciones relacionadas con el espesor de la capa de extensión, la trabajabilidad, la segregación y otros factores. Por otro lado, si están presentes partículas finas, su contenido y plasticidad generalmente deben ser limitados. Para las mezclas asfálticas, la fracción de tamaño por debajo de $63\ \mu\text{m}$, conocida como polvo mineral o relleno, es de particular importancia. Esto se debe a que algunas propiedades importantes de la mezcla dependen de la combinación de polvo mineral y ligante asfáltico formando la denominada mezcla asfáltica.

- **Rozamiento interno**

La resistencia a la deformación o capacidad portante de las capas de pavimento depende principalmente de la fricción interna del esqueleto mineral y de las fuerzas cohesivas proporcionadas por los ligantes o agregados, si los hay. La fricción interna aumenta por la presencia de partículas angulares y texturas superficiales rugosas como las que se encuentran en los agregados triturados. Además, el tamaño de partícula del agregado y el porcentaje de vacíos en el material compactado también tienen un impacto significativo. En



general, cuanto más denso es el pavimento, mayor es la resistencia mecánica, lo que hace que la compresión sea un factor muy importante.

- **Angularidad del agregado grueso.**

La forma angular del agregado grueso ayuda a crear fricción interna entre las partículas para fortalecer la estructura del camino. Esto mantiene las partículas gruesas en su lugar y evita que se deslicen mientras se usa el piso. El uso de aditivos triturados aumentará el ángulo de las partículas. La mayoría de las reglamentaciones establecen requisitos mínimos para el ángulo del agregado grueso, pero esto depende de las condiciones de tráfico que encontrará el pavimento.

- **Forma del agregado grueso**

Las especificaciones para el agregado grueso pueden variar ligeramente dependiendo del tipo de mezcla asfáltica utilizada y el nivel de tráfico al que esté expuesto el pavimento. Idealmente, se busca que las partículas tengan formas cuboides, evitando o limitando la presencia de formas planas, alargadas o en forma de lajas. Estas formas mencionadas son más susceptibles a fracturarse bajo las condiciones de carga del tráfico, lo que altera las características granulométricas y propiedades iniciales de las mezclas asfálticas. Por tanto, se prefiere que el agregado grueso tenga una forma más cúbica para garantizar una mayor resistencia y durabilidad del pavimento.

- **Resistencia a la fragmentación**

Los agregados deben cumplir con los requisitos mínimos específicos de resistencia al desgaste o al astillado. Esto muestra cómo se comportan los



agregados cuando se usan en mezclas asfálticas y durante la puesta en marcha del pavimento.

- **Adhesividad del agregado**

El agregado grueso exhibe un comportamiento particular en cuanto a su adhesión y resistencia al desplazamiento. Se sugiere verificar la adhesividad entre el agregado y el ligante mediante una evaluación completa de la resistencia conservada en ensayos de inmersión y compresión. Estos criterios se centran claramente en las propiedades de las mezclas asfálticas finalizadas, en lugar de enfocarse en la caracterización inicial de los materiales individuales, como los agregados y los ligantes. En resumen, se busca asegurar que las mezclas asfálticas finales presenten una buena adhesión entre sus componentes y una resistencia adecuada al desplazamiento para garantizar la calidad y durabilidad del pavimento una vez que esté en funcionamiento.

b) Agregado fino

De acuerdo con el Sistema de Clasificación de Suelos SUCS, se define como "agregado fino" a la fracción del agregado pétreo total que pasa a través del tamiz #4 y se retiene en el tamiz #200.

- **Procedencia del agregado fino**

El agregado fino utilizado se obtendrá total o parcialmente de la trituración de piedra de cantera o grava natural, o de depósitos naturales. Hay un límite en la cantidad de finos sin triturar que se pueden usar en la mezcla. La arena natural se usa comúnmente en la producción de mezclas asfálticas para pavimentación con tráfico ligero y niveles de carga bajos.



- **Limpieza del agregado fino**

El agregado fino debe estar libre de terrones de arcilla, materia vegetal, marga y otras impurezas, con el fin de evitar comportamientos inesperados del material en la mezcla, como reacciones químicas, pérdida de estabilidad, excesos de volumen y otros problemas potenciales.

- **Adhesividad del agregado fino**

En relación con los fenómenos de adhesión entre el agregado fino y el ligante, es importante considerar que las interacciones químicas o químico-físicas en las partículas más pequeñas son más complejas. Esto se debe a su mayor superficie específica, su capacidad para retener humedad y la variada naturaleza de sus componentes, lo que los hace más susceptibles a diversas transformaciones químicas, fenómenos polares, adhesividad, absorción, y otros procesos relacionados.

2.2.2.4. Selección de agregados empleados para la investigación

Los agregados utilizados para la investigación son provenientes de la cuenca del Río Vilcanota (Cusco), debido a la accesibilidad que se tuvo a la cantera. Cabe recalcar que la procedencia de los agregados no tiende ser un factor determinante o limitante para la investigación, puesto que el diseño de mezclas realizado se extiende su uso para altitudes mayores a los 3000 msnm, siempre y cuando estos cumplan los lineamientos, propiedades, características que se indica según la (EG-2013 del MTC)

Para efectos de análisis de laboratorio y su respectivo control de calidad de agregados se ubicó la cantera Morro Blanco, distrito de San Salvador (Agregado Grueso y Arena Chancada) y de la cantera Q'oya de la cuenca del Río Vilcanota (Arena Natural) ubicado en

el distrito de Calcay, entre las Provincias de La Convención y Cusco, en el departamento del Cusco, para determinar si estos agregados son óptimos para el diseño de una mezcla asfáltica en caliente.

Se estima una disponibilidad de material de forma visual un aproximado de 4700m³ de material virgen por explotar, para la cantera Morro Blanco (Agregado Grueso y Arena Chancada) ya que esta cantera lleva funcionando recientemente desde año el 2020.

De igual forma se estima una disponibilidad de material de aproximadamente unos 1400m³ para la cantera Q'oya de la cuenca del Rio Vilcanota (Arena Natural).

Figura 1. *Cantera y planta chancadora, Morro Blanco, distrito de San Salvador (Agregado Grueso y Arena Chancada)*



2.2.2.5. Filler

De acuerdo con el sistema de clasificación de suelos SUCS, la porción de agregado de piedra total que pasa a través de un tamiz #200 se llama polvo mineral. Los rellenos o polvos de relleno mineral son productos comerciales de consistencia pulverulenta fabricados especialmente para su uso en la masticación de mezclas asfálticas.



2.2.3. *Diseño de mezclas asfálticas mediante el método Marshall*

2.2.3.1. Metodología Marshall

El concepto de diseño de mezcla de pavimento por del Método Marshall fue desarrollado por Bruce Marshall, un ingeniero de asfalto del Departamento de Carreteras de Mississippi. A través de extensas investigaciones y estudios de correlación, el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE. UU. ha mejorado y agregado ciertos aspectos del procedimiento de prueba Marshall y ha desarrollado criterios de diseño de mezclas. (Garnica, Delgado, & Sandoval , 2005, pág. 1)

El método exclusivo de Marshall se aplica solo al asfalto de mezcla en caliente que se usa para pavimentar con agregados de 25 mm (1 pulgada) o menos. Sin embargo, se desarrolló un procedimiento modificado para acomodar tamaños de agregados de hasta 1,5 pulgadas (38 mm). Este método está diseñado específicamente para la planificación de laboratorio y el uso de asfalto caliente en el sitio. Debido a que las pruebas de estabilidad son de naturaleza empírica, cualquier cambio en los procedimientos estándar hará que los resultados no tengan sentido en relación con las estimaciones de rendimiento de campo. (Garnica, Delgado, & Sandoval , 2005, pág. 1)

El método Marshall emplea muestras de prueba estándar con una altura de 64 mm (2 pulgadas) y un diámetro de 102 mm (4 pulgadas). Se preparan mediante un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar mezclas de asfalto-agregado. (ASTM 01559). Los dos aspectos principales del método de diseño son, la densidad-análisis de vacíos, la prueba de estabilidad y flujo de los especímenes compactados. (Garnica, Delgado, & Sandoval , 2005, pág. 1)



El propósito fundamental del método Marshall es hallar la cantidad óptima de asfalto para una mezcla específica de agregados. Además, este método ofrece información relevante acerca de las propiedades del asfalto caliente y permite identificar los valores ideales de densidad y contenido de vacíos que deben lograrse durante la construcción de la carretera..

2.2.3.2. Procedimiento de diseño de mezclas asfálticas en caliente

Las propiedades especiales de los agregados y del asfalto afectan directamente a la estructura y comportamiento del propio pavimento. El primer caso en el método de diseño Marshall, es determinar las cualidades como son: Estabilidad, fluencia, durabilidad, trabajabilidad, resistencia al deslizamiento, etc. que debe tener la mezcla de pavimentación y seleccionar un tipo de agregado y un tipo compatible de asfalto que puedan combinarse para producir esas cualidades. (Caceres, 2007, pág. 32)

2.2.4. Selección de las muestras de material

Para iniciar la prueba, es necesario recolectar muestras de asfalto y agregados que se utilizarán en la mezcla del pavimento. Es crucial que la muestra de asfalto refleje las mismas propiedades que el asfalto empleado en la mezcla final. De igual forma, se deben obtener muestras representativas de los agregados. Esto es de suma importancia, ya que los datos obtenidos durante el proceso de diseño determinarán la fórmula o composición de la mezcla del pavimento. La receta será exacta solamente si los ingredientes ensayados en laboratorio tienen características idénticas a los ingredientes usados en el producto final. (Caceres, 2007, pág. 32)

Una amplia variedad de problemas graves, que van desde una mala trabajabilidad de la mezcla hasta una falla prematura del pavimento, son el resultado histórico de variaciones



ocurridas entre los materiales ensayados en el laboratorio y los materiales usados en la realidad. (Caceres, 2007, pág. 32)

Preparación del agregado

Para determinar las temperaturas de mezcla y compactación en el laboratorio, es necesario conocer la relación viscosidad-temperatura del cemento asfáltico utilizado. Por lo tanto, los pasos preparatorios se enfocan en los agregados para identificar con precisión sus propiedades. Estos procedimientos incluyen el secado del agregado, la determinación de su gravedad específica y la realización de análisis de tamiz con lavado. (Caceres, 2007, pág. 32)

Secando el agregado

“El método Marshall requiere de los agregados ensayos que estén libres de humedad, tan práctico como sea posible. Esto evita que la humedad afecte los resultados de los ensayos”. (Caceres, 2007, pág. 33)

“Una muestra de cada agregado a ser ensayado se coloca en una bandeja, por separado, y se calienta en un horno a una temperatura de 110 C° Después de cierto tiempo la muestra caliente se pesa y se registra su valor”. (Caceres, 2007, pág. 33)

Después de calentar completamente la muestra por segunda vez, se lleva a cabo una nueva medición de su peso, registrando el valor obtenido. Este procedimiento se repite hasta que el peso de la muestra permanezca constante después de dos calentamientos consecutivos, lo cual indica que la mayor cantidad posible de humedad evaporada. (Caceres, 2007, pág. 33).



Preparación de las muestras (probetas) de ensayo

Para preparar muestras de prueba de posibles mezclas de pavimentación, se ajusta ligeramente la cantidad de cada asfalto. El rango de contenido de asfalto usado en el espécimen se determina con base en la experiencia previa con los agregados usados en la mezcla. Este rango le da al laboratorio un punto de partida para determinar con precisión la cantidad exacta de asfalto requerida en la mezcla final. La proporción de agregado en las mezclas está formulada por los resultados del análisis granulométrico. (Caceres, 2007, pág. 34)

- **Las muestras son preparadas de las siguientes maneras:**

Tanto el asfalto como el agregado son calentados y mezclados exhaustivamente hasta que cada partícula del agregado esté cubierta por el asfalto. Estos simulan los procesos de calentamiento y mezclado que ocurren en la planta (Caceres, 2007, pág. 34).

Para determinar el contenido óptimo de asfalto, se realizan pruebas en tres probetas con un contenido de asfalto del 5%. Luego se aumenta el contenido de asfalto en un 0,5% y se obtienen tres muestras adicionales por cada aumento. Estas mezclas asfálticas calientes se inyectan en moldes Marshall precalentados como parte del proceso de preparación para la compactación. En donde se usa el martillo Marshall de compactación, el cual también es calentado para que no enfríe la superficie de la mezcla al golpearla. (Caceres, 2007, pág. 34)

Se compactan las briquetas utilizando el martillo para compactación Marshall. En nuestro caso, para tráfico pesado, se aplican "75 golpes", siendo este número de golpes dependiente del tipo de tránsito que se diseñe. Se compacta, ambas caras de cada briqueta,



con la misma cantidad de golpes para cada lado. Así una probeta recibe realmente 150 golpes, después de completar la compactación las probetas son enfriadas y extraídas de los moldes. (Caceres, 2007, pág. 34)

2.2.4.1. Procedimiento del ensayo Marshall

Según (Caceres, 2007) Existen tres procedimientos en el método de ensayo Marshall, estos son: determinación del peso específico total, medición de la estabilidad y la fluencia Marshall, el análisis de la densidad y su porcentaje de vacíos de las probetas.

a) Determinación del peso específico total

La gravedad específica total se mide tan pronto como la muestra recién compactada se enfría a temperatura ambiente. Esta escala está determinada por el método discreto especificado en la norma. MTC E 514 y AASHTO T166 ya descrito y explicado en la parte delante de ensayos, controles y de calidad en la planta de asfalto. (Caceres, 2007)

b) Ensayos de estabilidad y fluencia

Según (Caceres, 2007) El ensayo de estabilidad está dirigido a medir la resistencia a la deformación de la mezcla, la fluencia mide la de formación. Bajo carga que ocurre en la mezcla. El procedimiento de los ensayos es el siguiente:

- Las muestras se calientan a 60 °C en un baño de agua. Esta suele ser la temperatura más alta que la superficie de la carretera puede soportar durante el uso. (Caceres, 2007, pág. 35)
- Después de sacarlo del baño, seque la muestra de ensayo e inmediatamente colóquelo en el aparato Marshall. Este dispositivo consta de un mecanismo que aplica una carga a la muestra, un indicador de carga y un indicador de tensión "Fluencia". (Caceres, 2007, pág. 35)



- Durante la prueba, se aplica una carga a la muestra a una velocidad constante de 51 mm (2 pulgadas) por minuto hasta que falla la muestra. La rotura es la carga máxima que puede soportar una briqueta antes de romperse. (Caceres, 2007, pág. 35)
- La carga en el punto de falla se registra como el valor de estabilidad Marshall, mientras que la lectura de la deformación vertical diametral de la muestra se registra como la fluencia. (Caceres, 2007, pág. 35)

c) Valor de estabilidad Marshall

El valor de estabilidad Marshall es una medida de la carga bajo la cual una probeta cede o falla totalmente. Durante un ensayo cuando la carga es aplicada lentamente, los cabezales superior o inferior del aparato se acercan. Y la carga sobre la briqueta aumenta al igual que la lectura del indicador del cuadrante. Luego se suspende la carga una vez se obtiene la carga máxima, la carga máxima indicada por el medidor es el valor de estabilidad Marshall. (Caceres, 2007, pág. 36)

Debido a que la estabilidad Marshall indica la resistencia de una mezcla a la deformación, existe una tendencia a pensar que, si un valor de estabilidad es bueno, entonces un valor más alto sería mucho mejor. Para muchos materiales de ingeniería, la resistencia del material es, frecuentemente una medida de su calidad; sin embargo, este no es necesariamente el caso de las mezclas asfálticas en caliente. Las estabilidades extremadamente altas se obtienen a costa de su durabilidad. (Caceres, 2007, pág. 36)

d) Valor de fluencia Marshall



La fluencia Marshall, medida en centésimas de pulgada, representa la deformación de la briqueta. La deformación está indicada por la disminución en el diámetro vertical de la briqueta. (Caceres, 2007, pág. 36)

Las mezclas con bajos valores de fluencia y altos valores de estabilidad Marshall se consideran frágiles y duros para aplicaciones de pavimentación en uso. Aquellas que tienen valores altos de fluencia son consideradas prácticas y tienen tendencia a deformarse fácilmente bajo las cargas de tránsito. (Caceres, 2007, pág. 36)

2.2.4.2. Análisis de densidad y vacíos

Después de finalizar los ensayos de estabilidad y fluencia, se realiza un análisis de densidad y porcentaje de vacíos para cada conjunto de probetas de prueba. El propósito del análisis es el de determinar el porcentaje de vados en la mezcla compactada. (Caceres, 2007, pág. 37)

Análisis de vacíos. - Los vacíos en una mezcla asfáltica son pequeñas bolsas de aire que se encuentran entre las partículas de agregado cubiertas de asfalto. Para calcular el porcentaje de vacíos, se utiliza la diferencia entre el peso específico por cada probeta compactada, así también como el peso específico teórico máximo de la mezcla suelta sin vacíos. Este último puede ser calculado a partir de pesos específicos de asfalto y agregado de la mezcla con un margen apropiado para tener en cuenta la cantidad de asfalto absorbido por el agregado: o directamente mediante el ensayo RICE, efectuado sobre mezclas sin compactar, la cuales son pesada al aire y al agua. (Caceres, 2007, pág. 37)



Análisis del peso unitario. - El peso unitario promedio para cada muestra se determina multiplicando el peso específico total de la mezcla por 1000 kg/m³ (62.4 lb/ft³). (Caceres, 2007, pág. 37)

Análisis de VMA. - Los vacíos en el agregado mineral (VMA) se refieren al espacio presente entre las partículas de agregado en la mezcla de pavimento compactada, englobando tanto los vacíos de aire como el contenido efectivo de asfalto. Estos vacíos se expresan como un porcentaje con respecto al volumen total de la mezcla. Por lo tanto, el VMA puede ser calculado al restar el volumen de agregado (determinado mediante el peso específico total del agregado) del volumen total de la mezcla compactada. (Caceres, 2007, pág. 37)

Análisis de VLLCA. - Los vacíos llenos de asfalto, también conocidos como VLLCA, se refiere a la proporción de espacios vacíos existentes entre las partículas del agregado (VMA) que están ocupados por el asfalto. El VMA engloba tanto el asfalto como el aire presente en la mezcla. Por lo tanto, el cálculo del VLLCA se realiza restando los vacíos de aire del VMA y luego dividiendo el resultado entre el VMA expresando el valor final como un porcentaje. (Caceres, 2007, pág. 37)

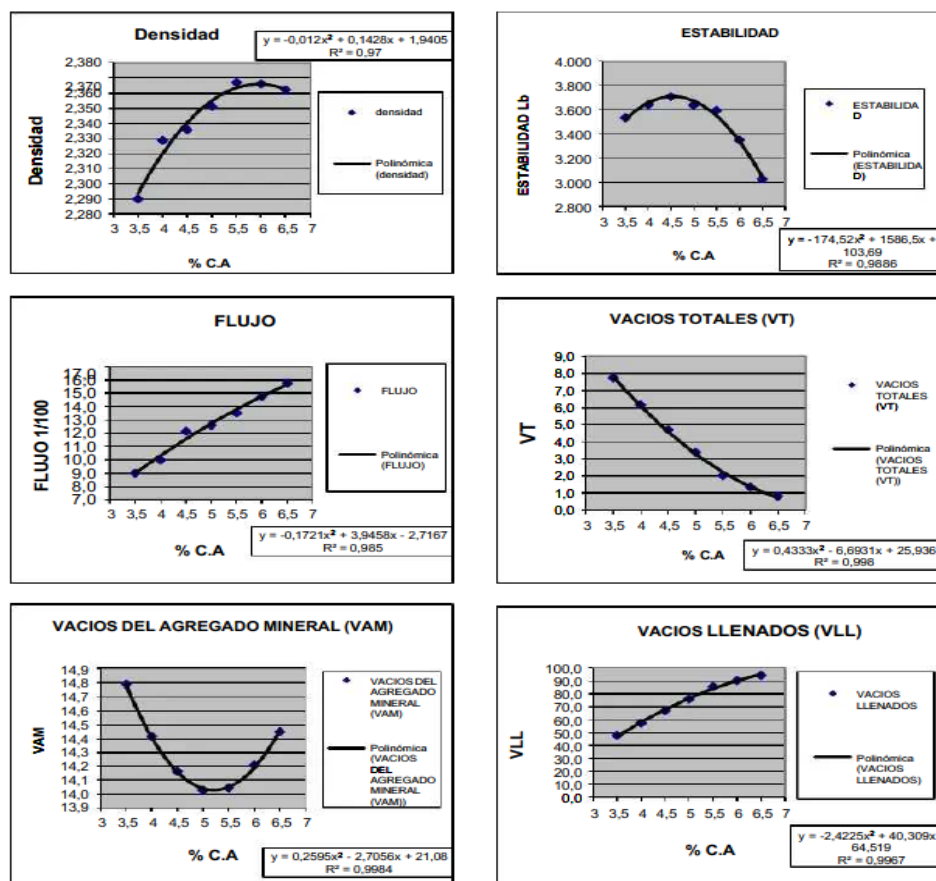
2.2.4.3. Análisis de los resultados del ensayo Marshall

Se emplean gráficos para examinar los resultados del ensayo Marshall y analizar las características específicas de cada probeta. Al estudiar estas representaciones gráficas, se pueden determinar cuál de las probetas satisface de manera óptima los criterios establecidos para el pavimento final. Seguidamente las proporciones de asfalto y agregado encontradas en esta probeta seleccionada se utilizan como base para la mezcla asfáltica final que se aplicará en la construcción del pavimento. La figura muestra 2 graficas de resultados de ensayo Marshall. (Hernandez J. C., 2008)

En cada gráfico se plasman los resultados de las distintas pruebas, representados por puntos. Las gráficas exhiben los siguientes datos: Pesos unitarios (densidades), valores de estabilidad Marshall, flujo Marshall, porcentajes de vacíos, porcentajes de vacíos en el agregado mineral (VMA) y porcentajes de vacíos llenos de asfalto (VLLCA). Teniendo los resultados de los ensayos, se trazan gráficos, como las de la figura 2 estas son tendencias en las relaciones entre el contenido de asfalto y las propiedades de la mezcla. (Hernandez J. C., 2008)

Al estudiar las gráficas, se pueden observar ciertas tendencias, que son las siguientes:

Figura 2. Tendencia de las curvas de las propiedades de diseño Marshall



Fuente: Pavimentos Flexibles - Ing. Carlos Hernández Juárez

2.2.5. Especificaciones de la metodología

2.2.5.1. Agregados

a) Agregados Minerales Gruesos:

Los siguientes requerimientos también deben ser cumplidos por los agregados gruesos.

Tabla 4. *Requerimientos para los agregados gruesos*

Ensayos	Norma	Requerimiento	
		Altitud (msnm)	
		≤3.000	>3.000
Durabilidad (al Sulfato de Magnesio)	MTC E 209	18% máx.	15% máx.
Abrasión Los Ángeles	MTC E 207	40% máx.	35% máx.
Adherencia	MTC E 517	95	95
Índice de Durabilidad	MTC E 214	35% mín.	35% mín.
Partículas chatas y alargadas	ASTM 4791	10% máx.	10% máx.
Caras fracturadas	MTC E 210	85/50	90/70
Sales Solubles Totales	MTC E 219	0,5% máx.	0,5% máx.
Absorción *	MTC E 206	1,0% máx.	1,0% máx.

**Excepcionalmente se aceptarán porcentajes mayores sólo si se aseguran las propiedades de durabilidad de la mezcla asfáltica.*

Fuente: *Manual De Carreteras “Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción RD N° 22-2013-MTC/14”*

b) Agregados minerales finos

Los agregados finos, a de cumplir los requerimientos como se indica en la siguiente tabla:

Tabla 5. *Requerimientos para los agregados finos*

Ensayos	Norma	Requerimiento	
		Altitud (m.s.n.m.)	
		≤ 3.000	> 3.000



Equivalente de Arena	MTC E 114	60	70
Angularidad del agregado fino	MTC E 222	30	40
Azul de metileno	AASTHO TP 57	8 máx.	8 máx.
Índice de Plasticidad (malla N° 40)	MTC E 111	NP	NP
Durabilidad (al Sulfato de Magnesio)	MTC E 209	-	18% máx.
Índice de Durabilidad	MTC E 214	35 mín.	35 mín.
Índice de Plasticidad (malla N° 200)	MTC E 111	4 máx.	NP
Sales Solubles Totales	MTC E 219	0,5% máx.	0,5% máx.
Absorción* *	MTC E 205	0,5% máx.	0,5% máx.

***Excepcionalmente se aceptarán porcentajes mayores sólo si se aseguran las propiedades de durabilidad de la mezcla asfáltica.*

Fuente: Manual De Carreteras “Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción RD N° 22-2013-MTC/14”

c) Gradación para mezcla asfáltica en caliente (MAC)

La gradación de la mezcla asfáltica en caliente (MAC) deberá responder a algunos de los usos granulométricos, especificados en la Tabla N°6.

Alternativamente pueden emplearse las gradaciones especificadas en la ASTM D 3515 e Instituto del Asfalto

Tabla 6. Gradación que debe cumplir para el diseño de mezcla asfáltica en caliente (MAC)

Tamiz	Porcentaje que pasa		
	MAC -1	MAC-2	MAC-3
25,0 mm (1")	100		
19,0 mm (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.º 4)	43-54	51-68	65-87
2,00 mm (N.º 10)	29-45	38-52	43-61
425 µm (N.º 40)	14-25	17-28	16-29
180 µm (N.º 80)	8-17	8-17	9-19

75 μ m (N.º 200)	4-8	4-8	5-10
----------------------	-----	-----	------

Fuente: *Manual De Carreteras “Especificaciones Técnicas para la Construcción RD N° 22- 2013-MTC/14”*

2.2.5.2. Mezcla asfáltica

Las características de calidad de la mezcla asfáltica deben ajustarse a los requisitos establecidos en la Tabla N.º 7 y N.º8 para las mezclas de concreto bituminoso correspondientes al tipo de mezcla que se esté produciendo, de acuerdo a las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras.

Tabla 7. *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 mínimos en el agregado mineral	<u>Ver Tabla N°7</u>		
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.		

Fuente: *Manual De Carreteras “Especificaciones Técnicas Generales Para la Construcción RD N° 22-2013-MTC/14”*

Tabla 8. Vacíos mínimos en el agregado mineral (VMA)

Tamiz	Porcentaje de vacíos mínimos en agregado mineral %		
	3%	4%	5%
2,36 mm (N.º 8)	19	20	21
4,75 mm (N.º 4)	16	17	18
9,50 mm (3/8")	14	15	16
12,5 mm (½")	13	14	15
19,0 mm (3/4")	12	13	14
25,0 mm (1")	11	12	13
37,5 mm (1 ½")	10	11	12
50,0 mm (2")	9	10,5	11

Fuente: Manual De Carreteras "Especificaciones Técnicas Generales Para la Construcción RD N° 22-2013-MTC/14"

Nota: Los valores de esta tabla serán seleccionados de acuerdo al tamaño máximo de las mezclas

2.2.6. Polímeros

Un polímero es una sustancia compuesta por moléculas de gran tamaño que están formadas por la repetición de unidades más pequeñas conocidas como monómeros. El grado de polimerización se refiere a la cantidad de veces que estas unidades se repiten en una molécula grande. Los materiales con un grado elevado de polimerización se denominan altos polímeros. Los homopolímeros son polímeros con un solo tipo de unidad que se repite. En los copolímeros se repiten varias unidades distintas. (Billmeyer, 2004)

2.2.6.1. Elaboración de polímeros

Según (Billmeyer, 2004) La utilización comercial de un nuevo producto como el caso de los polímeros depende del costo y sus propiedades. El costo del polímero depende principalmente de su proceso de polimerización y la disponibilidad de los monómeros utilizados. Las principales fuentes de materia prima para la producción de monómeros son:

- Productos Naturales.



- Hulla o Carbón Mineral.
- Petróleo.

2.2.6.2. Clasificación de los polímeros

- Por su estructura química.

2.2.6.2.1. Clasificación por su estructura química

Este análisis se centra en la estructura del mero de un polímero. Hay dos tipos principales de polímeros en función de su estructura de cadena.

a) Polímeros con cadena homogénea o carbónica: Poliolefina, Polímeros de tipo dieno, Polímeros de tipo estireno, Polímeros de tipo cloruro, Polímeros de tipo fluoruros, Polímeros de tipo acrílicos, Esteres polivinílicos, Poli(fenal-formaldehído).

b) Polímeros con cadena heterogénea: Poli éter. Poliésteres, Policarbonato, Poliamidas, Poliuretano, Amino plásticos, Polímeros celulósicos, Siliconas.

2.2.7. Asfalto modificado con polímero

2.2.7.1. Antecedentes

El inicio histórico de la modificación de ligantes hidrocarburos mediante polímeros se sitúa en la década de 1960, con la realización de los primeros proyectos de prueba en países como Italia, Francia y Alemania. Al mismo tiempo, en Estados Unidos, también surgió el interés por esta técnica, llevándose a cabo los primeros proyectos de construcción en 1960. Italia destacó en este campo al construir más de 1000 km de carreteras utilizando asfalto modificado con polímeros, aplicando capas de rodamiento con asfaltos que contenían modificaciones a través de bases secas o látex. (Robinson, 2015, pág. 15)



Para realizar la modificación del asfalto, es esencial comprender la compatibilidad entre el asfalto y el modificador para que puedan coexistir como un sistema, lo que implica que deben ser miscibles, es decir, formar una mezcla monofásica. Si no son miscibles, se producirá la inmiscibilidad, lo que resultará en la aparición de una segunda fase separada del sistema. Un polímero es compatible con el asfalto cuando la heterogeneidad de la mezcla no se puede apreciar por un examen visual. (Robinson, 2015, pág. 15)

2.2.7.2. Definición

Los asfaltos modificados se obtienen mediante la incorporación de un polímero o hule molido al asfalto. Esta adición tiene el propósito de modificar las características físicas y geológicas del asfalto para disminuir su susceptibilidad a variaciones de temperatura, humedad y oxidación, al tiempo que mejora su capacidad de adherencia con el material pétreo. Aumentar la resistencia de las mezclas asfálticas a la deformación y esfuerzos de tensión repetidos. (Robinson, 2015, pág. 15)

Principales modificadores utilizados en el asfalto

- **Elastómeros:** Con propiedades especiales que les permiten exhibir una gran elasticidad y capacidad de recuperación después de sufrir deformaciones temporales (caucho, SBS, SBR, isopreno).
- **Plastomeros:** Rigidizan el asfalto ofreciendo resistencia, como consecuencia no son deformables elásticamente (PVC, EVA, EPS).

2.2.7.2.1. Poliestireno Expandido (EPS)

Según (Medina & De la Cruz, 2015). El poliestireno expandido, un material termoplástico, se utiliza ampliamente en la industria de la construcción debido a su baja densidad, lo que permite reducir los esfuerzos en la parte estructural donde se aplica. Por



ejemplo, se utiliza en placas como juntas entre elementos estructurales para prevenir futuras fallas y también se emplea en losas aligeradas para disminuir la densidad. Aunque el poliestireno expandido ha demostrado ser beneficioso en aplicaciones de construcción, sus características han sido poco aprovechadas en el campo de la infraestructura vial.

Según (Herrera, 2015)“Capacidad del material termoplástico de resistir esfuerzos de compresión, es decir, fuerzas que intenten comprimirlo.” (2015, p.19) El poliestireno expandido se destaca por su baja densidad, que oscila entre 10 kg/m^3 y 35 kg/m^3 , lo que lo hace ligero pero resistente. Esto lo convierte en un material de relleno ligero utilizado en diversos procesos constructivos y también en la fabricación de muebles livianos para el hogar. Además, muestra una buena resistencia a la compresión debido a su comportamiento plástico, lo que le permite disipar cargas que intenten comprimirlo.

Según (Herrera, 2015) Otra propiedad destacada es su capacidad de aislamiento térmico. La estructura celular del poliestireno expandido, compuesta por aire incluido, le confiere una excelente capacidad de aislamiento térmico. Esto lo hace útil en aplicaciones de construcción, como en losas aligeradas y placas, donde se busca controlar el calor. En términos de su comportamiento ante el agua y el vapor, el poliestireno expandido no es higroscópico, lo que significa que no absorbe grandes cantidades de agua. Su nivel de absorción se encuentra generalmente en el rango del 1% al 3%. Por último, el poliestireno expandido puede presentar variaciones en su estabilidad frente a la temperatura debido a la exposición térmica.

2.2.7.2.2. *Propiedades Generales del Poliestireno expandido*

Según (Almeida, 2014) Los asfaltos modificados con este tipo de polímero termoplástico cuando son añadidos en bajas proporciones, poseen las siguientes propiedades: Resistencia al envejecimiento, resistencia al calor, baja viscosidad.

En el plano mecánico: La resistencia Marshall aumenta de 2 a 2.5 veces a 25°C a más temperatura; mientras que a 0°C - 25°C es prácticamente igual a la de un asfalto convencional. (Almeida, 2014) y como demás propiedades: Buena resistencia a deformaciones permanentes, buena estabilidad térmica a un costo razonable, excelente resistencia al resquebrajamiento en flexión es decir a las fatigas provocadas por las flexiones o vibraciones repetidas y aumentan la cohesión de las mezclas a medida que se aumenta el contenido del polímero.

• Propiedades físicas

Densidad: Los productos y artículos terminados con poliestireno expandido (EPS) se caracterizan por ser extremadamente livianos pero resistentes. Dependiendo de la aplicación, las densidades van desde 10 kg/m³ hasta 50 kg/m³.

Resistencia Mecánica: La resistencia de los productos EPS al estrés mecánico generalmente se evalúa en base a las siguientes propiedades:

- Resistencia a la compresión para una deformación del 10%.
- Resistencia a la flexión.
- Resistencia a la tracción.
- Resistencia a la cizalladura o esfuerzo cortante.
- Fluencia a compresión



Aislamiento térmico: Los productos y materiales hechos de poliestireno expandido (EPS) tienen excelentes efectos de aislamiento del calor y el frío. Este excelente aislamiento térmico se debe a la estructura del material, que consiste esencialmente en aire rodeado por una estructura celular de poliestireno. El material consta de aproximadamente 98 % de aire y solo 2 % de sólidos (espuma de poliestireno). Todos sabemos que el aire quieto es un buen aislante. La capacidad de aislamiento térmico de un material se define por su conductividad térmica λ . Esto, al igual que las propiedades mecánicas, depende de la densidad aparente del producto EPS.

Comportamiento frente al agua: La espuma de poliestireno no es higroscópica. Incluso cuando el material está completamente sumergido en agua, los valores de absorción son mínimos, con valores entre 1 y 3% en volumen (prueba de inmersión después de 28 días). El desarrollo de nuevas materias primas ha dado como resultado productos con una absorción de agua aún menor.

Estabilidad dimensional: Como ocurre con todos los materiales, los productos de EPS están sujetos a variaciones dimensionales debido al calor. Estas variaciones se evalúan utilizando el coeficiente de expansión térmica. Para productos EPS, 0,05 a 0,07 mm por metro de longitud y Celsius, independientemente de la densidad. Por ejemplo, una placa aislante de 2 metros de largo hecha de espuma de poliestireno se somete a un salto de temperatura de 20 °C y cambia de longitud entre 2 y 2,8 mm.

Estabilidad frente a la temperatura: El rango de temperatura en el que este material puede usarse con seguridad sin afectar sus propiedades no está restringido por un límite inferior (excepto por variaciones dimensionales debido a la contracción). En el extremo superior, los límites de temperatura de aplicación son alrededor de 100 °C para efectos a

corto plazo y alrededor de 80 °C para efectos a largo plazo, con una carga de material de 20 kPa.

Comportamiento frente a factores atmosféricos: La luz ultravioleta es la única que realmente importa. La exposición prolongada a la luz ultravioleta hace que la superficie del EPS se vuelva amarilla y quebradiza, y los elementos la erosionan. Estos efectos solo son evidentes después de una exposición prolongada a la luz ultravioleta y, por lo tanto, no se consideran para aplicaciones de embalaje.

Tabla 9. *Resumen propiedades físicas*

PROPIEDADES	UNIDADES	VALORES DE MARGEN DE OSCILACION
Densidad nominal	Kg/m ³	10-35
Densidad mínima	Kg/m ³	9-31.5
Espesor mínimo	mm	50-20
Conductividad térmica λ (10°C)	mW (Mk)	46-33
Tensión por compresión con deformación al 10%	KPa	30-25
Resistencia permanente a la compresión con una deformación al 10%	KPa	15-70
Resistencia a la flexión($\sigma\beta$)	KPa	50-375
Resistencia de cizallamiento	KPa	25-184
Resistencia a la tracción	KPa	<100-580
Módulo de elasticidad	MPa	<15-108
Indeformabilidad al calor instantáneo	°C	100
Indeformabilidad al calor duradera con 20.000 N/M ²	°C	80
Coefficiente de dilación térmica lineal	I/K(Xe-5)	5-7

PROPIEDADES	UNIDADES	VALORES DE MARGEN DE OSCILACION
Capacidad térmica específica	J/K(Kgk)	1210
Clase de reacción al fuego	-	M1-M4
Absorción de agua en condiciones de inmersión al cabo de 7 días	%(vol)	0.5-1.5
Absorción de agua en condiciones al cabo de 28 días	%(vol)	1-3
Índice de resistencia a la difusión de vapor de agua	-	<20-120

Fuente: *Instituto Mexicano de Plásticos Industriales, S.C*

- **Propiedades químicas**

Según (Beranjano & Caicedo , 2017). El poliestireno expandido es resistente a muchos productos químicos. Cuando se utilizan adhesivos, pinturas a base de solventes y vapores condensados de estos productos, se puede esperar el ataque de estas sustancias. En la siguiente tabla se proporciona información detallada sobre la estabilidad química del EPS.

Tabla 10. *Resumen propiedades químicas*

SUSTANCIA ACTIVA	ESTABILIDAD
Solución salinica (agua de mar)	Estable: el EPS no se destruye con la acción prolongada
Jabones y soluciones tensoactivos	Estable: el EPS no se destruye con la acción prolongada
Lejía	Estable: el EPS no se destruye con la acción prolongada
Ácidos diluidos	Estable: el EPS no se destruye con la acción prolongada
Ácidos clorhídricos (35%)	Estable: el EPS no se destruye con la acción prolongada
Ácidos nítricos (50%)	Estable: el EPS no se destruye con la acción prolongada
Ácidos concentrados	Estable: el EPS se contrae o se disuelve
Soluciones alcalinas	Estable: el EPS se contrae o se disuelve
Disolventes orgánicos (acetonas esterres)	Estable: el EPS se contrae o se disuelve
Hidrocarburos alifáticos saturados	Estable: el EPS se contrae o se disuelve



SUSTANCIA ACTIVA	ESTABILIDAD
Aceites de parafina y vaselina	Relativamente estable: en una acción prolongada el EPS puede contraerse o ser ataca su superficie
Aceites de Diesel	Estable: el EPS se contrae o se disuelve
Carburantes	Estable: el EPS se contrae o se disuelve
Alcoholes (metanol etanol)	Estable: el EPS se contrae o se disuelve
Aceites de silicona	Relativamente estable: en una acción prolongada el EPS puede contraerse o ser ataca su superficie

Fuente: *Instituto Mexicano de Plásticos Industriales, S.C*

- **Propiedades biológicas**

Según (Beranjano & Caicedo , 2017) La espuma de poliestireno no se pudre, no se enmohece ni se descompone. También es inmune al ataque de bacterias del suelo. Los productos de EPS cumplen con los requisitos actuales de higiene, seguridad e higiene y, por lo tanto, son completamente seguros para usar en la producción de artículos de embalaje destinados al contacto con alimentos. En cuanto a la temperatura de exposición, mantiene dimensiones estables hasta los 85°C. Sin descomposición ni generación de gases nocivos.

2.2.7.3. Modificación del asfalto

Según (Instituto del Asfalto, 1982) La modificación del asfalto es una nueva técnica utilizada para el aprovechamiento efectivo de asfaltos en la pavimentación de vías carreteras. Esta estrategia se fundamenta en añadir polímeros a los asfaltos convencionales con el objetivo de potenciar sus características mecánicas, especialmente su capacidad para resistir deformaciones derivadas de condiciones climáticas y el tráfico vehicular (carga de los vehículos)

Según (Instituto del Asfalto, 1982) Los objetivos que se persiguen con la modificación de los asfaltos con polímeros, es contar con ligantes más viscosos a temperaturas elevadas para reducir las deformaciones permanentes, de las mezclas que



componen las capas o superficie de rodamiento, aumentando la rigidez. Además de mejorar la resistencia a las deformaciones causado por factores climáticos y fatiga, la adición de polímeros también tiene como objetivo reducir el fisuramiento debido a efectos térmicos a bajas temperaturas y mejorar la elasticidad del asfalto.

Estructura de los asfaltos modificados

Según (Instituto del Asfalto, 1982) Los asfaltos modificados con polímeros están constituidos por dos fases, una formada por pequeñas partículas de polímero hinchado y otra por asfalto. En composiciones con bajos niveles de polímeros, el asfalto forma una estructura continua con el polímero disperso en su interior. No obstante, al aumentar la cantidad de polímero en el asfalto, se produce una inversión de fases, donde el polímero hinchado se convierte en la fase continua, y el asfalto disperso se vuelve la fase discontinua. Esta morfología bifásica y las interacciones entre las moléculas del polímero y los componentes del asfalto parecen ser responsables de las modificaciones en las propiedades de los asfaltos cuando son modificados con polímeros.

El asfalto modificado con polímeros muestra una mayor flexibilidad y resistencia a deformaciones en temperaturas frías, mientras que mantiene una mayor estabilidad y resistencia a ablandarse en temperaturas más elevadas. Así, se logra un pavimento más duradero y con mejor rendimiento en diferentes condiciones climáticas y de tráfico.



CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1.1. *Tipo de investigación*

La presente investigación es de tipo cuantitativo, puesto que tiene como propósito realizar un testeo del comportamiento mecánico y durabilidad de la mezcla asfáltica con la sustitución de partículas de poliestireno expandido, para lo cual se elaboró probetas en distintos porcentajes de poliestireno, controladas y reguladas para midiendo objetivamente el resultado, y así se determinó porcentaje óptimo. “La metodología cuantitativa de acuerdo con Tamayo & Tamayo, Mario (2014), consiste en el contraste de teorías ya existentes a partir de una serie de hipótesis surgidas de la misma, siendo necesario obtener una muestra, ya sea en forma aleatoria o discriminada, pero representativa de una población o fenómeno objeto de estudio”.

3.1.2. *Nivel de investigación*

El nivel de esta investigación es EXPLICATIVO, ya que se centra en determinar las causas que originan la variación de resultados al manipular la variable independiente. “La investigación Explicativa pretende establecer las causas de los eventos, sucesos o fenómenos que se estudian”. (Hernández, Fernandez, & Baptista, 2010).

3.1.3. *Población*

Se denomina población al “conjunto objeto de estudio, es decir, cualquier agrupación de datos o elementos con características comunes que se desean analizar. (Hernández, Fernandez, & Baptista, 2010, pág. 175).



De acuerdo a lo planteado la población que se tuvo como núcleo de estudio para esta investigación fueron el conjunto de probetas cilíndricas de mezcla asfáltica convencional y mezcla asfáltica modificada con sustitución parcial de Poliestireno Expandido (EPS) en un 1.5%, 3.0 % y 4.5% con respecto al peso del cemento asfáltico empleado para cada probeta.

La selección de los porcentajes de poliestireno expandido, se hizo en base a los antecedentes, donde Arévalo y Lucho (2019) aplicó poliestireno expandido, llegando a la conclusión que este influenció en las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas en caliente al añadir en porcentajes de 0.2%; 0.3%; 0.5% de poliestireno expandido en relación al contenido de asfalto, obteniendo mejores resultados en el diseño para mezcla asfáltica modificada , con la adición de 0.3% de poliestireno expandido , sin embargo (Aguilar & Infanzón, 2020), indica que no debería superarse el porcentaje de aditivos o modificador en más del 50% de peso en volumen del cemento asfáltico, puesto que repercutirá en las propiedades originales de la misma, y esta modificación vendría a tener mayores propiedades del polímero que del propio bitumen.

Utilizando un total 41 probetas de dimensiones normalizadas de prueba 64 mm (2.5”) de altura nominal por 102 mm (4”) de diámetro y 12 probetas de dimensiones normalizadas de prueba 102 mm (4”) de espesor por 102 mm (4”) de altura, para los ensayos de resistencia a la compresión simple e inmersión- compresión; separadas en grupos de control.

3.1.4. Muestra

La muestra es “Es un subconjunto o parte del universo o población en que se llevará a cabo la investigación. Hay procedimientos para obtener la cantidad de los componentes de la muestra como fórmulas, lógica y otros que se verá más adelante. La muestra es una parte representativa de la población. Subgrupo del universo o población del cual se recolectan los

datos y que debe ser representativo de esta. (Hernandez, Fernandez , & Baptista , 2014, pág. 173).

La muestra está representada por el número de especímenes preparados para realizar los ensayos de laboratorio conforme al diseño cuasi - experimental planteado.

Según la norma ASTM International. (2016). Práctica estándar para la preparación de especímenes bituminosos usando el aparato Marshall, la elaboración de briquetas se deben elaborar a una cantidad no menor de 3 briquetas ni más de 5 para cada porcentaje con un incremento de 0.5% de cemento asfáltico para el ensayo Marshall. Se considera que un resultado es el promedio de las pruebas de tres muestras indicado en la ASTM D6927. Basados en la ASTM D75 Práctica para muestreo de Agregados, ASTM C702 Práctica para reducir muestras de agregados al tamaño de prueba. Se recolectaron las muestras necesarias para llevar a cabo los ensayos en esta investigación, como se muestran en las tablas 10, 11, 12, 13, 14 y 15.

Tabla 11. *Cantidad de briquetas Marshall realizadas para el diseño óptimo de mezcla asfáltica en caliente convencional.*

DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE CONVENCIONAL	
TIPO DE MATERIAL	CANTIDAD DE BRIQUETAS
Mezcla asfáltica convencional con 5.0% de asfalto	3
Mezcla asfáltica convencional con 5.5 % de asfalto	3
Mezcla asfáltica convencional con 6.0 % de asfalto	3
Mezcla asfáltica convencional con 6.5 % de asfalto	3
Mezcla asfáltica convencional con 7.0 % de asfalto	3
SUB TOTAL	15



TOTAL	1
	5

Fuente: *Elaboración propia*

Tabla 12. *Cantidad de briquetas Marshall realizadas para el diseño óptimo de mezcla asfáltica en caliente Modificado.*

DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE CONVENCIONAL	
TIPO DE MATERIAL	CANTIDAD DE BRIQUETAS
Mezcla asfáltica convencional Optimo	3
Mezcla asfáltica convencional Optimo + 1.5% EPS	3
Mezcla asfáltica convencional Optimo + 3.0 EPS	3
Mezcla asfáltica convencional Optimo + 4.5% EPS	3
SUB TOTAL	12
TOTAL	12

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13. *Cantidad de ensayos Resistencia a compresión simple.*

RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE	
TIPO DE MATERIAL	CANTIDA D DE PRUEBAS
Mezcla asfáltica CONVENCIONAL OPTIMO	3
Mezcla asfáltica MODIFICADO OPTIMO	3
SUB TOTAL	6
TOTAL	6

Fuente: *Elaboración propia*

Tabla 14. *Cantidad de ensayos Cántabro de perdida por desgaste.*

CANTABRO DE PERDIDA POR DESGASTE		
TIPO DE MATERIAL	CANTIDAD	DE
	PRUEBAS	
Mezcla asfáltica CONVENCIONAL OPTIMO	3	
Mezcla asfáltica MODIFICADO OPTIMO	3	
SUB TOTAL	6	
TOTAL	6	

Fuente: *Elaboración propia*

Tabla 15. *Cantidad de ensayos Tracción indirecta.*

TRACCION INDIRECTA		
TIPO DE MATERIAL	CANTIDAD	DE
	PRUEBAS	
Mezcla asfáltica CONVENCIONAL OPTIMO	3	
Mezcla asfáltica MODIFICADO OPTIMO	3	
SUB TOTAL	6	
TOTAL	6	

Fuente: *Elaboración propia*

3.1.5. *Delimitación temática*

En nuestro trabajo de investigación, enfrentamos ciertas limitaciones, como la escasez de documentación experimental y la falta de disponibilidad de equipos necesarios para el diseño de mezclas asfálticas en algunos casos.

3.2. **DESARROLLO EXPERIMENTAL**

Para el desarrollo de la presente tesis, se contó con una parte práctica llevada a cabo en laboratorio, para el control de calidad de agregados, control de calidad de asfalto convencional Y control de calidad de asfaltos modificado, dichos ensayos fueron realizados



en el laboratorio de Mecánica de Suelos y Pavimentos de la Escuela Profesional de Ingeniería civil de la Universidad Nacional del Altiplano Puno.

Los ensayos de laboratorio se efectuaron con el propósito de determinar los parámetros correspondientes a cada prueba y verificar si cumplen con los rangos establecidos por la ASTM y el MTC. Estos ensayos permiten comprobar las propiedades beneficiosas que los asfaltos modificados proporcionan a las mezclas, especialmente en las aplicaciones mencionadas anteriormente.

3.3. ENSAYOS DE CONTROL DE CALIDAD DE AGREGADOS

3.3.1. Agregados pétreos

Se entiende por agregado pétreo a cualquier tipo de pétreo empleado tanto en mezclas de asfalto como en capas de protección, de acuerdo a requerimientos específicos. Agregado grueso son los agregados pétreos retenidos en el tamiz 4.75 mm (N° 4) y agregado fino, a la porción que pasa dicho tamiz. Otro constituyente que se puede adicionar al agregado es el filler, el que deberá estar constituido por un polvo mineral fino, que podrá ser cemento portland, cal u otro material inerte, libre de materia orgánica y partículas de arcilla, el filler son los agregados cuyo tamaño máximo absoluto es 0.63 mm (N° 30), que pasa por el tamiz 0.08 mm (malla N° 200), en más del 70% en peso.

3.3.2. Agregados utilizados para la elaboración de mezclas asfálticas

Los agregados pétreos utilizados para los ensayos de laboratorio y diseño de mezcla asfáltica, correspondiente a la presente investigación, fueron procesados y obtenidos en la planta chancadora del GRC, ubicado en el distrito de San Salvador - Cusco.

Las características de los agregados utilizados son los siguientes:

- Grava triturada 1/2"



- Grava triturada 1/4"
- Agregado fino 1/4"

A estos materiales, se les realizaron los siguientes ensayos de caracterización:

Tabla 16. *Ensayos realizados para la caracterización de los agregados gruesos*

Ensayos	Norma	Requerimiento	
		Altitud (msnm)	
		≤3.000	>3.000
Muestreo para materiales de construcción	MTC E 201	-	-
Granulometría de los agregados	MTC E 204	-	-
Durabilidad (al Sulfato de Magnesio)	MTC E 209	18% máx.	15% máx.
Abrasión Los Ángeles	MTC E 207	40% máx.	35% máx.
Índice de Durabilidad	MTC E 214	35% mín.	35% mín.
Partículas chatas y alargadas	ASTM 4791	10% máx.	10% máx.
Caras fracturadas	MTC E 210	85/50	90/70
Sales Solubles Totales	MTC E 219	0,5% máx.	0,5% máx.
Absorción *	MTC E 206	1,0% máx.	1,0% máx.

Fuente: *Elaboración propia*

Tabla 17. *Ensayos realizados para la caracterización de los agregados finos*

Ensayos	Norma	Requerimiento	
		Altitud (m.s.n.m.)	
		≤ 3.000	> 3.000
Muestreo para materiales de construcción	MTC E 201	-	-
Granulometría de los agregados	MTC E 204	-	-
Equivalente de Arena	MTC E 114	60	70
Angularidad del agregado fino	MTC E 222	30	40
Azul de metileno	AASTHO TP 57	8 máx.	8 máx.
Índice de Plasticidad (malla N.º 40)	MTC E 111	NP	NP
Durabilidad (al Sulfato de Magnesio)	MTC E 209	-	18% máx.
Índice de Durabilidad	MTC E 214	35 mín.	35 mín.
Índice de Plasticidad (malla N.º 200)	MTC E 111	4 máx.	NP
Sales Solubles Totales	MTC E 219	0,5% máx.	0,5% máx.
Absorción* *	MTC E 205	0,5% máx.	0,5% máx.

Fuente: *Elaboración propia*

3.3.3. *Desarrollo de los ensayos realizados en el agregado grueso*

3.3.3.1. **Muestreo para materiales de construcción**

a) **Definición**

Este ensayo es muy relevante, puesto que determinará la conveniencia de su utilización de los agregados, está basado en la NTP 400.010: agregados. extracción y muestreo. El muestreo, control de calidad y el ensayo del material son importantes para asegurar la durabilidad de la estructura resultante. La selección de los agregados pétreos adecuados para el diseño de la mezcla asfáltica es crucial, ya que esto impacta tanto en la estructura de la obra como en su aspecto económico. Por lo tanto, es importante tomar las precauciones necesarias para obtener muestras que reflejen con precisión la naturaleza y condiciones del material que representan.

Figura 3. *Proceso de muestreo del agregado grueso*



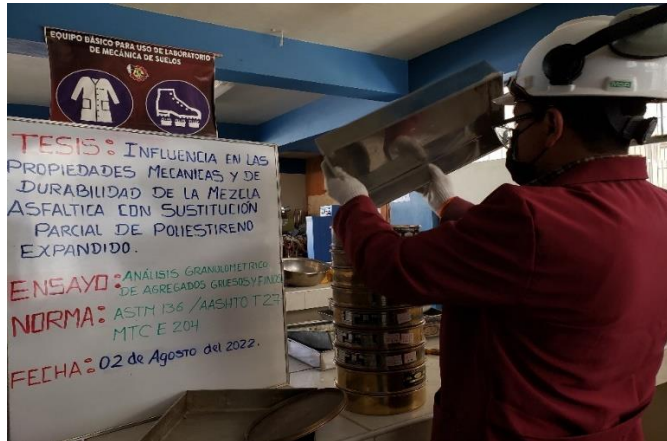
3.3.3.2. **Análisis granulométrico del agregado grueso**

a) **Definición**

El análisis granulométrico del agregado grueso y fino se lleva a cabo siguiendo las normas NTP 400.012, ASTM 0-422 y AASHTO T-127. Se detalla el método para cuantificar los tamaños de las partículas de los agregados mediante el uso de tamices de abertura

cuadrada. El propósito es analizar la distribución de tamaños de partículas en una muestra seca de agregado, clasificándolas mediante tamices dispuestos de mayor a menor abertura.

Figura 4. *Proceso del Análisis Granulométrico por tamizado del agregado grueso.*



Resultados obtenidos

Tabla 18. *Granulometría del agregado grueso*

GRANULOMETRIA					ESPECIFICACION	
TAMIZ	PESO RETENIDO	% RETENIDO	% ACUMULADO	% PASA	QUE	MAC - 2
11/2"	0.0	0.00	0.00	100.00	100	100
1"	0.0	0.00	0.00	100.00	100	100
3/4"	0.0	0.00	0.00	100.00	100	100
1/2"	563.0	21.73	21.73	78.27	80	100
3/8"	675.0	26.05	47.78	52.22	70	88
N° 4	1252.0	48.32	96.10	3.90	51	68
N° 10	63.0	2.43	98.53	1.47	38	52
N° 40	5.0	0.19	98.73	1.27	17	28
N° 80	4.0	0.15	98.88	1.12	8	17
N° 200	16.0	0.62	99.5	0.50	4	8
PASA N° 200	13.0	0.50	100.00	0.00	0	0
TOTAL	2591.0	100				

Fuente: *Elaboración propia*

3.3.3.3. Inalterabilidad de los agregados por medio del sulfato de sodio o magnesio (durabilidad)

a) Definición

El ensayo de inalterabilidad de los agregados mediante el uso de sulfato de sodio o magnesio se rige por las normas NTP 400.016, ASTM C-88 y AASHTO T-184. En esta norma se detalla el procedimiento para determinar la resistencia a la desintegración de los agregados al ser expuestos a soluciones saturadas con sulfato de magnesio o sodio. Este método proporciona información valiosa para evaluar la calidad de los agregados que estarán expuestos a la acción de agentes atmosféricos, sobre todo cuando no se dispone de datos sobre el comportamiento de los materiales que se empleara, en las condiciones climáticas de la obra.

Se advierte el hecho que los resultados que se obtengan varían según el sulfato que vaya a emplearse; y se debe tener sumo cuidado al determinar los límites en las especificaciones en que se incluya este ensayo. Ya que su precisión es ilimitada, el rechazo de los agregados que no cumplan las especificaciones pertinentes, no puede darse únicamente con él; se deben confirmar con resultados de otros ensayos más ligados a las características del material.

Figura 5. Solución de sulfato de magnesio para ser utilizado en el ensayo



Figura 6. Muestras listas para Iniciar un nuevo ciclo de inmersión



Tabla 19. Ensayo de durabilidad (MTC E 209)

DURABILIDAD AL SULFATO DE MAGNESIO DEL AGREGADO GRUESO								
TAMIZ ASTM E- 11	PESO REQUERIDO gr.	TAMAÑO DEL ARIDO	TAMIZ DETERM. PÉRDIDA	GRANUL. ORIGINAL % Ret.	PESO FRACCIÓN		%PERDIDA DESPUÉS DE ENSAYO	% DE PÉRDIDA CORREGIDA
					Antes del ensayo	Después del ensayo		
2 1/2" - 2"	5000	2"						
2" - 1 1/2"	2000	1 1/2"	1 1/4"					
1 1/2" - 1"	1000	1"	5/8"					
1" - 3/4"	500	3/4"		25.06	296.1	291	1.72	0.43
3/4" - 1/2"	670	1/2"	5/16"	27.86	329.2	328	0.36	0.10
1/2" - 3/8"	330	3/8"		28.40	339.6	335	1.35	0.38
3/8" - N° 4	300	N° 4	N° 5	18.35	216.8	213	1.75	0.32
TOTALES				100				1.24%

Fuente: *Elaboración propia*

NOTA: Todos los resultados obtenidos de durabilidad se muestran en el apartado de Anexos.

3.3.3.4. Resistencia de los agregados gruesos de tamaños menores por abrasión

o impacto en la máquina de los ángeles

a) Definición

El ensayo de resistencia de los agregados gruesos de tamaños menores 1 ½” a través de la abrasión o el impacto en la máquina de Los Ángeles sigue las normas NTP 400.019, ASTM C-31 y AASHTO T-96. En esta norma se detalla el procedimiento para evaluar la resistencia al desgaste de los agregados naturales o triturados mediante el uso de la máquina de Los Ángeles con una carga abrasiva.

Figura 7. Muestra lista para ser introducida en la máquina de Abrasión de los Ángeles



Figura 8. Muestras listas para Iniciar un nuevo ciclo de inmersión



Resultados obtenidos

Tabla 20. Resistencia de los agregados gruesos de tamaños menores por abrasión o impacto en la máquina de los ángeles

METODO		PESOS Y GRANULOMETRIAS EMPLEADOS	
PASA TAMIZ	RETIENE TAMIZ	A	B
1 1/2"	1"		
1"	3/4"		
3/4"	1/2"	2500	2500
1/2"	3/8"	2500	2501
3/8"	1/4"		
1/4"	Nº 4		
Nº 4	Nº 8		
PESO TOTAL		5000	5001
Nº de Esferas		11	11
Peso de las Esferas		442.7	445.2
Gradación		B	B
Nº Revoluciones		500	500
Peso de Muestra después del Ensayo		4,089.0	4,076.4
% Desgate		18.23%	18.07%

Fuente: *Elaboración propia*

NOTA: Todos los resultados obtenidos de durabilidad se muestran en el apartado de Anexos.

3.3.3.5. Partículas chatas o alargadas del agregado grueso

a) Definición

El ensayo de 3.3.3.5. Partículas chatas o alargadas del agregado grueso se guía por las normas ASTM D 4791. Este método permite verificar si se satisfacen las especificaciones que restringen la presencia de partículas chatas y alargadas en el agregado grueso, o bien, determinar la forma característica de dicho agregado.

Figura 9. Separación de partículas chatas y alargadas



b) Resultados obtenidos

Tabla 21. Determinación de partículas chatas y alargadas (MTC e 221, ASTM 04711)

REQUERIMIENTO INDICE APLANAMIENTO PARA ASFALTO			
		(A)	(B)
> 3,000 m.s.n.m.	% INDICE DE APLANAMIENTO	5.61	5.33
10% max.	% INDICE DE ALARGAMIENTO	6.02	5.6

Fuente: Elaboración propia

NOTA: Todos los resultados obtenidos se detallan en el apartado de Anexos.

3.3.3.6. Caras fracturadas del agregado

a) Definición

El ensayo de porcentaje de caras fracturadas, está basado en la norma: ASTM D-5821.

Esta norma detalla el procedimiento para calcular el porcentaje en peso del material que muestra una, dos o más caras fracturadas en las muestras de agregados pétreos.

Figura 10. Caras fracturadas de la muestra

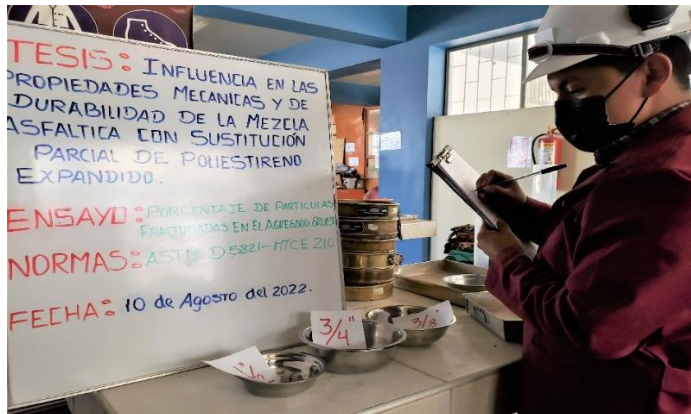


Tabla 22. Determinación de partículas fracturadas (AST M D 5821)

REQUERIMIENTO ENSAYO DE CARAS FRACTURADAS			
	< 3,000 m.s.n.m.	Resultados	
90% min	% CON UNA CARA FRACTURADA	93.20%	CUMPLE
70% min	% CON DOS CARAS FRACTURADAS	65.60%	CUMPLE

Fuente: *Elaboración propia*

NOTA: Todos los resultados obtenidos se detallan en el apartado de Anexos.

3.3.3.7. Sales solubles en agregados para pavimentos flexibles

a) Definición

El ensayo se fundamenta en las normas MTC E 219 y en el Manual de Carreteras Vol. N° 8 – 8.202.14: Agregados Pétreos. Estas normativas establecen el procedimiento a realizar para determinar el contenido de cloruro y sulfatos presentes en los agregados utilizados en mezclas asfálticas. Usando solubles en agua.

Figura 11. *Peso de las muestras después de ser ensayadas*



b) Resultados obtenidos

Tabla 23. *Determinación de sales solubles en agregados (MTC E 219)*

MUESTRA	:	01	IDENTIFICACION		
PROCEDEN.	:	CANTERA			
T.M.N.	:	3/8	1	2	3
(1) Peso Tarro (Biker 100 ml.)			15.40	16.00	16.80
(2) Peso Tarro + agua + sal			100.00	100.00	100.00
(3) Peso Tarro Seco + sal			15.50	16.10	17.00
(4) Peso de Sal (3 -1)			0.10	0.10	0.20
(5) Peso de Agua (2-3)			84.50	83.90	83.00
(6) Porcentaje de Sal			0.118	0.119	0.241
PROMEDIO				0.159%	

Fuente: *Elaboración propia*

NOTA: Todos los resultados obtenidos se detallan en el apartado de Anexos.

3.3.3.8. Peso específico y absorción de agregados gruesos

a) Definición

El ensayo de peso específico y absorción de los agregados gruesos está basado en la normativa del MTC E 206 y en la NTP 400.021: Lineamientos a seguir para realizar el ensayo de peso específico y absorción del agregado grueso, se establece el procedimiento para determinar el peso específico seco (Gs), el peso específico saturado superficialmente seco

(Gss), el peso específico aparente y la absorción del agregado grueso (luego de ser sumergido en agua durante 24 hrs).

Figura 12. *Peso de la muestra lista para ser ensayada*

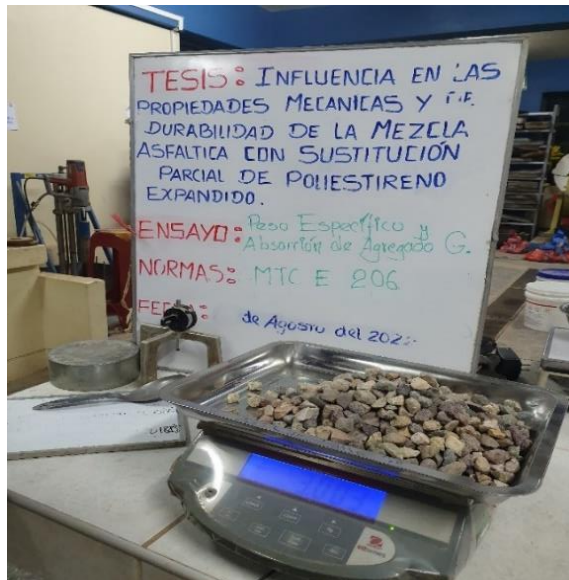


Figura 13. *Peso de la muestra sumergida en agua destilada*



b) Resultados obtenidos

Tabla 24. *Determinación del peso específico y absorción del agregado grueso*

(ASTM C-128, MTC E 206)

RESULTADOS		N° DE MUESTRA		
		1	2	3
Peso material saturado superficialmente seco (en aire)	gr	2515	2511	2508
Peso material saturado superficialmente seco (en agua)	gr	1405	1396	1393
Volumen de masa + volumen de vacíos = A-B	cm ³	1110	1115	1115
Peso material seco en estufa (105 °C)	gr	2490.52	2488.85	2485.96
Volumen de masa = C- (A - D)	cm ³	1085.52	1092.85	1092.96
Pe bulk (Base seca) = D/C	gr/cm ³	2.244	2.232	2.23
Pe bulk (Base saturada) = A/C	gr/cm ³	2.266	2.252	2.249
Pe Aparente (Base Seca) = D/E	gr/cm ³	2.294	2.277	2.275
% de absorción = ((A - D) / D * 100)	%	0.983	0.89	0.887

Fuente: Elaboración propia

NOTA: Todos los resultados obtenidos se detallan en el apartado de Anexos.

3.3.4. Desarrollo de los ensayos realizados en el agregado fino

3.3.4.1. Muestreo para materiales de construcción

a) Definición

De igual forma como se realizó el procedimiento para el muestreo del agregado grueso, en este apartado se procederá a ensayar con cierto grado de similitud. Está basado en la NTP 400.010: agregados. extracción y muestreo.

Figura 14. *Proceso de selección del material*



3.3.4.2. Análisis granulométrico del agregado fino

a) Definición

El análisis granulométrico del agregado fino, al igual que el agregado grueso, se rige por las normas NTP 400 .012, ASTM 0-422 y AASHTO T-127. Estas normas describen el método para cuantificar los tamaños de las partículas de los agregados finos mediante el uso de tamices y analizar la disposición de los tamaños de las partículas en la muestra que ha sido secada previamente, ya sea mediante exposición al aire o mediante el uso de un horno convencional.

Figura 15. *Proceso del análisis granulométrico por tamizado de los agregados finos*

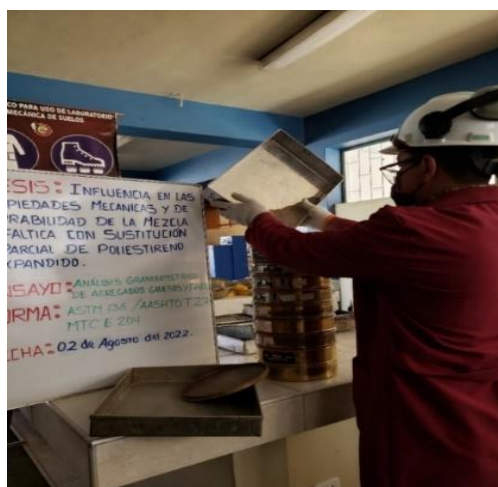


Figura 16. Resultado obtenido luego de haberse realizado el ensayo de granulometría de los agregados finos



b) Resultados obtenidos

Tabla 25. Granulometría del agregado fino natural

GRANULOMETRIA					ESPECIFICACION	
TAMIZ	PESO RETENIDO	% RETENIDO	% ACUMULADO	% QUE PASA	MAC - 2	
11/2"	0	0.00	0.0	100.0	100	100
1"	0	0.00	0.0	100.0	100	100
3/4"	0	0.00	0.0	100.0	100	100
1/2"	0	0.00	0.0	100.0	80	100
3/8"	0	0.00	0.0	100.0	70	88
N° 4	259	9.08	9.1	90.9	51	68
N° 10	599	21.01	30.1	69.9	38	52
N° 40	1027	36.02	66.1	33.9	17	28
N° 80	629	23.82	89.9	10.1	8	17
N° 200	159	5.58	95.5	4.5	4	8
PASA N° 200	128	4.49	100.0	0.0	0	0
TOTAL	2851	100				

Fuente: Elaboración propia

3.3.4.3. Equivalente de arena

a) Definición

El ensayo equivalente de arena está basado en las normas: NTP 339.146 y ASTM 0-2419. Se describe en esta norma el método para obtener la proporción del contenido de material fino perjudicial o material arcilloso en suelos y agregado fino pasante las malla N°200.

Figura 17. *Agregado Fino entrando al proceso de decantación para luego medir la altura del material fino*



b) Resultados obtenidos

Tabla 26. *Equivalente de arena (ASTM D 2419)*

Requerimiento Equivalente de Arena	Norma Técnica MTC E 114	
	> 3000 m.s.n.m.	
PROMEDIO = 73.9	ESPECIFICACION (MIN) =	70.0%
<i>Cumple</i>		

Fuente: *Elaboración propia*

NOTA: Todos los resultados obtenidos se detallan en el apartado de Anexos.

3.3.4.4. Angularidad del agregado fino

a) Definición

El ensayo de angularidad del agregado fino determina el porcentaje de vacíos con aire que está presente en las partículas menores de 2,36 mm, pasante de la malla N° 8, la cual se correlaciona con el ahuellamiento. Este ensayo de basa en la normativa del MTC E 222

Figura 18. *Proceso de ensayo de angularidad de los agregados finos*



Tabla 27. *Angularidad del agregado fino (MTC E 222)*

AGREGADO FINO: ARENA CHANCADA				
ENSAYO N°	1	2	3	REQUERIMIENTO
Peso agregado Fino	4684.0	4640.0	4683.0	
Volumen del Molde	3212.0	3212.0	3212.0	> 3,000 m.s.n.m.
Peso específico agregado Fino	2.77	2.77	2.77	40% min
% de angularidad	47.26	47.75	47.37	
PROMEDIO %		47.46		Cumple

Fuente: *Elaborado por el equipo de trabajo*

3.3.4.5. Azul de metileno

a) Definición

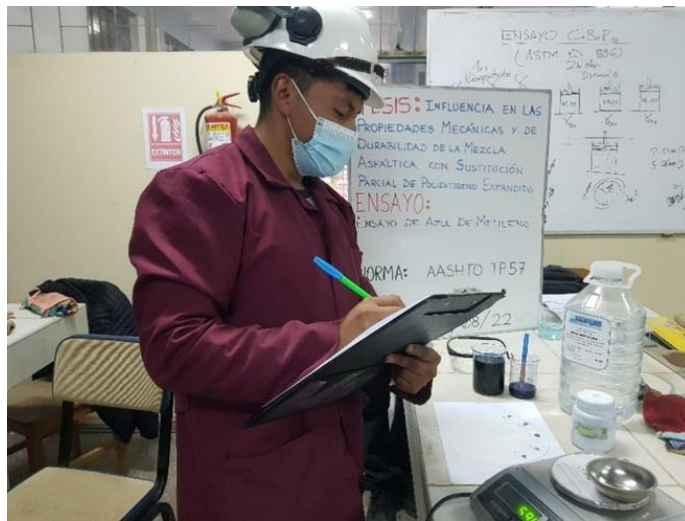
El ensayo azul de Metileno, tiene como objetivo principal caracterizar de manera global una fracción arcillosa de un suelo, siendo este resultado dependiente de la cantidad y

de la naturaleza mineralógica de la muestra. Está basado en la norma técnica ASSHTO TP 57.

Figura 19. *Peso del compuesto de azul de metileno para ser utilizado en el ensayo*



Figura 20. *Resultado obtenido después de haberse realizado el ensayo de azul de metileno en los agregados finos.*



b) Resultados

Tabla 28. *Ensayo de azul de metileno (ASSHTO TP 57)*

AGREGADO FINO: ARENA NATURAL				
Datos	ENSAYOS			REQUERIMIENTOS
	N° 01	N° 02	N° 03	
87				

Hora inicio	11:13	11:14	11:15	> 3,000
Hora final	11:23	11:24	11:25	m.s.n.m
Hora inicio	11:25	11:27	11:29	35 % min
Hora final	11:45	11:47	11:49	
OBSERVACION				
Nivel fino	4.20	4.10	4.10	
Nivel arena	3.70	3.60	3.60	Cumple
Índice Durabilidad	88.1	87.8	87.8	
Promedio Dc		87.90		

Fuente: *Elaboración propia*

3.3.4.6. Límites de Atterberg

3.3.4.6.1. Límite líquido

Este ensayo está basado en las normas: NTP 339.129, ASTM D-424 y AASHTO T-89. El límite líquido (LL) es el contenido de humedad expresado en porcentaje del suelo previamente secado al horno, donde se encuentra en el estado plástico y el estado líquido.

Figura 21. *Equipo empleado para la determinación del límite líquido Copa de Casagrande, ranurador y tarro*



Figura 22. *Muestras obtenidas para determinar el contenido de humedad a los 25 golpes*



3.3.4.6.2. *Límite plástico*

Este ensayo está basado en las normas: NTP 339.129, ASTM D-4318 y MSHTO T-90. En este ensayo se define el "límite plástico" (LP) como la humedad mínima necesaria para formar barritas de suelo de alrededor de 3.2 mm de diámetro. Para determinar esto, se rueda el suelo entre la palma de la mano y una superficie lisa (como vidrio esmerilado) y se verifica que las barritas no se desmoronen.

a) **Resultados obtenidos**

Tabla 29. *Límites de consistencia malta N.º 40 (ASTM D-424)*

DESCRIPCION		LIMITE LIQUIDO			LIMITE PLASTICO
Nº GOLPES		24	17	11	
TARRO Nº		8	12	6	
SUELO HUMEDO + TARRO	gr	24.63	26.31	25.67	NP
SUELO + TARRO	gr	21.99	23.94	23.08	
PESO DEL AGUA	gr	2.64	2.37	2.95	

PESO DEL TARRO	gr	11.1	10.08	11.44
PESO DEL SUELO SECO	gr	11.94	10.08	11.44
HUMEDAD	%	22.11	23.51	25.79
L.L.= 23.19 %		L.P.= NP %		I.P.= NP %

Fuente: *Elaboración propia*

3.3.4.7. Inalterabilidad de los agregados por medio del sulfato de sodio o magnesio (durabilidad)

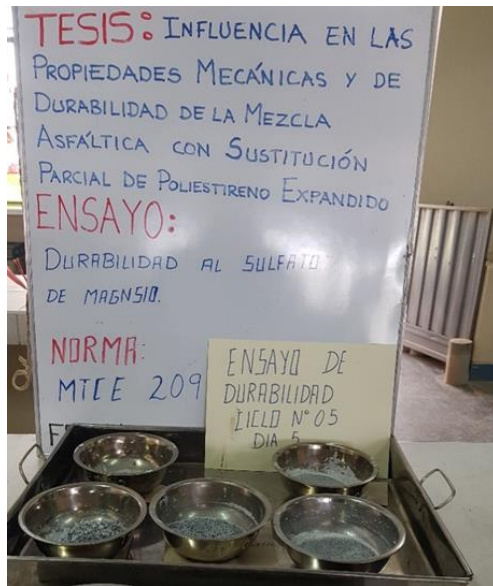
a) Definición

El ensayo que mide la inalterabilidad de los agregados mediante el uso de sulfato de sodio o magnesio está regido por las siguientes normas: NTP 400.016, ASTM C-88 y AASHTO T-184. Este procedimiento establece la forma en que se debe determinar la resistencia a la desintegración de los agregados, cuando estos son expuestos a soluciones saturadas de sulfato de sodio o magnesio.

Figura 23. *Solución de sulfato de magnesio para ser utilizado en el ensayo*



Figura 24. Resultante al someter al ciclo N° 05 por sulfato de magnesio en los agregados finos



b) Resultados obtenidos

Tabla 30. Ensayo de durabilidad (MTC E 209)

REQUERIMIENTO AGREGADO FINO	Agregado fino natural		
	Promedio		
> 3,000 m.s.n.m.			
MTCE 209	18% Max.	2.79%	CUMPLE

Fuente: Elaborado por el equipo de trabajo

NOTA: Todos los resultados obtenidos se detallan en el apartado de Anexos.

3.3.4.8. Sales solubles en agregados para pavimentos flexibles

a) Definición

Este ensayo se fundamenta en la normativa del MTC E 219 y en el Manual de Carreteras Vol. N° 8 – 8.202.14: Agregados Pétreos. En estas normativas se describen el

proceso analítico de cristalización, utilizado para determinar el nivel de cloruro y sulfatos solubles en agua que se encuentran en los agregados utilizados en las mezclas de asfalto.

Figura 25. *Peso de las muestras después de ser ensayadas*



b) Resultados obtenidos

Tabla 31. *Determinación de sales solubles en agregados (MTC E 219)*

MUESTRA : 01		IDENTIFICACION		
PROCEDEN. : CANTERA				
T.M.N. :	3/8	1	2	3
(1) Peso Tarro (Biker 100 ml.)		15.40	16.00	16.80
(2) Peso Tarro + agua + sal		100.00	100.00	100.00
(3) Peso Tarro Seco + sal		15.50	16.10	17.00
(4) Peso de Sal (3 -1)		0.10	0.10	0.20
(5) Peso de Agua (2-3)		84.50	83.90	83.00
(6) Porcentaje de Sal		0.118	0.119	0.241
PROMEDIO			0.159%	

Fuente: *Elaborado por el equipo de trabajo*

3.3.4.9. Peso específico y absorción del agregado fino

a) Definición

El ensayo de peso específico y absorción del agregado fino, el cual se basa en tres normas: NTP 400.022, ASTM C-128 y AASHTO T-84. Este proceso detalla cómo se deben

determinar los pesos específicos aparentes y reales a una temperatura de 23/23 °C, así como la absorción de los agregados que tengan un tamaño menor a 4.75 mm (tamiz N° 4), después de haber estado sumergidos en agua durante un periodo de 24 horas.

Figura 26. Muestra entrando al estado de superficie seca



NOTA: Todos los resultados obtenidos se detallan en el apartado de Anexos.

b) Resultados obtenidos

Tabla 32. Gravedad específica y absorción (ASTM C-121)

		AGREGADO FINO (ARENA NATURAL)		
RESULTADOS		N° DE MUESTRA		
		1	2	3
A. Peso natural saturado superficialmente seco	gr	502.4	501.5	503.3
B. Peso frasco + agua	gr	663.86	661.88	667.12
C. Peso frasco + agua + (A)	gr	1166.3	1163.4	1170.4
D. Peso material + agua en le frasco	gr	962.62	961.39	962.68
E. Volumen de masa + volumen de vacíos	cm3	203.6	202.0	207.7
F. Peso material seco	gr	498.6	497.7	499.3
G. Volumen de masa	cm3	199.84	198.19	203.74
H. Peso específico Bulk (base seca)	gr/cm3	2.448	2.464	2.404
I. Peso específico aparente (base saturada)	gr/cm3	2.467	2.483	2.423
J. Peso específico aparente (base seca)	gr/cm3	2.495	2.511	2.451
K. Absorción	%	0.762	0.764	0.793

Fuente: Elaboración propia

NOTA: Todos los resultados obtenidos se detallan en el apartado de Anexos.

3.3.5. *Dosificación de agregados*

Como resultado de una serie de ensayos realizados a través un programa gráfico y analítico por computadora para dosificación de agregados, a fin de obtener una adecuada graduación que satisfaga algunos de los requerimientos de usos granulométricos exigidos y recomendados por las normas para tal fin, Finalmente, se determinó utilizar la graduación MAC-2 del Ministerio de Transportes como la granulometría de diseño. Esta graduación proporcionó una mejor combinación de agregados, centrada en el tamaño máximo nominal, y se ajustó la mezcla de agregados satisfactoriamente dentro de esta, las proporciones y dosificaciones de los agregados empleados son los siguientes:

- Grava triturada ½” = 37.5%
- Arena chancada ¼” = 36.0%
- Arena natural fina = 24.5%
- Filler = 2%

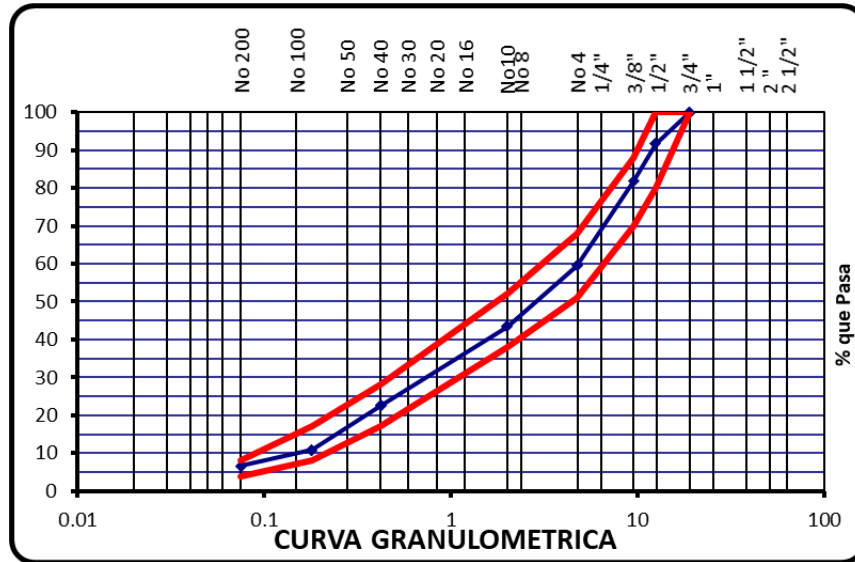
Tabla 33. *Gradación de agregados para el diseño de mezcla asfáltica MAC-2*

TAMIZ	PORCENTAJE QUE PASA			
	MAC -1	MAC -2	<i>DISEÑO REALIZADO</i>	MAC -3
25,0 mm (1”)	100	-	-	-
19,0 mm (3/4”)	80-100	100	<i>100</i>	-
12,5 mm (1/2”)	67-85	80-100	<i>91.7</i>	-
9,5 mm (3/8”)	60-77	70-88	<i>81.8</i>	100
4,75 mm (N° 4)	43-54	51-68	<i>59.6</i>	65-87
2,00 mm (N° 10)	29-45	38-52	<i>43.6</i>	43-61
425 mm (N° 40)	14-25	17-28	<i>22.6</i>	16-29
180 mm (N° 80)	8-17	8-17	<i>10-80</i>	9-19

75 mm (N° 200)	4-8	4-8	6-60	5-10
----------------	-----	-----	-------------	------

Fuente: *Elaboración propia*

Figura 27. *Curva granulométrica de la dosificación de agregados*



Fuente: *Elaboración propia*

3.3.6. *Cemento asfáltico*

El Cemento Asfáltico utilizado en este diseño de concreto asfáltico es de Penetración 120-150. Se ha optado por este ligante debido a que la investigación está centrada en una zona con una altitud superior a los 3,000 metros sobre el nivel del mar. En estas zonas de altiplano, las condiciones climáticas son severas, con temperaturas bajas, rápidos cambios térmicos y una exposición fuerte a la radiación ultravioleta, lo cual puede afectar negativamente la superficie asfáltica. Estas condiciones pueden aumentar significativamente el módulo de rigidez y generar tensiones en la estructura del pavimento, lo que podría provocar su fractura. La utilización del Cemento Asfáltico de Penetración 120-150 se implementa como una medida para contrarrestar estos efectos y mejorar la resistencia y durabilidad del pavimento.

La figura, corresponde a la certificación de cemento asfáltico 120-150, de tipo convencional del laboratorio de la Refinería de Conchán (Petroperú).

Tabla 34. Especificaciones del cemento asfáltico Pen 120 – 150

PROPIEDADES	PEN 120 - 150	ESPECIFICACIONES	
	RESULTADOS	MIN	MAX
Penetración 25°C, 100 g, 5s, 0.1 mm	126	120	150
Ductilidad 25°C, 5 cm/min, cm	>150	100	
Viscosidad Cinemática a 100°C, sCt	1951		
Viscosidad Cinemática a 135°C, sCt	270	140	
Solubilidad en Tricloroetileno, % en masa	99.7	99	
Prueba de mancha, Nafta-Xileno (25% Xileno)	Negativo		
Punto de inflamación COC, °C	280	218	
Gravedad API	8.1		
Gravedad específica a 60°/60°F	1.0135		
Punto de ablandamiento, °C	44		
Índice de penetración	-0.4	-1	1
Pérdida por calentamiento, % masa	0.57		1.3
Ductilidad del residuo, 25 °C	124	100	

Fuente: Petro – Perú

3.4. DISEÑO PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS MÉTODO MARSHALL (ASFALTO CONVENCIONAL)

El ensayo Marshall es aplicable tanto en el laboratorio para el diseño de mezclas asfálticas en caliente como en la comprobación en obra de las mismas. Este método es adecuado para mezclas asfálticas que contienen bitumen y agregados de tamaño máximo de 1". Las principales características del ensayo, son las propiedades de estabilidad, fluencia y el análisis densidad-vacíos, sobre probetas de mezcla compactadas.

El proceso de preparación de las probetas para realizar el ensayo Marshall, se especifica en líneas posteriores, estas probetas poseen un espesor de 2 1/2" y un diámetro de



4", y se compactan mediante un procedimiento específico. Se determina la densidad y los huecos de la probeta compactada, la cual se calienta a 60°C para realizar los ensayos de estabilidad y fluencia de Marshall. La carga máxima registrada durante el ensayo se denomina estabilidad Marshall de la probeta y se expresa en kilogramos. La deformación que se produce desde el principio de la aplicación de la carga hasta que esta alcanza su valor máximo se conoce como fluencia de la probeta, la cual se suele expresar en centésimas de pulgada.

Se prepara una serie de probetas con diferentes contenidos de asfalto, algunos por encima y otros por debajo del nivel óptimo estimado. En total, se preparan 6 muestras de asfalto, con un promedio de 3 probetas para cada contenido. Estas probetas se someten al mismo procedimiento explicado anteriormente para realizar los ensayos de Marshall. Los datos obtenidos se utilizan para determinar el contenido óptimo de asfalto en la mezcla y para identificar algunas de sus características físicas.

Propósito del Método:

El propósito específico del Método Marshall para mezclas asfálticas en caliente, es determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados. El método también provee información sobre propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica en caliente (Estabilidad y Flujo), establece densidades y contenidos óptimos de vacíos que deben ser cumplidos durante el proceso constructivo. El método de Marshall solo puede ser utilizado en mezclas de asfalto para pavimentación que han sido producidas en una planta caliente, utilizando cemento asfáltico clasificado por viscosidad o penetración, y que incluyen agregados con tamaños máximos de 1 pulgada o menos.



El Método Marshall se compone de los siguientes pasos: preparación para llevar a cabo los procedimientos Marshall, selección de muestras de materiales, preparación del agregado y elaboración de las probetas de ensayo.

Procedimiento del Ensayo Marshall:

El método Marshall se divide en tres fases claramente definidas: la determinación del peso específico total, la medición de la estabilidad y flujo Marshall, y el análisis de la densidad y el contenido de vacíos de las probetas.

Gráficos de Resultados:

Los resultados del ensayo Marshall se representan gráficamente para poder comprender las características específicas de cada probeta utilizada en la serie. Al estudiar las gráficas, se puede determinar cuál de las probetas cumple mejor los criterios establecidos para la carpeta asfáltica terminada. Las proporciones de asfalto y agregado en esta probeta se convierten en las proporciones utilizadas en la mezcla final. Se trazan normalmente seis gráficas representadas por puntos, que representan el contenido de asfalto en cada probeta versus: estabilidad, flujo, contenido de vacíos, porcentaje de vacíos del mineral (VMA), porcentaje de vacíos llenos de asfalto (VLLCA) y densidades (pesos unitarios).

El contenido de asfalto en la mezcla final de pavimentación se determina a partir de los resultados previamente descritos. En primer lugar, se determina el contenido de asfalto para el contenido de vacíos deseado o especificado para el proyecto (generalmente entre un 3% y un 5%). Después, se examinan todas las propiedades calculadas y medidas para este contenido de asfalto y se comparan con los criterios de diseño. Si se cumplen los criterios, este es el contenido de diseño de asfalto, o se utiliza el promedio de los valores óptimos encontrados para la estabilidad, densidad, VFA y contenido de vacíos del cemento asfáltico.



Si no se cumplen todos los criterios, se necesitarán ajustes o se deberá rediseñar la mezcla asfáltica.

3.4.1. *Parámetros Marshall*

3.4.1.1. **Cálculo del peso unitario de la muestra compactada**

Parte importante del diseño de mezclas es la determinación del peso unitario de la mezcla asfáltica compactada. Este método es útil para calcular el porcentaje de vacíos de aire en el diseño Marshall.

Los especímenes utilizados en este ensayo pueden ser mezclas asfálticas compactadas en el laboratorio o extraídos de campo. El ensayo implica pesar la muestra seca después de haber estado expuesta al aire durante al menos una hora a temperatura ambiente. Luego, la muestra se satura superficialmente y se sumerge en agua para su pesado.

El peso unitario de la mezcla asfáltica compactada es igual a:

$$G_{mb} = \frac{W}{W_{SSD} - W_{sumergido}}$$

Dónde:

G_{mb} = Peso unitario de la mezcla asfáltica compactada

W_D = Peso al aire del espécimen seco

W_{SSD} = Peso al aire del espécimen saturado superficialmente seco

W_{sumer} = Peso del espécimen saturado superficialmente seco sumergido

Para calcular nuestro contenido óptimo de asfalto convencional se obtuvieron los siguientes pesos unitarios de las probetas:

Tabla 35. *Cálculo del peso unitario de la muestra compactada*

% DE ASFALTO	PESO UNITARIO DE LA MUESTRA COMPACTADA (gr/cm ³) (Asfalto Convencional)
--------------	--



5.0 %	2.127	2.147	2.141
5.5 %	2.173	2.166	2.179
6.0 %	2.206	2.225	2.207
6.5 %	2.228	2.213	2.220
7.0 %	2.196	2.181	2.183

Fuente: *Elaboración propia*

3.4.1.2. Peso específico bulk de la combinación de agregados.

Cuando la muestra se ensaya en fracciones separadas (por ejemplo, grueso y fino), el valor del peso específico promedio se calcula con la siguiente ecuación:

$$G = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}}$$

Dónde:

G = Peso específico promedio del agregado

G1, G2, ..., G3 = Valores de pesos específico por fracción 1, 2, ..., n

P1, P2, ..., P3 = Porcentaje en pesos de la fracción 1, 2, ..., n

Para calcular nuestro contenido óptimo de asfalto convencional se obtuvieron los siguientes pasos específicos de la combinación de agregados:

Tabla 36. *Peso específico Bulk de la combinación de agregados*

% DE ASFALTO	PESO ESPECIFICO PROMEDIO DEL AGREGADO (gr/cm3)		
	(Asfalto Convencional)		
5.0 %	2.423	2.423	2.423
5.5 %	2.423	2.423	2.423
6.0 %	2.423	2.423	2.423
6.5 %	2.423	2.423	2.423
7.0 %	2.423	2.423	2.423

Fuente: *Elaboración propia*

3.4.1.3. Peso efectivo de los agregados

El procedimiento para determinar la gravedad específica efectiva no está normado por AASHTO o ASTM. Los valores se obtienen a partir del cálculo de la Peso específico máximo de

mezclas asfálticas (Rice) ASTM D-2041, este ensayo se realiza sobre mezclas sueltas, de esa manera se eliminan los vacíos de aire.

El peso efectivo de los agregados se calcula con la siguiente formula:

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

Dónde:

G_{se} = Peso efectivo de los agregados

P_b = Contenido de asfalto, porcentaje del peso total de la mezcla

G_{mm} = Peso específico máximo de la mezcla (ASTM D2041)

G_b = Peso específico del cemento asfaltico

Para calcular nuestro contenido óptimo de asfalto convencional se obtuvieron los siguientes pesos efectivos de los agregados:

Tabla 37. *Porcentaje de asfalto absorbido*

% DE ASFALTO	PESO EFECTIVO DE LOS AGREGADOS (gr/cm ³)		
	(Asfalto Convencional)		
5.0 %	2.482	2.482	2.482
5.5 %	2.486	2.486	2.486
6.0 %	2.503	2.503	2.503
6.5 %	2.509	2.509	2.509
7.0 %	2.458	2.458	2.458

Fuente: *Elaboración propia*

3.4.1.4. Porcentaje de asfalto absorbido

El porcentaje de asfalto absorbido del agregado mineral se suele expresar en términos del peso del agregado en lugar del peso de la mezcla total. La ecuación para calcular el asfalto absorbido se puede obtener de la siguiente manera:

$$P_{ba} = \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{sb} G_{se}} \times G_b \times 100$$

Dónde:

- Pba** = Porcentaje de asfalto absorbido
Gse = Peso efectivo de los agregados
Gsb = Peso específico promedio del agregado
Gb = Peso específico del cemento asfáltico

Para calcular nuestro contenido óptimo de asfalto convencional se obtuvieron los siguientes % de asfalto absorbido:

Tabla 38. *Porcentaje de asfalto absorbido*

% DE ASFALTO	PORCENTAJE DE ASFALTO ABSORBIDO (%)		
	(Asfalto Convencional)		
5.0 %	0.992	0.992	0.992
5.5 %	1.058	1.058	1.058
6.0 %	1.334	1.334	1.334
6.5 %	1.434	1.434	1.434
7.0 %	0.596	0.596	0.596

Fuente: *Elaboración propia*

3.4.1.5. Contenido de asfalto efectivo

El contenido de asfalto efectivo, P_{be} , de la mezcla se refiere al contenido total de asfalto menos la cantidad de asfalto que fue absorbida por el agregado. Es la capa de asfalto que se encuentra externamente recubriendo el agregado y es este contenido de asfalto el que determina el comportamiento de la mezcla asfáltica.



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

Dónde:

P_{be} = Contenido de asfalto efectivo, porcentaje del peso total de la mezcla

P_{ba} = Asfalto absorbido, porcentaje por peso del agregado

P_s = Contenido de agregado, porcentaje por peso total de la mezcla

P_b = Contenido de asfalto, porcentaje del peso total de la mezcla

Para calcular nuestro contenido óptimo de asfalto convencional se obtuvieron los siguientes contenidos de asfalto efectivo:

Tabla 39. *Contenido de asfalto efectivo*

% DE ASFALTO	CONTENIDO DE ASFALTO EFECTIVO (%)		
	(Asfalto Convencional)		
5.0 %	4.06	4.06	4.06
5.5 %	4.50	4.50	4.50
6.0 %	4.75	4.75	4.75
6.5 %	5.16	5.16	5.16
7.0 %	6.45	6.45	6.45

Fuente: *Elaboración propia*

3.4.1.6. Porcentaje VMA en mezcla compactada

Como ya se indicó el volumen de vacíos en el agregado mineral VMA es un factor importante para el diseño de mezclas.

El porcentaje de vacíos en el agregado mineral se obtiene de la fórmula:

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

Dónde:

VMA = Volumen de vacíos en el agregado mineral

G_{sb} = Peso específico promedio del agregado

P_b = Contenido de asfalto, porcentaje del peso total de la mezcla



G_{mb} = Peso unitario de la mezcla asfáltica compactada

Para calcular nuestro contenido óptimo de asfalto convencional se obtuvieron los siguientes % de vacíos en el agregado mineral:

Tabla 40. *Porcentaje VMA en mezcla compactada*

% DE ASFALTO	VACIOS EN EL AGREGADO MINERAL (%)		
	(Asfalto Convencional)		
5.0 %	16.156	16.156	16.156
5.5 %	15.254	15.254	15.254
6.0 %	14.163	14.163	14.163
6.5 %	14.328	14.328	14.328
7.0 %	16.060	16.060	16.060

Fuente: *Elaboración propia*

3.4.1.7. Porcentaje de vacíos de aire en la mezcla compactada

La fórmula para calcular el porcentaje de vacíos de aire puede obtenerse a partir de:

$$V_a = \left(1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}}\right) \times 100$$

Dónde:

V_a = Porcentaje de vacíos de aire en la mezcla compactada

G_{mb} = Peso unitario de la mezcla asfáltica compactada

G_{mm} = Peso específico máximo de la mezcla (ASTM D2041)

Para calcular nuestro contenido óptimo de asfalto convencional se obtuvieron los siguientes % de vacíos de aire en la mezcla compactada:

Tabla 41. *Porcentaje de vacíos de aire en la mezcla compactada*

% DE ASFALTO	VACIOS DE AIRE EN LA MEZCLA COMPACTADA (%)		
	(Asfalto Convencional)		
5.0 %	7.59	7.59	7.59
5.5 %	5.61	5.61	5.61



6.0 %	3.80	3.80	3.80
6.5 %	3.03	3.03	3.03
7.0 %	2.15	2.15	2.15

Fuente: *Elaboración propia*

3.4.1.8. Vacíos llenos con asfalto

VLLCA o VFA es simplemente el porcentaje de VMA llenado con cemento asfáltico.

Que se calcula con la siguiente fórmula:

$$VFA = \frac{VMA - VTM}{VMA} \times 100$$

Dónde:

VFA = Vacíos llenos con asfalto

VMA = Volumen de vacíos en el agregado mineral

Va o VTM = Porcentaje de vacíos de aire en la mezcla compactada

Para calcular nuestro contenido óptimo de asfalto convencional se obtuvieron los siguientes % de vacíos llenos con asfalto:

Tabla 42. *Vacíos llenos con asfalto*

% DE ASFALTO	VACIOS LLENOS CON ASFALTO (%)		
	(Asfalto Convencional)		
5.0 %	52.99	52.99	52.99
5.5 %	63.25	63.25	63.25
6.0 %	73.16	73.16	73.16
6.5 %	78.87	78.87	78.87
7.0 %	86.61	86.61	86.61

Fuente: *Elaboración propia*

3.4.2. Gráficos Marshall (resultado final)

RESULTADO DEL DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE

1. MEZCLA DE AGREGADOS (PROPORCION EN PESO)

Agregado grueso chancado	:	37.5%
Gravilla chancada	:	36%
Agregado fino zarandeado	:	24.5%
Cemento Portland	:	2%

		100%

2. CEMENTO ASFALTICO

Tipo de asfalto	:	C. A. 120/150
% Optimo de C. A.	:	6.09% +-0.3

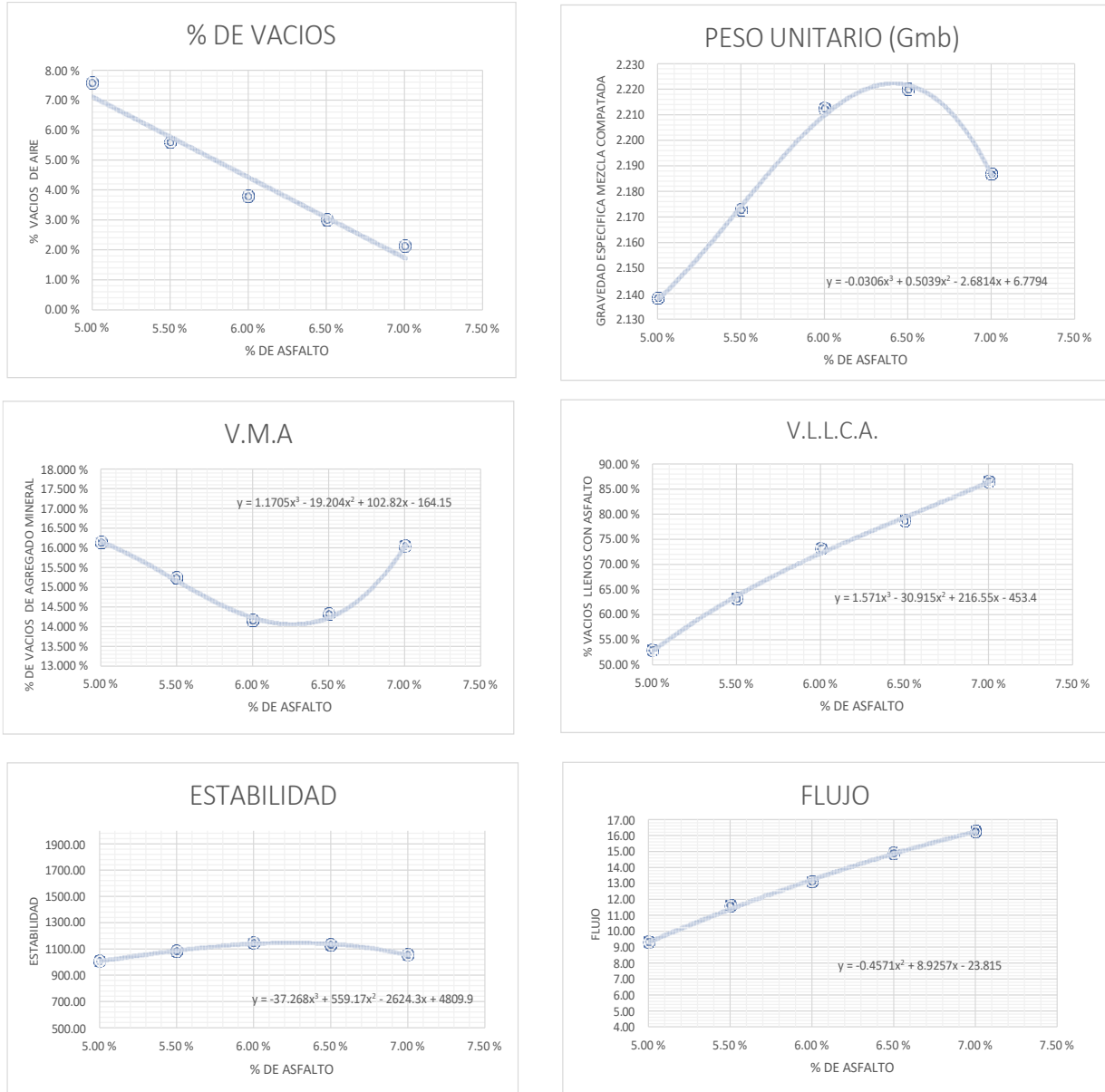
3. PROPIEDADES FISICO MECANICAS

Tabla 43. *Propiedades físico mecánicas*

PROPIEDADES	DISEÑO	ESPECIFICACIONES
% cemento asfaltico	6.16 %	
Nº de golpes en cada lado	75	
Estabilidad (kg)	1148.8	Min – 815 kgs.
Fluencia 0,01” (0,25 mm)	13.43	8 – 14
% vacíos de aire	4.2	3 – 5 %
% V.M.A.	14.16	Min. 13
% V. LL. C. A.	73.61	Min 65- Max 75
Relación estabilidad/ Flujo kg/cm	3525.567	1700 – 4000

Fuente: *Elaboración propia*

Figura 28. Gráficos de ensayos Marshall



Fuente: Elaboración propia

3.4.3. Cálculo del contenido óptimo de asfalto convencional

Se determina el contenido de asfalto óptimo de la mezcla teniendo en cuenta el peso unitario, la estabilidad y el volumen de vacíos en la mezcla. A partir de estos cálculos, se determina el porcentaje de asfalto óptimo (P_b óptimo) que se necesita para lograr la mezcla adecuada, y que incluye:



Máxima estabilidad (Pb1).

Máxima densidad (Pb2).

Contenido de asfalto para un 3% de huecos (Pb3).

El contenido óptimo de asfalto se calcula como la medida aritmética de los tres valores obtenidos, es decir:

$$Pb \text{ optimo} = \frac{Pb1 + Pb2 + Pb3}{3}$$

Finalmente, es necesario verificar que el contenido óptimo de asfalto obtenido, posea una tolerancia de $\pm 0,3$ puntos porcentuales, cumpla con todos los requisitos de calidad exigidos para la mezcla.

Optimo por estabilidad	:	6.07 (%)
Optimo por Peso Unitario	:	6.12(%)
Óptimo para 4 % de vacíos	:	6.09 (%)
Optimo a usar	:	6.10 \pm 0.3 (%)

3.5. DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA POR EL METODO MARSHALL MODIFICADO CON POLÍESTIRENO EXPANDIDO (EPS)

Para el desarrollo de la presente investigación se trabajó con cemento asfáltico de penetración 120-150 de la refinería de Conchan de la empresa Petro Perú. Se realizó diversos ensayos de laboratorio a fin de determinar las propiedades mecánicas (Estabilidad y fujos) de la Mezcla asfáltica modificada; para ello se adiciono el polímero en diferentes porcentajes, para así determinar el contenido óptimo de poliestireno EPS que se utilizara en nuestro diseño.

3.5.1. *Obtención del porcentaje óptimo de EPS*

3.5.1.1. **Proceso de adición de EPS**

Al presentar deficiencias en cuanto a equipamiento para la elaboración de asfaltos modificados, se trabajó con la ayuda de una batidora, recipientes de porcelana una cocina, para poder llevar el asfalto a una temperatura de 170 °C, previo control de temperatura con la ayuda de un termómetro, para así poder tener un buen mezclado del polímero con el cemento asfáltico.

Siendo el proceso de prueba de la mezcla inicial como a continuación se describe:

- Se precalentó 500 gr de cemento asfáltico Pen 120- 150 a 170 °C en tres recipientes por separado, para proceder a la mezcla del bitumen con polímero EPS.

Figura 29. *PEN 120-150 distribuidos en tres recipientes de 500gr c/u.*



- Añadimos 7.5, 15 y 22.5 gr (1.5%, 3.0% y 4.5% respectivamente) de polímero EPS sustituyendo en porcentaje equivalente al cemento asfáltico a una temperatura 170°C.

Figura 30. *Incorporación del POLIMERO EPS al cemento asfáltico, a una temperatura de 170°C*



- Se controló la temperatura de mezcla entre 170 ± 5 °C.
- Una vez añadido el polímero EPS en la proporción establecida se procedió al mezclado de todos los componentes con la dosificación de agregados preestablecida.
- En el proceso de mezclado se logró una disolución de aproximadamente 80% del polímero EPS en total debido a que no se cuenta con el mezclador adecuado (mezclador y agitador).

Figura 31. *Cemento asfáltico modificado con Poliestireno expandido al 15%*



3.6. DISEÑO PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS MÉTODO MARSHALL (ASFALTO MODIFICADO)

3.6.1. *Parámetros Marshall*

3.6.1.1. Cálculo del peso unitario de la muestra compactada

El peso unitario de la mezcla asfáltica compactada es igual a:

$$G_{mb} = \frac{W''_d}{W''_{ssd} - W''_{sumergido}}$$

Dónde:

G_{mb} = Peso unitario de la mezcla asfáltica compactada

W_d = Peso al aire del espécimen seco

W_{ssd} = Peso al aire del espécimen saturado superficialmente seco

W_{sumer} = Peso del espécimen saturado superficialmente seco sumergido

Para calcular nuestro contenido óptimo de asfalto modificado se obtuvieron los siguientes pesos unitarios de las probetas:

Tabla 44. Cálculo del peso unitario de la muestra compactada

% DE ASFALTO	PESO UNITARIO DE LA MUESTRA COMPACTADA		
	(gr/cm3) (Asfalto Modificado)		
6.10+1.5 EPS %	2.235	2.220	2.221
6.10+3.0 EPS %	2.232	2252	2234
6.10+4.5 EPS%	2.255	2241	2247

Fuente: *Elaboración propia*

3.6.1.2. Peso específico bulk de la combinación de agregados.

Cuando la muestra se ensaya en fracciones separadas (por ejemplo, grueso y fino), el valor del peso específico promedio se calcula con la siguiente ecuación:

$$G = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}}$$

Dónde:

G = Peso específico promedio del agregado

G1, G2,....., G3 = Valores de pesos específico por fracción 1, 2,...., n

P1, P2,....., P3 = Porcentaje en pesos de la fracción 1, 2,...., n

Para calcular nuestro contenido óptimo de asfalto modificado se obtuvieron los siguientes pesos específicos de la combinación de agregados:

Tabla 45. *Peso específico bulk de la combinación de agregados*

% DE ASFALTO	PESO ESPECIFICO PROMEDIO DEL AGREGADO (gr/cm3)		
	(Asfalto Convencional)		
6.10+1.5 EPS %	2.423	2.423	2.423
6.10+3.0 EPS %	2.423	2.423	2.423
6.10+4.5 EPS%	2.423	2.423	2.423

Fuente: *Elaboración propia*

3.6.1.3. Gravedad específica efectiva de los agregados

La Gravedad específica efectiva de los agregados se calcula con la siguiente fórmula:

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

Dónde:

Gse = Gravedad específica efectiva de los agregados

Pb = Contenido de asfalto, porcentaje del peso total de la mezcla

Gmm = Peso específico máximo de la mezcla (ASTM D2041)

Gb = Peso específico del cemento asfáltico

Para calcular nuestro contenido óptimo de asfalto convencional se obtuvieron los siguientes pesos efectivos de los agregados:

Tabla 46. *Peso efectivo de los agregados modificado.*

% DE ASFALTO	PESO EFECTIVO DE LOS AGREGADOS (gr/cm ³)		
	(Asfalto Modificado)		
6.10+1.5 EPS %	2.591	2.591	2.591
6.10+3.0 EPS %	2.551	2.551	2.551
6.10+4.5 EPS%	2.542	2.542	2.542

Fuente: *Elaboración propia*

3.6.1.4. Porcentaje de asfalto absorbido

El porcentaje de asfalto absorbido del agregado mineral usualmente se expresa por peso del agregado más que por peso de la mezcla total. La ecuación para calcular el asfalto absorbido puede obtenerse a partir de:

$$P_{ba} = \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{sb} G_{se}} \times G_b \times 100$$

Dónde:



- Pba** = Porcentaje de asfalto absorbido
Gse = Peso efectivo de los agregados
Gsb = Peso específico promedio del agregado
Gb = Peso específico del cemento asfáltico

Para calcular nuestro contenido óptimo de asfalto convencional se obtuvieron los siguientes % de asfalto absorbido:

Tabla 47. *Porcentaje de asfalto absorbido modificado.*

% DE ASFALTO	PORCENTAJE DE ASFALTO ABSORBIDO (%)		
	(Asfalto Modificado)		
6.10+1.5 EPS %	2.706	2.706	2.706
6.10+3.0 EPS %	2.097	2.097	2.097
6.10+4.5 EPS%	1.955	1.955	1.955

Fuente: *Elaboración propia*

3.6.1.5. Contenido de asfalto efectivo

El contenido de asfalto efectivo se calcula con la siguiente fórmula:

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

Dónde:

- Pbe** = Contenido de asfalto efectivo, porcentaje del peso total de la mezcla
Pba = Asfalto absorbido, porcentaje por peso del agregado
Ps = Contenido de agregado, porcentaje por peso total de la mezcla
Pb = Contenido de asfalto, porcentaje del peso total de la mezcla

Para calcular nuestro contenido óptimo de asfalto convencional se obtuvieron los siguientes contenidos de asfalto efectivo:

Tabla 48. *Contenido de asfalto efectivo modificado.*

% DE ASFALTO	CONTENIDO DE ASFALTO EFECTIVO (%)		
	(Asfalto Modificado)		
6.10+1.5 EPS %	3.56	3.56	3.56
6.10+3.0 EPS %	4.13	4.13	4.13
6.10+4.5 EPS%	4.26	4.26	4.26

Fuente: *Elaboración propia*

3.6.1.6. Porcentaje VMA en mezcla compactada

El porcentaje de vacíos en el agregado mineral se obtiene de la fórmula:

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

Dónde:

VMA = Volumen de vacíos en el agregado mineral

Gsb = Peso específico promedio del agregado

Pb = Contenido de asfalto, porcentaje del peso total de la mezcla

Gmb = Peso unitario de la mezcla asfáltica compactada

Para calcular nuestro contenido óptimo de asfalto convencional se obtuvieron los siguientes % de vacíos en el agregado mineral:

Tabla 49. *Porcentaje VMA en mezcla compactada modificado.*

% DE ASFALTO	VACIOS EN EL AGREGADO MINERAL (%)		
	(Asfalto Modificado)		
6.10+1.5 EPS %	13.76	13.76	13.76
6.10+3.0 EPS %	13.22	13.22	13.22
6.10+4.5 EPS%	12.89	12.89	12.89

Fuente: *Elaboración propia*

3.6.1.7. Porcentaje de vacíos de aire en la mezcla compactada

La fórmula para calcular el porcentaje de vacíos de aire puede obtenerse a partir de:



$$V_a = \left(1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}}\right) \times 100$$

Dónde:

Va = Porcentaje de vacíos de aire en la mezcla compactada

Gmb = Peso unitario de la mezcla asfáltica compactada

Gmm = Peso específico máximo de la mezcla (ASTM D2041)

Para calcular nuestro contenido óptimo de asfalto convencional se obtuvieron los siguientes % de vacíos de aire en la mezcla compactada:

Tabla 50. *Porcentaje de vacíos de aire en la mezcla compactada modificado.*

% DE ASFALTO	VACIOS DE AIRE EN LA MEZCLA COMPACTADA (%)		
	(Asfalto Modificado)		
6.10+1.5 EPS %	5.94	5.94	5.94
6.10+3.0 EPS %	4.09	4.09	4.09
6.10+4.5 EPS%	3.43	3.43	3.43

Fuente: Elaboración propia

3.6.1.8. Vacíos llenos con asfalto

VLLCA o VFA es simplemente el porcentaje de VMA llenado con cemento asfáltico.

Que se calcula con la siguiente fórmula:

$$VLLCA = \frac{VMA - VTM}{VMA} \times 100$$

Dónde:

VLLCA = Vacíos llenos con asfalto

VMA = Volumen de vacíos en el agregado mineral

Va o VTM = Porcentaje de vacíos de aire en la mezcla compactada

Para calcular nuestro contenido óptimo de asfalto convencional se obtuvieron los siguientes % de vacíos llenos con asfalto:



Tabla 51. Vacíos llenos con asfalto modificado

% DE ASFALTO	VACIOS LLENOS CON ASFALTO (%)		
	(Asfalto Modificado)		
6.10+1.5 EPS %	56.80	56.80	56.80
6.10+3.0 EPS %	69.05	69.05	69.05
6.10+4.5 EPS%	73.39	73.39	73.39

Fuente: *Elaboración propia*

3.6.2. Gráficos Marshall (resultado final)

RESULTADO DEL DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE

1. MEZCLA DE AGREGADOS (PROPORCION EN PESO)

Agregado grueso chancado	:	37.5%
Gravilla chancada	:	36%
Agregado fino zarandeado	:	24.5%
Cemento Portland	:	2%

		100%

2. CEMENTO ASFALTICO

Tipo de asfalto	:	C. A. 120/150
% Optimo de C. A.	:	6.10%
Polímero EPS	:	3.4%

3. CARACTERISTICAS FISICO MECANICAS

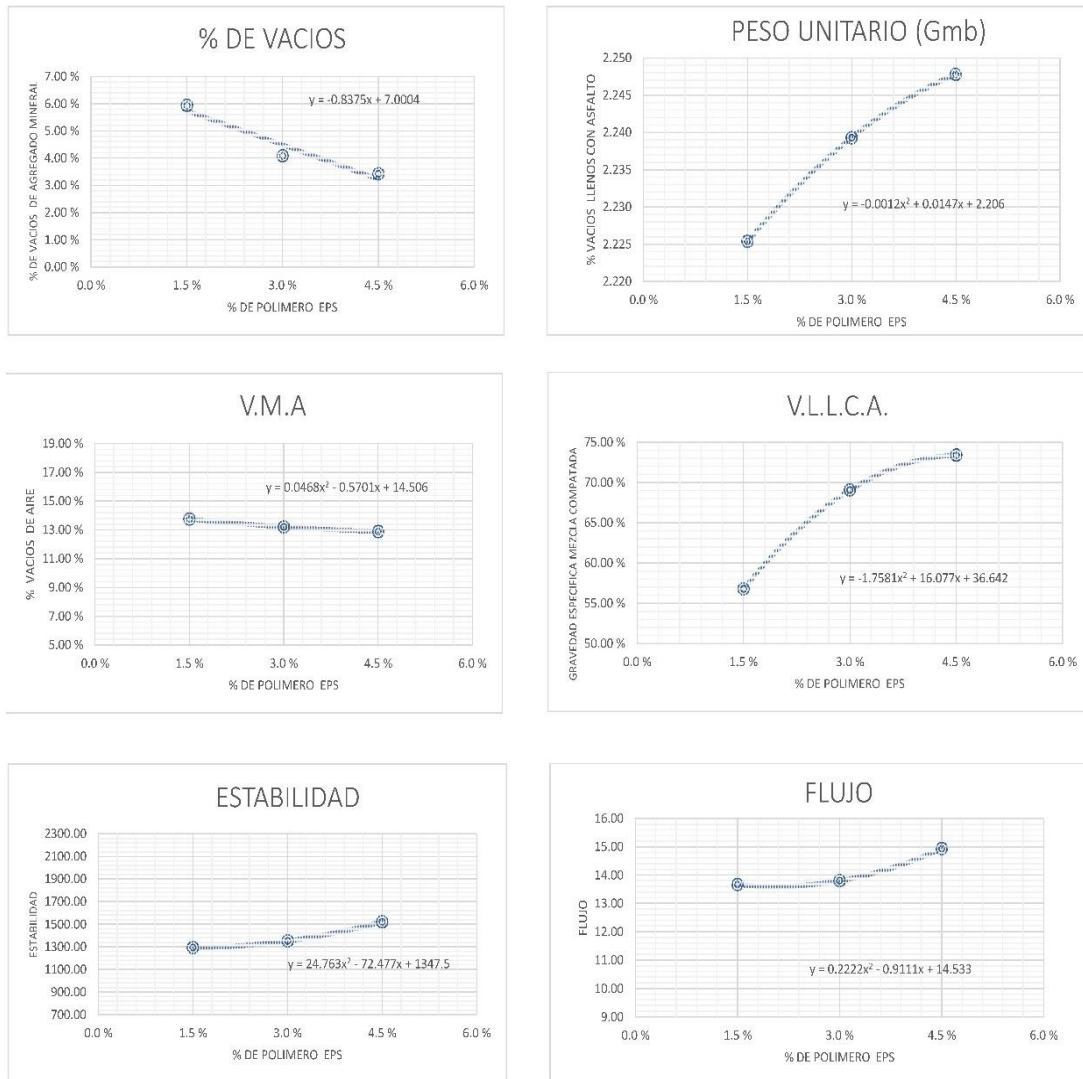
Tabla 52. Características físico mecánicas del asfalto modificado.

CARACTERISTICAS	DISEÑO	ESPECIFICACIONES
% cemento asfaltico + % Polímero EPS	6.10 + 3.4 %	
N° de golpes en cada lado	75	
Estabilidad (kg)	1387.3	Min – 815 kgs.
Fluencia 0,01” (0,25 mm)	13.98	8-14

% vacíos de aire	4.15	3– 5 %
% V.M.A.	13.15	Min. 13
% V. LL. C. A.	70.96	Min 65 – Max 75
Relación estabilidad Flujo kg/cm	3969.74	1700 - 4000

Fuente: *Elaboración propia*

Figura 32. Gráficos de ensayo Marshall asfalto modificado



Fuente: *Elaboración propia*

3.6.3. Cálculo del contenido óptimo de poliestireno Expandido (EPS)

Para determinar el contenido óptimo de polímero EPS en la mezcla, se deben tener en cuenta la estabilidad, el flujo y el volumen de vacíos en la mezcla. A partir de estos



cálculos, se determina el porcentaje óptimo (P_b óptimo) que se necesita para lograr la mezcla adecuada, el cual se determina mediante:

Máxima estabilidad (P_{b1}).

Contenido de asfalto para un 4% de vacíos (P_{b2}).

El contenido óptimo de asfalto se calcula como la medida aritmética de los tres valores obtenidos, es decir:

$$P_b \text{ optimo} = \frac{P_{b1} + P_{b2}}{32}$$

Finalmente, es necesario verificar que el contenido óptimo de asfalto obtenido, con una tolerancia de $\pm 0,3$ puntos porcentuales, cumpla con todos los requisitos de calidad exigidos para la mezcla.

Óptimo por estabilidad : 3.4 (%)

Óptimo para 4 % de vacíos : 3.4 (%)

Óptimo a usar : 3.4 (%)

3.7. ENSAYOS PARA CARACTERIZACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS Y DURABILIDAD DE LA MEZCLA ASFÁLTICA (CONVENCIONAL Y MODIFICADA)

3.7.1. Resistencia a compresión simple de mezclas asfálticas (MTC E 513 - 2013)

Objetivos:

- Procedimiento que debe seguirse para determinar la resistencia a la compresión simple de mezclas bituminosas compactadas en caliente.



- El procedimiento consiste en la fabricación de probetas cilíndricas de altura igual a su diámetro, las cuales se ensayan posteriormente según los procedimientos indicados en esta norma.

Aparatos:

- Moldes. Para la compactación de las probetas se dispondrá de moldes y pistones cilíndricos de acero de diámetro de 4".
- Soportes. Los soportes para mantener eventualmente los moldes por encima de la base de sustentación del pistón inferior, estarán formados por dos varillas de acero de sección cuadrada de 25.4 mm (1") y 76.2 mm (3") de largo.
- Máquina para ensayo. La máquina para ensayar las probetas puede ser cualquier tipo de prensa que cumpla las condiciones de capacidad de carga y velocidad, exigidas por esta norma. La velocidad de deformación ésta especificada en 1.3 mm/min (0.05"/min) por cada 25 mm (1") de altura de la probeta.
- Estufa. Para el calentamiento previo de los agregados, material asfáltico y conjunto de compactación se dispondrá de una estufa capaz de alcanzar la temperatura de mezcla especificada para el ligante bituminoso empleado, desde la temperatura ambiente hasta 163 °C (325 °F) dentro de una variación de ± 3 °C (5. °F).
- Espátulas
- Baño de Aire. Un baño de aire con control automático para mantener las probetas a 25 ± 0.5 °C (77 ± 1.0 °F) hasta el momento del ensayo.
- Balanza, de 2.000 g de capacidad y 0.1 g de sensibilidad.



Preparación de las probetas:

- Dimensiones de las probetas. Generalmente, las probetas para este ensayo serán cilíndricas, de 101.6 mm (4.0") de diámetro y 101.6 ± 2.5 mm (4.0 ± 0.1 ") de altura.
- Preparación de los agregados. Las fracciones de agregado grueso, fino y llenante necesarias para la mezcla, combinándolas posteriormente para la obtención de la granulometría proyectada.
- Preparación de las mezclas. Todas las probetas se prepararán individualmente, limitando las cantidades en cada fachada a las requeridas para una probeta. Las temperaturas de mezcla y compactación serán las adecuadas para que su viscosidad en el proceso de mezcla sea de 170 ± 20 cSt (85 ± 10 s SF) y en el de compactación de 280 ± 30 cSt (140 ± 15 s SF).
- Peso específico de las probetas. La determinación del peso específico de las probetas,
- se puede realizar una vez transcurrido el período de 18 horas.

Procedimiento:

- Antes de ensayarlas, las probetas se introducirán en un baño de aire regulado a $25 \pm 1^\circ\text{C}$ ($77 \pm 1.8^\circ\text{F}$) durante un tiempo mínimo de 4 horas.
- A continuación, se coloca la probeta en el centro de la placa de carga de la máquina de ensayo y se somete a compresión axial sin soporte lateral.
- Cálculos:

- Se determinará la resistencia a compresión simple de cada probeta, dividiendo la carga máxima obtenida en el ensayo por el área de su sección transversal (81.1 cm^2 para las probetas de 101.6 mm {4"} de diámetro).
- En cada ensayo se empleará mínimo tres probetas y el valor medio de las tres resistencias obtenidas se tomará como resultado del ensayo a la compresión simple.

Informe:

- Los resultados del ensayo deberán incluir los siguientes datos de las probetas:
- Altura y diámetro nominales, en cm (pulg).
- Pesos específicos aparentes.
- Resistencia a compresión simple, en Pa y Kgf/cm^2 (lb/pulg^2).
- Referencias normativas: ASTM D 1074, AASTHO T 167

Figura 33. *Espécimen listo para ser ensayado a carga uniaxial*



Figura 34. *Realización del ensayo de resistencia a compresión simple de mezclas asfálticas*



3.7.2. Caracterización de las mezclas bituminosas abiertas por medio del ensayo Cántabro de pérdida por desgaste (MTC E 515 - 2013)

Objetivos:

- Describe el proceso utilizado para calcular el valor de la pérdida por desgaste en las mezclas de asfalto, utilizando la máquina de Los Ángeles.
- Este ensayo se realiza en mezclas asfálticas en caliente, así como en mezclas porosas o de granulometría abierta, siempre que el tamaño máximo del agregado sea menor a 25 mm.
- El propósito de este ensayo es evaluar de forma directa la cohesión, la adhesión y la resistencia a la disgregación de la mezcla frente a los efectos abrasivos y de succión causados por el tráfico.

Aparatos y materiales:

- Equipo de compactación. Formado por el molde, collar, placa de base y masa de compactación, que emplea el ensayo de Marshall.



- Máquina de los Ángeles. La máquina de prueba de desgaste de Los Ángeles cumplirá con las especificaciones descritas en la norma MTC E 207.
- Termómetros. El termómetro se utilizará para medir la temperatura de los agregados, ligantes y mezclas asfálticas. Tiene un rango de temperatura máxima de 200°C y una sensibilidad de 3 a 2°C
- Balanzas. Una balanza de 2 kg de capacidad y 0.1 g de sensibilidad.
- Material general. Se emplearán varios materiales comunes, tales como lápices, bandejas, espátulas, guantes de alta temperatura, así como discos de papel de filtro, entre otros.

Procedimiento:

- Preparación de las probetas. Se elaboran un mínimo de tres probetas para cada porcentaje de cemento asfáltico. Se secan al horno los componentes de la mezcla asfáltica a peso constante a una temperatura de 105 a 110 °C.
- Las temperaturas del cemento asfáltico de la mezcla y compactación de los especímenes, serán las adecuadas. Se puede tomar como base el método de diseño Marshall
- Preparación de mezclas. Los agregados requeridos para hacer una muestra se pesan de tal manera que la suma total de los mismos sea de 1000g.
- Compactación de las mezclas. Se utilizará el equipo y el procedimiento de compactación apropiados para aplicar una energía de compactación equivalente a 50 golpes por cada lado.
- Densidad y análisis de vacíos. Luego de extraer las muestras del molde, se calculará su densidad y contenido de vacíos a través de la medición



geométrica de su volumen y la densidad relativa de los materiales, siguiendo las instrucciones establecidas en la norma MTC E 505.

- Ejecución del ensayo. La temperatura durante el ensayo se mantendrá dentro del rango de 15 a 32 °C, y se aceptará una tolerancia máxima de ± 1 °C.
- Cada probeta se pesa con una precisión de 0.1 g y se registra este valor, denominado "P1". Antes de realizar el ensayo, las probetas se mantienen a la temperatura de ensayo durante al menos seis horas.
- Luego, se introduce una muestra en el tambor de la máquina de Los Ángeles sin incluir la carga abrasiva de bolas, y se hace girar el tambor a la velocidad estándar establecida en las normas MTC E 207 (30 a 33 rpm), durante un total de 300 revoluciones.
- Una vez concluido el ensayo, se extrae la muestra del tambor y se pesa nuevamente con la misma precisión de 0.1 g, anotando este valor como "P2". Este proceso se repite de manera idéntica con todas las muestras análogas.

Resultados:

- Se realiza el cálculo de la pérdida por desgaste para cada probeta ensayada utilizando la siguiente expresión:

$$P = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \times 100$$

Dónde:

P = Valor de la pérdida por desgaste, en %

P1 = Peso inicial de la probeta antes del ensayo (g)

P2 = Peso final de la probeta después del ensayo (g)

El resultado de la pérdida por desgaste se obtiene como un porcentaje del peso inicial de la probeta, lo que refleja la cantidad de material desgastado durante el ensayo de Cántabro por pérdida por desgaste.

Figura 35. *Peso de las muestras antes de ser sometidas al ensayo de cántabro de pérdida por desgaste*



Figura 36. *Resultado de la primera probeta luego de ser sometida a desgaste mediante la máquina de los ángeles*



3.7.3. *Ensayo de tracción indirecta NLT-346/90 "Resistencia a compresión diametral (ensayo brasileño) de mezclas bituminosas".*

Introducción:

El ensayo de tracción indirecta es un método sencillo y representativo para evaluar la reacción del pavimento flexible y calcular la carga máxima que la mezcla puede soportar antes de sufrir una falla.

El ensayo es frecuentemente utilizado para evaluar la resistencia a tracción de mezclas bituminosas. Es un procedimiento simple que sigue las pautas establecidas en la norma NLT-346/90 "Resistencia a compresión diametral (ensayo brasileño) de mezclas bituminosas".

Descripción del ensayo:

En este ensayo, se procede a aplicar una carga uniforme en dos líneas opuestas a una probeta cilíndrica, que tiene el mismo tamaño que la utilizada en el ensayo Marshall. La carga se aplica a lo largo de un plano vertical diametral de la probeta, tal como se muestra en la imagen. Para realizar esta prueba, se requiere un dispositivo de sujeción que asegure el cumplimiento de dicho plano de carga y permita someter la probeta a compresión hasta que se produzca la rotura. La norma estipula que durante el ensayo, el sistema se desplazará con una velocidad uniforme de 50,8 mm/min, la misma que se utiliza en el ensayo Marshall. Aunque la temperatura sugerida es de 25 ± 1 °C, es permisible el uso de diferentes temperaturas, con el fin de evaluar la susceptibilidad térmica de la mezcla asfáltica en prueba.

Una de las principales ventajas de este método es su metodología sencilla, lo cual es altamente valorado para caracterizar rápidamente, de forma fiable y económica, las



propiedades de los pavimentos. El Departamento de Carreteras del Estado de Texas resaltó los siguientes beneficios del ensayo:

- Su simplicidad y similitud con el ensayo Marshall.
- Utilización del mismo tipo de muestra y equipo que otros ensayos.
- Las condiciones de la superficie no afectan la fractura de la muestra.
- La fractura ocurre en una zona de tensiones de tracción relativamente uniforme.

Este ensayo se puede emplear tanto en el diseño del proyecto como en el control de calidad de las mezclas bituminosas durante su fabricación o puesta en obra.

Cálculos:

Cálculo del esfuerzo a la tracción indirecta:

$$T = (2*Q/(H*D*n))$$

Donde:

T = Esfuerzo de tensión (Kg/cm²)

Q = Carga máxima

H = Espesor del espécimen inmediatamente antes de la prueba, en mm

D = Diámetro del espécimen, en mm

El ensayo de tracción indirecta está regido por la norma NLT-346/90 "Resistencia a compresión diametral (ensayo brasileño) de mezclas bituminosas". Esta norma describe el proceso para calcular la resistencia a la tracción indirecta de mezclas bituminosas, tanto las producidas en laboratorio como las obtenidas de testigos del pavimento. A través de este ensayo, se obtiene un parámetro que caracteriza la mezcla bituminosa y permite optimizar

aspectos como el contenido de cemento asfáltico, su resistencia al esfuerzo cortante y la cohesión de la mezcla.

Figura 37. *Espécimen listo para ser sometido al ensayo de tracción indirecta*



Figura 38. *Espécimen luego de ser sometido al ensayo de tracción indirecta*



3.8. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS ESPECIALES

Los resultados de los ensayos especiales se desarrollan el capítulo VII ANEXOS se resumen a continuación para asfaltos convencionales y modificados.

Tabla 53. *Resumen resultados de ensayos para caracterización de propiedades mecánicas y durabilidad de la mezcla asfáltica (convencional y modificada)*

RESULTADOS FINALES	
RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE DE MEZCLAS ASFÁLTICAS	
Diseño de mezcla asfáltica convencional	59.31 Kg/cm ²
Diseño de mezcla asfáltica modificada	64.92 Kg/cm ²
CANTABRO DE PERDIDA POR DESGASTE	
Diseño de mezcla asfáltica convencional	5.41 %
Diseño de mezcla asfáltica modificada	3.97 %
TRACCION INDIRECTA	
Diseño de mezcla asfáltica convencional (Grupo Seco)	11.28 kg/cm ²
Diseño de mezcla asfáltica modificada (Grupo Seco)	16.21 kg/cm ²
Diseño de mezcla asfáltica convencional (Grupo Saturado)	10.18 kg/cm ²
Diseño de mezcla asfáltica modificada (Grupo Saturado)	13.57 kg/cm ²

Fuente: *Elaboración propia*

3.9. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

3.10. DISTRIBUCIÓN ESTADÍSTICA "T"¹

En nuestro estudio, emplearemos la Prueba Estadística de la "T de Student" o distribución "t". Esta prueba se utiliza en muestras pequeñas con un tamaño de 30 observaciones o menos y posee las siguientes características:

- a) La distribución "t" es más amplia y menos puntiaguda en el centro en comparación con la distribución normal estándar.
- b) Existe una familia de distribuciones "t", cada una con diferentes desviaciones estándar
- c) Los valores críticos de dos colas para un nivel de significación dado en la distribución "t" son mayores en magnitud que los valores críticos correspondientes en la distribución "Z".
- d) Para realizar este ensayo se requiere contar con un grupo de control y un grupo experimental para el análisis de los datos.

Siguiendo las recomendaciones bibliográficas, emplearemos el Poliestireno Expandido como grupo de control, dado que es una variable comúnmente utilizada y aplicada. Nuestro procedimiento de evaluación se basará en esta metodología en la investigación.

Tabla 54. *Distribución estadística "t"*

VARIABLES	Grupo de Control	Grupo Experimental
ESTABILIDAD	CONVENCIONAL $n_1 = 15$	MODIFICADO $n_2 = 9$
FLUENCIA	CONVENCIONAL $n_1 = 15$	MODIFICADO $n_2 = 9$
RESISTENCIA COMPRESION SIMPLE	A CONVENCIONAL $n_1 = 3$	MODIFICADO $n_2 = 3$
CANTABRO PERDIDA DESGASTE	DE POR CONVENCIONAL $n_1 = 3$	MODIFICADO $n_2 = 3$
TRACCION INDIRECTA	CONVENCIONAL $n_1 = 6$	MODIFICADO $n_2 = 6$

Fuente: *Elaboración propia*

3.11. PRUEBAS DE HIPÓTESIS ESTADÍSTICAS

PLANTEAMIENTO DE LAS HIPÓTESIS.



Considerando la hipótesis general, se presenta la siguiente formulación de las hipótesis.

3.11.1. Primera hipótesis

HIPÓTESIS ESPECIFICA 1: *Influye en las propiedades de estabilidad y flujo de la mezcla asfáltica en caliente modificada con partículas de poliestireno expandido en comparación de la mezcla asfáltica convencional.*

Hipótesis para la variable estabilidad

Ho: No Influye en la propiedad de estabilidad de la mezcla asfáltica en caliente modificada con partículas de poliestireno expandido en comparación de la mezcla asfáltica convencional

Ha= Influye en la propiedad de estabilidad de la mezcla asfáltica en caliente modificada con partículas de poliestireno expandido en comparación de la mezcla asfáltica convencional

Donde: Ho: Hipótesis Nula

Ha: Hipótesis Alterna

Hipótesis para la variable Flujo

Ho: No Influye en la propiedad de flujo de la mezcla asfáltica en caliente modificada con partículas de poliestireno expandido en comparación de la mezcla asfáltica convencional

Ha= Influye en la propiedad de flujo de la mezcla asfáltica en caliente modificada con partículas de poliestireno expandido en comparación de la mezcla asfáltica convencional

Donde: H0: Hipótesis Nula

Ha: Hipótesis Alterna

B) NIVEL DE SIGNIFICANCIA



En la presente investigación se asume el nivel de significancia de 0.05 de margen de Error (0.05 que es igual al 5 %)

C) DETERMINACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN

Se utilizó la prueba estadística t de Student debido a que se aplica cuando el tamaño de la muestra es menor a 30 observaciones.

D) CÁLCULO ESTADÍSTICO DE LA PRUEBA

Para este propósito, se consideraron los siguientes datos: Luego, se aplicó la fórmula de la prueba de la t de Student:

$$Tt = \frac{(\bar{X1} - \bar{X2})}{\sqrt{\frac{S1^2}{n1} + \frac{S2^2}{n2}}}$$

E) ESQUEMA DE LA PRUEBA

En el campo de la estadística, los grados de libertad representan una medida que estima la cantidad de categorías o elementos independientes que pueden variar en un experimento o prueba estadística particular.

$$gl = \frac{\left[\frac{S1^2}{n1} + \frac{S2^2}{n2}\right]^2}{\frac{\left(\frac{S1^2}{n1}\right)^2}{n1 + 1} + \frac{\left(\frac{S2^2}{n2}\right)^2}{n2 + 1}} - 2$$

F) TOMA DE DECISION

El último paso en la prueba de hipótesis consiste en tomar una decisión acerca de si se debe aceptar o rechazar la hipótesis nula. Según la prueba de distribución t, se sigue la siguiente regla:



- Si el valor calculado de la prueba estadística Tt es mayor que el valor crítico Tc , entonces se acepta la hipótesis nula H_0 y se rechaza la hipótesis alternativa H_a .
- En el caso de que no se cumpla la regla anterior, se rechaza la hipótesis nula H_0 y se acepta la hipótesis alternativa H_a .

3.11.1.1. Procesamiento de los datos de investigación variable estabilidad

Marshall:

Tabla 55. Análisis variable Estabilidad Marshall

VARIABLE	CONVENCIONAL	MODIFICADO
ESTABILIDAD	1000.53	1303.33
	1020.53	1296.97
	1010.53	1283.07
	1103.83	1396.21
	1087.17	1289.43
	1066.06	1373.02
	1172.22	1538.68
	1147.1	1565.15
	1137.12	1464.42
	1163.72	
	1137.12	
	1110.8	
	1030.51	
	1078.69	
	1063.84	
SUMA	16329.77	12510.28

Fuente: *Elaboración propia*

- Hipótesis estadística:** $H_0: \mu_1 = \mu_2$ vs $H_a: \mu_1 \neq \mu_2$
- Nivel de significancia $\alpha = 0.05$
- Prueba estadística:**

$$Tt = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2)}{\sqrt{\frac{S1^2}{n1} + \frac{S2^2}{n2}}} = \frac{(1088.65133 - 1390.03111)}{\sqrt{\frac{3183.66343}{15} + \frac{12045.3871}{9}}} = -7.6535$$

$$gl = \frac{\left[\frac{S1^2}{n1} + \frac{S2^2}{n2} \right]^2}{\frac{\left(\frac{S1^2}{n1} \right)^2}{n1+1} + \frac{\left(\frac{S2^2}{n2} \right)^2}{n2+1}} - 2 = \frac{\left[\frac{3183.66343}{15} + \frac{12045.3871}{9} \right]^2}{\frac{\left(\frac{3183.66343}{15} \right)^2}{15+1} + \frac{\left(\frac{12045.3871}{9} \right)^2}{9+1}} - 2 = 11.21543496$$

Tabla 56. Análisis estadístico variable de Estabilidad Marshall

Media	$\bar{X}_1 = 1088.65133$	$\bar{X}_2 = 1390.03111$
Varianza	$S_1^2 = 3183.66343$	$S_2^2 = 12045.3871$
Observaciones	$n_1 = 15$	$n_2 = 9$
Grados de libertad	$gl = 11$	
Estadístico t	$Tt = -7.65352205$	
P(T<=t) dos colas	0.000009262	
Valor crítico de t (dos colas)	$Tc = 2.20098516$	

Fuente: Elaboración propia

iv. Decisión

Como valor puntual: $Tt_{(-7.653522)} > Tc_{(2.20098)}$. Se rechaza la hipótesis nula H_0 .

Como valor probabilístico, p está entre $0.000009262 < \alpha (0.05)$; No se acepta la hipótesis nula H_0 , para lo cual se acepta la hipótesis alterna H_a , entonces Influye en la propiedad de estabilidad de la mezcla asfáltica en caliente modificada con partículas de poliestireno expandido en comparación de la mezcla asfáltica convencional

3.11.1.2. Procesamiento de los datos de investigación variable flujo:

Tabla 57. Análisis variable Flujo Marshall.

VARIABLES	CONVENCIONAL	MODIFICADO
FLUJO	9,8	14
	8,4	14
	9,8	13
	11,4	14,4
	12,2	13
	10,4	14
	12,4	14,6
	14,4	15,2

12,4	15
15	
14	
15,4	
16,2	
14,4	
17	

Fuente: *Elaboración propia*

i. **Hipótesis estadística:** $H_0: \mu_1 = \mu_2$ vs $H_a: \mu_1 \neq \mu_2$

ii. Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

iii. **Prueba estadística:**

$$t = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2)}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}} = \frac{(12.88 - 14.133)}{\sqrt{\frac{6.644}{15} + \frac{0.6}{9}}} = -1.75564$$

$$gl = \frac{\left[\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}\right]^2}{\frac{\left(\frac{S_1^2}{n_1}\right)^2}{n_1 + 1} + \frac{\left(\frac{S_2^2}{n_2}\right)^2}{n_2 + 1}} - 2 = \frac{\left[\frac{6.644}{15} + \frac{0.6}{9}\right]^2}{\frac{\left(\frac{6.644}{15}\right)^2}{15 + 1} + \frac{\left(\frac{0.6}{9}\right)^2}{9 + 1}} - 2 = 18.43803799$$

Tabla 58. *Análisis estadístico variable de Flujo Marshall*

	CONVENCIONAL	MODIFICADO
Media	$\bar{X}_1 = 12.88$	$\bar{X}_2 = 14.1333333$
Varianza	$S_1^2 = 6.64457143$	$S_2^2 = 0.6$
Observaciones	$n_1 = 15$	$n_2 = 9$
Grados de libertad	18	
Estadístico t	$Tt = -1.75564073$	
P($T \leq t$) dos colas	0.09615239	
Valor crítico de t (dos colas)	$Tc = 2.10092204$	

Fuente: *Elaboración propia*

iv. **Decisión**

Como valor puntual: $Tt_{(-1.75564073)} > Tc_{(2.10092)}$. No se rechaza la hipótesis nula

H_0 .



Como valor probabilístico, p está entre $0.09615239 > \alpha (0.05)$; Se acepta la hipótesis nula H_0 , no Influye en la propiedad de flujo de la mezcla asfáltica en caliente modificada con partículas de poliestireno expandido en comparación de la mezcla asfáltica convencional.

3.11.2. Interpretación para la primera hipótesis

Influye en las propiedades de estabilidad y flujo de la mezcla asfáltica en caliente modificada con partículas de poliestireno expandido en comparación de la mezcla asfáltica convencional.

3.11.3. Segunda hipótesis

HIPÓTESIS ESPECÍFICA 2: *Mejora las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica con poliestireno expandido a comparación de las que presentan las mezclas asfálticas convencionales.*

Hipótesis para la variable de compresión simple

H_0 = No mejora la propiedad mecánica de resistencia a la carga de la mezcla asfáltica con poliestireno expandido a comparación de las que presentan las mezclas asfálticas convencionales

H_a = Mejora la propiedad mecánica de resistencia a la carga de la mezcla asfáltica con poliestireno expandido a comparación de las que presentan las mezclas asfálticas convencionales

Donde: H_0 : Hipótesis Nula

H_a : Hipótesis Alterna

Hipótesis para la variable de Cántabro de pérdida por desgaste



H_0 = No mejora la propiedad mecánica de durabilidad de la mezcla asfáltica con poliestireno expandido a comparación de las que presentan las mezclas asfálticas convencionales

H_a = Mejora la propiedad mecánica de durabilidad de la mezcla asfáltica con poliestireno expandido a comparación de las que presentan las mezclas asfálticas convencionales

Donde: H_0 : Hipótesis Nula

H_a : Hipótesis Alterna

Hipótesis para la variable de Tracción indirecta

H_0 = No mejora la propiedad mecánica de cohesión de la mezcla asfáltica con poliestireno expandido a comparación de las que presentan las mezclas asfálticas convencionales

H_a = Mejora la propiedad mecánica de cohesión de la mezcla asfáltica con poliestireno expandido a comparación de las que presentan las mezclas asfálticas convencionales

Donde: H_0 : Hipótesis Nula

H_a : Hipótesis Alterna

B) NIVEL DE SIGNIFICANCIA

En la presente investigación se asume el nivel de significancia de 0.05 de margen de Error (0.05 que es igual al 5 %)

C) DETERMINACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN

Se empleó la prueba estadística de la t de Student, ya que se utiliza cuando el tamaño de la muestra es menor a 30 datos.

D) CÁLCULO ESTADÍSTICO DE LA PRUEBA

Para este propósito, se consideraron los siguientes datos: Luego, se aplicó la fórmula de la prueba de la t de Student:

$$Tt = \frac{(\bar{X1} - \bar{X2})}{\sqrt{\frac{S1^2}{n1} + \frac{S2^2}{n2}}}$$

E) ESQUEMA DE LA PRUEBA

En el campo de la estadística, los grados de libertad representan una medida que estima la cantidad de categorías o elementos independientes que pueden variar en un experimento o prueba estadística particular.

$$gl = \frac{\left[\frac{S1^2}{n1} + \frac{S2^2}{n2}\right]^2}{\frac{\left(\frac{S1^2}{n1}\right)^2}{n1 + 1} + \frac{\left(\frac{S2^2}{n2}\right)^2}{n2 + 1}} - 2$$

F) TOMA DE DECISION

El último paso en la prueba de hipótesis consiste en tomar una decisión acerca de si se debe aceptar o rechazar la hipótesis nula. Según la prueba de distribución t, se sigue la siguiente regla:

- Si el valor calculado de la prueba estadística Tt es mayor que el valor crítico Tc, entonces se acepta la hipótesis nula Ho y se rechaza la hipótesis alternativa Ha.
- En el caso de que no se cumpla la regla anterior, se rechaza la hipótesis nula Ho y se acepta la hipótesis alternativa Ha.

3.11.3.1. Procesamiento de los datos de investigación variable Compresión

simple:

Tabla 59. *Análisis variable Compresión simple*

VARIABLES		CONVENCIONAL	MODIFICADA
COMPRESION SIMPLE	1	59.72	62.82
	2	57.75	65.04
	3	60.46	66.89

Fuente: *Elaboración propia*

v. **Hipótesis estadística:** $H_0: \mu_1 = \mu_2$ vs $H_a: \mu_1 \neq \mu_2$

vi. Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

vii. **Prueba estadística:**

$$Tt = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2)}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}} = \frac{(59.31 - 64.91666667)}{\sqrt{\frac{1.9621}{3} + \frac{4.152633333}{3}}} = -3.9271$$

$$gl = \frac{\left[\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}\right]^2}{\frac{\left(\frac{S_1^2}{n_1}\right)^2}{n_1 + 1} + \frac{\left(\frac{S_2^2}{n_2}\right)^2}{n_2 + 1}} - 2 = \frac{\left[\frac{1.9621}{3} + \frac{4.152633333}{3}\right]^2}{\frac{\left(\frac{1.9621}{3}\right)^2}{3 + 1} + \frac{\left(\frac{4.152633333}{3}\right)^2}{3 + 1}} - 2 = 4.36$$

Tabla 60. *Análisis estadístico variable compresión simple*

	CONVENCIONAL	MODIFICADO
Media	59.31	64.91666667
Varianza	1.9621	4.152633333
Observaciones	3	3
Varianza agrupada	3.057366667	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	4	
Estadístico t	-3.927141983	
P(T<=t) una cola	0.008572105	
Valor crítico de t (una cola)	2.131846786	
P(T<=t) dos colas	0.01714421	

Valor crítico de t (dos colas)

2.776445105

Fuente: *Elaboración propia*

viii. Decisión

Como valor puntual: $Tt_{(-3.927141983)} > Tc_{(2.776445105)}$. Se rechaza la hipótesis nula H_0 .

Como valor probabilístico, p está entre $0.01714421 < \alpha (0.05)$; No se acepta la hipótesis nula H_0 , lo cual se acepta la hipótesis alterna H_a , entonces mejora la propiedad mecánica de resistencia a la carga de la mezcla asfáltica con poliestireno expandido a comparación de las que presentan las mezclas asfálticas convencionales.

3.11.3.2. Procesamiento de los datos de investigación variable cántabro de pérdida por desgaste:

Tabla 61. *Análisis variable cántabro de pérdida por desgaste*

VARIABLES		CONVENCIONAL	MODIFICADA
COMPRESION	1	93.73	96.83
	2	95.23	96.30
SIMPLE	3	94.79	94.97

Fuente: *Elaboración propia*

i. **Hipótesis estadística:** $H_0: \mu_1 = \mu_2$ vs $H_a: \mu_1 \neq \mu_2$

ii. Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

iii. **Prueba estadística:**

$$Tt = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2)}{\sqrt{\frac{S1^2}{n1} + \frac{S2^2}{n2}}} = \frac{(94.5861218 - 96.0314536)}{\sqrt{\frac{0.59348245}{3} + \frac{0.91903553}{3}}} = -2.77644511$$

$$gl = \frac{\left[\frac{S1^2}{n1} + \frac{S2^2}{n2}\right]^2}{\frac{(S1^2)^2}{n1+1} + \frac{(S2^2)^2}{n2+1}} - 2 = \frac{\left[\frac{0.59348245}{3} + \frac{0.91903553}{3}\right]^2}{\frac{(0.59348245)^2}{3+1} + \frac{(0.91903553)^2}{3+1}} - 2 = 2.03553183$$

Tabla 62. *Análisis estadístico variable cántabro de perdida por desgaste*

	DESGASTE C	DESGASTE M
Media	94.5861218	96.0314536
Varianza	0.59348245	0.91903553
Observaciones	3	3
Varianza agrupada	0.75625899	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	4	
Estadístico t	-2.77644511	
P(T<=t) una cola	0.05575435	
Valor crítico de t (una cola)	2.13184679	
P(T<=t) dos colas	0.11150871	
Valor crítico de t (dos colas)	2.03553183	

Fuente: *Elaboración propia*

iv. Decisión

Como valor puntual: $Tt_{(-2.77644511)} > Tc_{(2.03553183)}$. Se rechaza la hipótesis nula H_0 .

Como valor probabilístico, p está entre $0.11150871 > \alpha (0.05)$; No se acepta la hipótesis nula H_0 , lo cual se acepta la hipótesis alterna H_a , entonces mejora la propiedad mecánica de durabilidad de la mezcla asfáltica con poliestireno expandido a comparación de las que presentan las mezclas asfálticas convencionales

3.11.3.3. Procesamiento de los datos de investigación variable tracción indirecta:

Tabla 63. *Análisis variable tracción indirecta*

VARIABLES		CONVENCIONAL	MODIFICADA
COMPRESION SIMPLE	1	10.15915791	13.13288777
	2	10.13043908	13.96851578
	3	10.25821925	13.61333494
	4	11.28763548	17.42833059
	5	10.65476298	15.85495172
	6	11.88685702	15.33458599

Fuente: *Elaboración propia*

i. **Hipótesis estadística:** $H_0: \mu_1 = \mu_2$ vs $H_a: \mu_1 \neq \mu_2$

ii. Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

iii. **Prueba estadística:**

$$Tt = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2)}{\sqrt{\frac{S1^2}{n1} + \frac{S2^2}{n2}}} = \frac{(10.729512 - 14.8887678)}{\sqrt{\frac{0.51256915}{6} + \frac{2.62767037}{6}}} = -5.7492$$

$$gl = \frac{\left[\frac{S1^2}{n1} + \frac{S2^2}{n2}\right]^2}{\left(\frac{S1^2}{n1}\right)^2 + \left(\frac{S2^2}{n2}\right)^2} - 2 = \frac{\left[\frac{0.51256915}{6} + \frac{2.62767037}{6}\right]^2}{\left(\frac{0.51256915}{6}\right)^2 + \left(\frac{2.62767037}{6}\right)^2} - 2 = 9.63$$

Tabla 64. Análisis estadístico variable tracción indirecta

	TRACCIÓN C	TRACCIÓN M
Media	10.729512	14.8887678
Varianza	0.51256915	2.62767037
Observaciones	6	6
Varianza agrupada	1.57011976	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	10	
Estadístico t	-5.74923252	
P(T<=t) una cola	9.2681E-05	
Valor crítico de t (una cola)	1.81246112	
P(T<=t) dos colas	0.00018536	
Valor crítico de t (dos colas)	2.22813885	

Fuente: *Elaboración propia*

iv. **Decisión**

Como valor puntual: $Tt_{(-5.739540)} > Tc_{(2.22813)}$. Se rechaza la hipótesis nula H_0 .

Como valor probabilístico, p está entre $-5.74923252 > \alpha (0.05)$; No se acepta la hipótesis nula H_0 , lo cual se acepta la hipótesis alterna H_a , entonces mejora la propiedad



mecánica de cohesión de la mezcla asfáltica con poliestireno expandido a comparación de las que presentan las mezclas asfálticas convencionales.

3.11.4. Interpretación para la segunda hipótesis

Mejora las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica con poliestireno expandido a comparación de las que presentan las mezclas asfálticas convencionales.

3.12. CORRELACIÓN

COEFICIENTE DE CORRELACION DE PEARSON

La correlación viene del latín cum: con y relatus: relacionado. la correlación lineal permite medir si hay asociación entre dos variables o medir la intensidad de dicha asociación. Para ello es importante que la muestra bivariado sea tomada al azar. tanto para la variable X como para la variable Y.

El coeficiente de correlación de Pearson. se ajusta al tipo de Información cuantitativa. esto con la finalidad de detectar y medir la asociación entre variables o de razón. Los valores del coeficiente de correlación oscilan entre +1 y -1. y se explica de la siguiente manera:

a) El valor de $r = +1$. indica una correlación positiva perfecta o correlación directa. cuando al aumentar o disminuir el valor de la variable independiente. aumenta o disminuye también el valor de la variable dependiente (pendiente positiva).

b) El valor de $r = -1$. expresa una correlación inversa o relación negativa perfecta: cuando al aumentar ó disminuir el valor de la variable independiente. disminuye ó aumenta el valor de la variable dependiente (pendiente negativa).

c) El valor de $r = 0$. indica la ausencia absoluta de correlación. es decir, las dos variables no están correlacionadas o relacionadas.

El coeficiente de correlación está definido por.

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i - n \bar{X}\bar{Y}}{\sqrt{[\sum_{i=1}^n X_i^2 - n\bar{X}^2] [\sum_{i=1}^n Y_i^2 - n\bar{Y}^2]}}$$

Los rangos que. del coeficiente de correlación. se pueden interpretarse haciendo uso de las siguientes expresiones:

$r = 0.2$ a $r = 0.3$ coeficiente de correlación muy bajo.

$r = 0.4$ a $r = 0.5$ coeficiente de correlación bajo.

$r = 0.6$ a $r = 0.7$ coeficiente de correlación alto.

$r = 0.8$ a $r = 1.0$ coeficiente de correlación muy alto.

Tabla 65. *Correlación de Pearson*

Tabla de Correlación					
Por su importancia. ¿cuál es el coeficiente mínimo de correlación?					
	95%	99%		95%	99%
n	de confianza	de confianza	n	de confianza	de confianza
3	1.00	1.00	15	0.51	0.64
4	0.95	0.99	16	0.5	0.61
5	0.88	0.96	17	0.48	0.61
6	0.81	0.92	18	0.47	0.59
7	0.75	0.87	19	0.46	0.58
8	0.71	0.83	20	0.44	0.56
9	0.67	0.8	22	0.42	0.54
10	0.63	0.76	24	0.4	0.52
11	0.60	0.73	26	0.39	0.5
12	0.58	0.71	28	0.37	0.48
13	0.53	0.68	30	0.36	0.46
14	0.53	0.66			

Para un 95% de confianza, con una muestra de 15, el coeficiente (r) debe ser al menos .51

Fuente: *Análisis y diseño de experimentos-Vladimiro Ibáñez Quispe*

Prueba de hipótesis para la correlación.

1. Hipótesis Estadística:

$$H_0 : \rho = \rho_0$$

$$H_\alpha : \rho \neq \rho_0$$

(Ausencia de correlación entre las variables)

(Existencia de correlación entre las variables en forma directa).

2. Elegir el nivel de significación: α . ($\alpha=0.01$. $\alpha= 0.05$. $\alpha= 0.10$).

3. Estadígrafo de Contraste.

$$t = \frac{r - \rho}{S_r} = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}$$

Donde:

$$S_r = \frac{\sqrt{1-r^2}}{\sqrt{n-2}}$$

4. Establecer la Región de decisión. determinando la región crítica de la prueba.

$$\frac{RA}{H_0} : -t_{\frac{\alpha}{2},(n-2)} \leq t_c \leq t_{\frac{\alpha}{2},(n-2)}$$

$$\frac{RR}{H_0} : t_c < -t_{\frac{\alpha}{2},(n-2)} \text{ O } t_c > t_{\frac{\alpha}{2},(n-2)}$$

5. Si te pertenece a RA/H₀. aceptamos H₀: Y rechazamos la H_a:

Si te pertenece a RR H₀:. rechazamos H₀ : y aceptamos H_a:

Conclusión. Realizar la interpretación en base al paso 4) y concluir de acuerdo al tenor del problema.

COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN: R^2 o r^2

El coeficiente de determinación. R^2 . es el valor cuadrado del coeficiente r de Pearson. y representa la proporción de la varianza explicada por una variable respecto a la varianza

total. también se conoce con el nombre de determinación porque se considera como la medida del grado de influencia de una variable frente a la otra variable. El coeficiente de determinación mide la proporción de la variación que se explica por la variable independiente en el modelo de regresión. y está definido por:

$$R^2 = r^2 = \frac{\text{varianza explicada}}{\text{varianza total}} \times 100 = \frac{SSR_m}{SST_m} \times 100$$

El valor complementario del coeficiente de determinación. $1-R^2$ recibe el nombre de coeficiente de no determinación o coeficiente de alineación. que indica la varianza de una variable no explicada por otra.

PRUEBA DE HIPÓTESIS PARA EL COEFICIENTE DE CORRELACIÓN PEARSON

VARIABLE ESTABILIDAD MARSHALL:

El coeficiente de correlación queda definido por:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i - n \bar{X}\bar{Y}}{\sqrt{[\sum_{i=1}^n X_i^2 - n\bar{X}^2] [\sum_{i=1}^n Y_i^2 - n\bar{Y}^2]}}$$

Se ha encontrado una correlación positiva baja es decir que existe una directa asociación entre variables sobre la mezcla asfáltica convencional y la mezcla asfáltica modificada con Poliestireno expandido.

Calculamos el coeficiente de determinación R^2

$$R^2 = 0.9468$$

Se puede interpretar que el modelo tiene aceptable ajuste. El 94.68% de la variación de la mezcla asfáltica modificada con poliestireno expandido esta explicado por la mezcla asfáltica convencional Y 5.32 esta explicado por otros factores ajenos al modelo.

Probar la hipótesis para $\rho \neq 0$

1. Hipótesis Estadística:

$$H_0: \rho = \rho_\alpha$$

$$H_a: \rho \neq \rho_\alpha$$

H_0 = No Influye en las propiedades de estabilidad y flujo de la mezcla asfáltica en caliente modificada con partículas de poliestireno expandido, como no existe relación lineal en la estabilidad de la mezcla asfáltica en caliente.

H_a = Influye en las propiedades de estabilidad y flujo de la mezcla asfáltica en caliente modificada con partículas de poliestireno expandido, como existe relación lineal directa en la estabilidad de la mezcla asfáltica en caliente.

Donde: H_0 : Hipótesis Nula

H_a : Hipótesis Alternativa

2. Elegir el nivel de significación: $\alpha = 0.05$

3. Estadígrafo de Contraste:

$$t = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}$$

4. Establecer la Región de rechazo y aceptación

$$\frac{RA}{H_0}: -2.1603 \leq t_c \leq 2.1603$$

$$\frac{RR}{H_0}: t_c < -2.1603 \text{ ó } t_c > 2.1603$$

5. Cálculo del valor experimental.

$$t = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} = 2.515$$

6. Decisión:

Como $t_c = 2.515 > t_{0.05,13} = 2.1603$, cae en la región de rechazo, entonces se acepta la

H_a : y se rechaza la H_0

7. Conclusión:

Existe suficiente evidencia para afirmar que $\rho \neq 0$ es decir que la correlación es diferente de cero. Esto corrobora a los resultados de la correlación encontrada.

VARIABLE FLUJO MARSHALL:

El coeficiente de correlación queda definido por:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i - n \bar{X}\bar{Y}}{\sqrt{[\sum_{i=1}^n X_i^2 - n\bar{X}^2] [\sum_{i=1}^n Y_i^2 - n\bar{Y}^2]}}$$

Se ha encontrado una correlación positiva alta es decir que existe una directa asociación entre variables sobre la mezcla asfáltica convencional y la mezcla asfáltica modificada con poliestireno expandido.

Calculamos el coeficiente de determinación R^2

$$R^2 = 0.5897$$

Se puede interpretar que el modelo tiene aceptable ajuste. El 58.97% de la variación de la mezcla asfáltica modificada con poliestireno expandido esta explicado por la mezcla asfáltica convencional Y 41.03 esta explicado por otros factores ajenos al modelo.

Probar la hipótesis para $\rho \neq 0$

1. Hipótesis Estadística:

$$H_0: \rho = \rho_0$$

$$H_a: \rho \neq \rho_0$$



H_0 = No Influye en las propiedades de estabilidad y flujo de la mezcla asfáltica en caliente modificada con partículas de poliestireno expandido, como no existe relación lineal en el flujo de la mezcla asfáltica en caliente.

H_a = Influye en las propiedades de estabilidad y flujo de la mezcla asfáltica en caliente modificada con partículas de poliestireno expandido, como existe relación lineal directa en el flujo de la mezcla asfáltica en caliente.

Donde: H_0 : Hipótesis Nula

H_a : Hipótesis Alternativa

2. Elegir el nivel de significación: $\alpha = 0.05$

3. Estadístico de Contraste:

$$t = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}$$

4. Establecer la Región de rechazo y aceptación

$$\frac{RA}{H_0}: -2.2704 \leq t_c \leq 2.2704$$

$$\frac{RR}{H_0}: t_c < -2.2704 \text{ ó } t_c > 2.2704$$

5. Cálculo del valor experimental.

$$t = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} = 6.04$$

6. Decisión:

Como $t_c = 6.04 > t_{0.05,13} = 2.2704$, cae en la región de rechazo. entonces se acepta la H_a :

y se rechaza la H_0

7. Conclusión:

Existe suficiente evidencia para afirmar que $\rho \neq 0$ es decir que la correlación es diferente de cero. Esto corrobora a los resultados de la correlación encontrada.

VARIABLE COMPRESION SIMPLE:

El coeficiente de correlación queda definido por:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i - n \bar{X}\bar{Y}}{\sqrt{[\sum_{i=1}^n X_i^2 - n\bar{X}^2] [\sum_{i=1}^n Y_i^2 - n\bar{Y}^2]}}$$

Se ha encontrado una correlación positiva alta es decir que existe una directa asociación entre variables sobre la mezcla asfáltica convencional y la mezcla asfáltica modificada con poliestireno expandido.

Calculamos el coeficiente de determinación R^2

$$R^2 = 0.79760782$$

Se puede interpretar que el modelo tiene aceptable ajuste. El 79.76% de la variación de la mezcla asfáltica modificada con polímero poliestireno expandido esta explicado por la mezcla asfáltica convencional Y 20.24% esta explicado por otros factores ajenos al modelo.

Probar la hipótesis para $\rho \neq 0$

1. Hipótesis Estadística:

$$H_0: \rho = \rho_0$$

$$H_a: \rho \neq \rho_0$$

H_0 = No Mejora las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica con poliestireno expandido, así como, no existe relación lineal en la resistencia a la carga de la mezcla asfáltica en caliente.



H_a = Mejora las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica con poliestireno expandido, así como, existe relación lineal en la resistencia a la carga de la mezcla asfáltica en caliente.

Donde: H_0 : Hipótesis Nula

H_a : Hipótesis Alternativa

2. Elegir el nivel de significación: $\alpha = 0.05$

3. Estadístico de Contraste:

$$t = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}$$

4. Establecer la Región de rechazo y aceptación

$$\frac{RA}{H_0}: -2.1776 \leq t_c \leq +2.1776$$

$$\frac{RR}{H_0}: t_c < -2.1776 \text{ ó } t_c > 2.1776$$

5. Cálculo del valor experimental.

$$t = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} = 3.97$$

6. Decisión:

Como $t_c = 3.97 > t_{0.05,13} = 2.1776$. cae en la región de rechazo. entonces se acepta la H_a :
y se rechaza la H_0 .

7. Conclusión:

Existe suficiente evidencia para afirmar que $\rho \neq 0$ es decir que la correlación es diferente de cero. Esto corrobora a los resultados de la correlación encontrada.

VARIABLE CANTABRO DE PERDIDA POR DESGASTE:

El coeficiente de correlación queda definido por:



$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i - n \bar{X} \bar{Y}}{\sqrt{[\sum_{i=1}^n X_i^2 - n \bar{X}^2] [\sum_{i=1}^n Y_i^2 - n \bar{Y}^2]}}$$

Se ha encontrado una correlación positiva alta es decir que existe una directa asociación entre variables sobre la mezcla asfáltica convencional y la mezcla asfáltica modificada con poliestireno expandido.

Calculamos el coeficiente de determinación R^2

$$R^2 = 0.89308892$$

Se puede interpretar que el modelo tiene aceptable ajuste. El 89.30% de la variación de la mezcla asfáltica modificada con poliestireno expandido esta explicado por la mezcla asfáltica convencional Y 10.7% esta explicado por otros factores ajenos al modelo.

Probar la hipótesis para $\rho \neq 0$

1. Hipótesis Estadística:

$$H_0: \rho = \rho_0$$

$$H_a: \rho \neq \rho_0$$

H_0 = No Mejora las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica con poliestireno expandido, así como no existe relación lineal en la durabilidad de la mezcla asfáltica en caliente.

H_a = Mejora las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica con poliestireno expandido, así como existe relación lineal en la durabilidad de la mezcla asfáltica en caliente.

Donde: H_0 : Hipótesis Nula

H_a : Hipótesis Alternativa

2. Elegir el nivel de significación: $\alpha = 0.05$

3. Estadígrafo de Contraste:

$$t = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}$$

4. Establecer la Región de rechazo y aceptación

$$\frac{RA}{H_0}: -3.1865 \leq t_c \leq +3.1865$$

$$\frac{RR}{H_0}: t_c < -3.1865 \text{ ó } t_c > 3.1865$$

5. Cálculo del valor experimental.

$$t = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} = 4.85$$

6. Decisión:

Como $t_c = 4.85 > t_{0.05,13} = 3.1865$. cae en la región de rechazo. entonces se acepta la H_a :
y se rechaza la H_0 .

7. Conclusión:

Existe suficiente evidencia para afirmar que $\rho \neq 0$ es decir que la correlación es diferente de cero. Esto corrobora a los resultados de la correlación encontrada.

VARIABLE TRACCION INDIRECTA:

El coeficiente de correlación queda definido por:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i - n \bar{X}\bar{Y}}{\sqrt{[\sum_{i=1}^n X_i^2 - n\bar{X}^2] [\sum_{i=1}^n Y_i^2 - n\bar{Y}^2]}}$$

Se ha encontrado una correlación positiva alta es decir que existe una directa asociación entre variables sobre la mezcla asfáltica convencional y la mezcla asfáltica modificada con poliestireno expandido.

Calculamos el coeficiente de determinación R^2



$$R^2 = 0.68450653$$

Se puede interpretar que el modelo tiene aceptable ajuste. El 68.45% de la variación de la mezcla asfáltica modificada con poliestireno expandido esta explicado por la mezcla asfáltica convencional Y 31.55% esta explicado por otros factores ajenos al modelo.

Probar la hipótesis para $\rho \neq 0$

1. Hipótesis Estadística:

$$H_0: \rho = \rho_0$$

$$H_a: \rho \neq \rho_0$$

H_0 = No Mejora las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica con poliestireno expandido, así como no existe relación lineal en la cohesión de la mezcla asfáltica en caliente.

H_a = Mejora las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica con poliestireno expandido, así como existe relación lineal directa muy alta en la cohesión de la mezcla asfáltica en caliente.

Donde: H_0 : Hipótesis Nula

H_a : Hipótesis Alterna

2. Elegir el nivel de significación: $\alpha = 0.05$

3. Estadígrafo de Contraste:

$$t = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}$$

4. Establecer la Región de rechazo y aceptación

$$\frac{RA}{H_0}: -4.2391 \leq t_c \leq +4.2391$$

$$\frac{RR}{H_0}: t_c < -4.2391 \text{ ó } t_c > 4.2391$$



5. Cálculo del valor experimental.

$$t = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} = 5.37$$

6. Decisión:

Como $t_c = 5.37 > t_{0.05,13} = 4.2391$, cae en la región de rechazo, entonces se acepta la H_a :

y se rechaza la H_0 .

7. Conclusión:|

Existe suficiente evidencia para afirmar que $\rho \neq 0$ es decir que la correlación es diferente de cero. Esto corrobora a los resultados de la correlación encontrada.



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. CONTRASTACIÓN DE HIPOTESIS

4.1.1. *Contrastación de hipótesis general*

HPG: La sustitución parcial del poliestireno expandido influye en las propiedades mecánicas y durabilidad de la mezcla asfáltica.

De los datos obtenidos de la prueba estadística T-Students se usaron un total de 15 muestras para las variables de estabilidad y flujo para la mezcla asfáltica convencional, así como para las mezclas asfálticas modificadas teniendo así un grupo de control experimental.

Teniendo como resultado en las pruebas estadísticas que la modificación de la mezcla asfáltica con poliestireno expandido influye significativamente en la estabilidad y flujo de la mezcla asfáltica en caliente; al realizarse la evaluación a cada variable se encontró una correlación muy alta tanto para estabilidad y flujo. Es decir que existe una directa correlación entre variables sobre la mezcla asfáltica convencional y la mezcla asfáltica modificada, con un nivel de seguridad del 95%.

Tabla 66. *Resultado finales Ensayo Marshall*

CARACTERISTICAS FISICO MECANICAS	CONVENCIONAL	MODIFICADO
%Cemento Asfáltico	6.10%	6.10% + 3.4%
Nº de Golpes en cada lado	75	75
Estabilidad (Kg)	1148.77	1387.30
Fluencia (mm)	13.43	13.98
% Vacíos de Aire	4.2	4.15
% V.M.A.	14.16	13.15
% V. LL.C.A.	73.61	70.96
Relación estabilidad Flujo kg/cm	3525.57	3969.74

Fuente: *Elaboración propia*

Tabla 67. Resultado finales Ensayos Especiales

RESULTADOS FINALES	
RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE DE MEZCLAS ASFÁLTICAS	
Diseño de mezcla asfáltica convencional	59.31 Kg/cm ²
Diseño de mezcla asfáltica modificada	64.92 Kg/cm ²
CANTABRO DE PERDIDA POR DESGASTE	
Diseño de mezcla asfáltica convencional	5.41 %
Diseño de mezcla asfáltica modificada	3.97 %
TRACCION INDIRECTA	
Diseño de mezcla asfáltica convencional (Grupo Seco)	11.28 kg/cm ²
Diseño de mezcla asfáltica modificada (Grupo Seco)	16.21 kg/cm ²
Diseño de mezcla asfáltica convencional (Grupo Saturado)	10.18 kg/cm ²
Diseño de mezcla asfáltica modificada (Grupo Saturado)	13.57 kg/cm ²

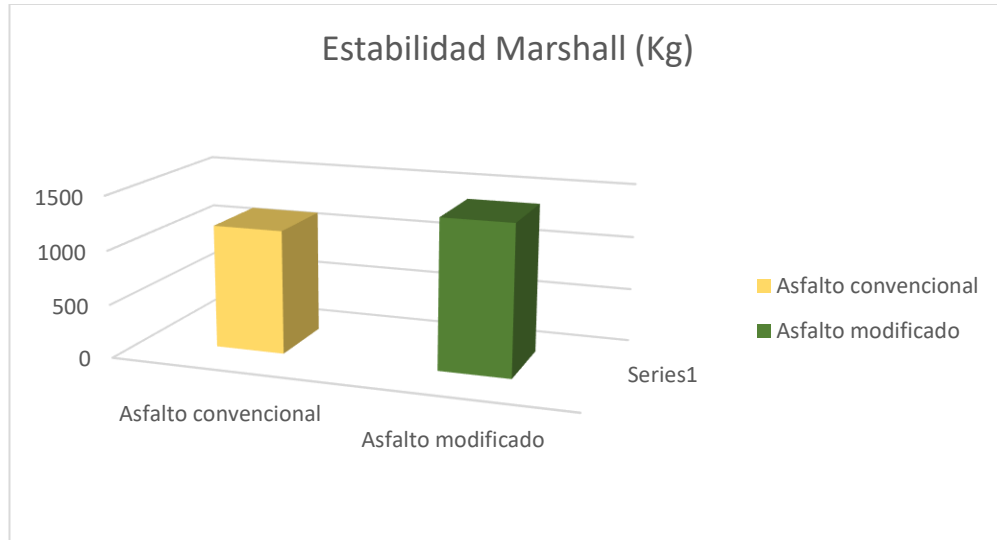
Fuente: *Elaboración propia*

a) Comparación del ensayo Marshall de las mezclas

En la *tabla N° 34* se resume las características físico mecánicas del Método Marshall de los asfaltos convencionales y en *tabla N° 43* se presentan el resumen de las características físico mecánicas de los asfaltos modificado con poliestireno expandido.

- La estabilidad de los asfaltos convencionales es de 1148.77 Kg mientras de los asfaltos modificados con polímero PS es de 1387.30 Kg, siendo superior en la estabilidad Marshall en 238.53 Kg, con una adición de 3.4% de Poliestireno Expandido, y se verifica que los cementos asfálticos modificados aportan mayor estabilidad a la deformación siendo los agregados los mismos para ambas mezclas.

Figura 39. Comparación de estabilidad Marshall Asfaltos convencional y modificado



Fuente: *Elaboración propia*

En la investigación de Arévalo y Lucho (2019), obtuvieron una estabilidad de 1538.4kg en la mezcla convencional y al incorporar 0.3% de poliestireno en relación a la mezcla la estabilidad aumenta en un 4.73% teniendo como valor 1610.8kg

Los resultados de la incorporación del 0.3% aportan mayor estabilidad de la mezcla mejorando así su comportamiento frente a deformaciones y desplazamientos por acción de cargas del tránsito. Arévalo y Lucho (2019).

Tabla 68 Comparación de resultados de estabilidad con Arévalo y Lucho ,2019

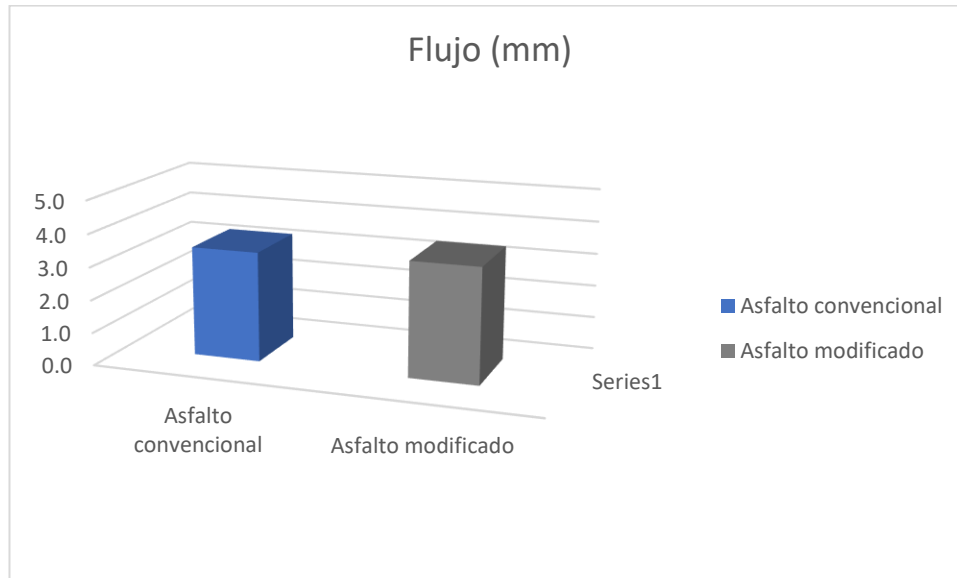
Resultados obtenidos en la presente		Resultados de Arévalo y Lucho ,2019	
% de EPS	Estabilidad (kg)	% de EPS	Estabilidad (kg)
3.4%	1387.3	0.3%	1610

Fuente: *Elaboración propia*

- El flujo de los asfaltos convencionales es de 3.35 mm mientras de los asfaltos modificados con polímero PS es de 3.495 mm, siendo superior en la fluencia en

0.145 mm, donde los cementos asfálticos modificados trabajan mejor en condiciones de alta y baja temperatura como es en la zona de estudio.

Figura 40. Comparación de Flujo Marshall, Asfaltos convencional y modificado



Fuente: *Elaboración propia*

- En la investigación de Arévalo y Lucho (2019) titulada, “Influencia de la incorporación de poliestireno en las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas en caliente, Lima-2019” obtuvieron un flujo de 4.4mm en la mezcla asfáltica patrón. 4.7mm en la Mezcla asfáltica con 0.2% de Poliestireno, 4.4mm en la Mezcla asfáltica con 0.3% de Poliestireno y 4.8mm en la Mezcla asfáltica con 0.5% de Poliestireno, siendo su diseño óptimo modificado con el 0.3% de poliestireno, no teniendo variación respecto a la mezcla asfáltica patrón, ya que se mantiene con 4.4mm de fluencia. Este resultado implica que no hay variación significativa en las propiedades elásticas de la mezcla.

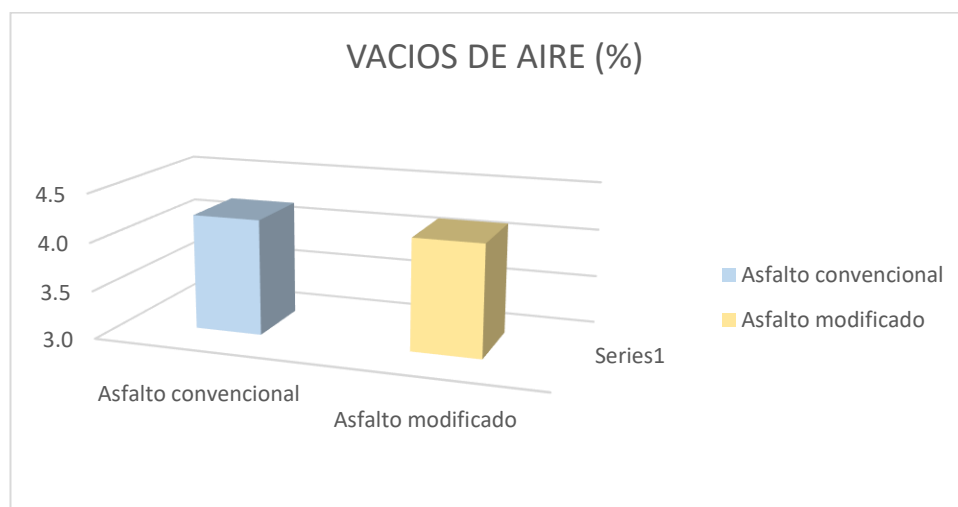
Tabla 69. Comparación de resultados de flujo con Arévalo y Lucho, 2019.

Resultados obtenidos en la presente investigación		Arévalo y Lucho, 2019.	
% de EPS	Flujo (mm)	% de EPS	Flujo (mm)
3.4%	3.495	0.3%	4.4

Fuente: Elaboración propia

- El porcentaje de vacíos de los asfaltos convencionales es de 4.20% mientras de los asfaltos modificados con polímeros EPS es de 4.15%, en este es inferior en 0.05% de contenido de vacíos, esto debido a que al añadir poliestireno expandido a temperatura mayor a los 150°C la misma tiende a comportarse de manera más fluida, y al momento de mezclar los componentes para la mezcla asfáltica se llega a una temperatura mayor, llenando así más vacíos a comparación de las mezclas convencionales, siendo perjudicial las mezclas que presentan mayor volumen de vacíos, ya que la humedad ingresa por estos poros para realizar la oxidación y el deterioro de la carpeta asfáltica.

Figura 41. Comparación de porcentaje de vacíos, Asfaltos convencional y modificado



Fuente: Elaboración propia

En la investigación de Arévalo y Lucho, 2019. existe una reducción del porcentaje de vacíos, las mezclas asfálticas convencional con un porcentaje del 4.1%, mientras que en las mezclas modificadas con el 0.3% de poliestireno se encuentra reduciendo en un 2.44% con un valor del 4.0% con respecto a la mezcla convencional. Los porcentajes de vacíos (VA) que se encontraron en el estudio, al no variar significativamente, son favorables para la zona sierra, ya que se encuentran dentro del rango deseado del 3% al 5%. Mantener los vacíos dentro de este intervalo es crucial para asegurar la impermeabilidad de la mezcla, lo que significa que esta será menos permeable al agua.

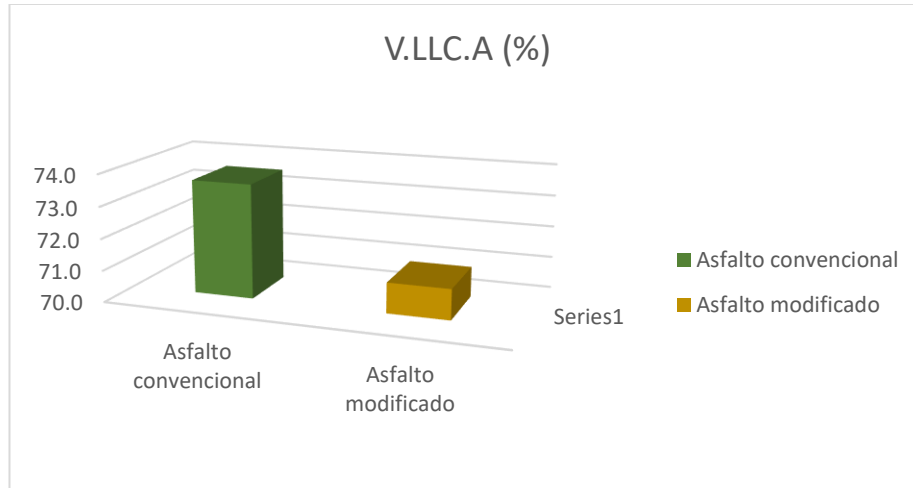
Tabla 70. *Comparación de resultados de flujo con Arévalo y Lucho, 2019.*

Resultados obtenidos en la presente investigación		Arévalo y Lucho, 2019.	
% de EPS	Vacíos (%)	% de EPS	Vacíos (%)
3.4%	4.15	0.3%	4.0

Fuente: *Elaboración propia*

- Los vacíos llenados de cemento asfáltico son de 73.61% de los asfaltos convencionales y de los asfaltos modificados con polímeros EPS es de 70.96%

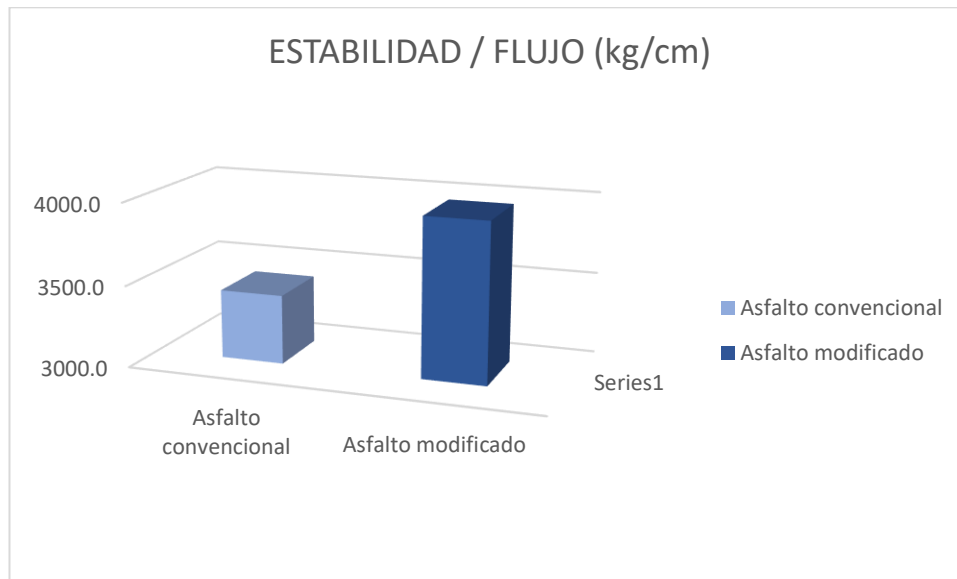
Figura 42. Comparación de los vacíos llenos de cemento asfáltico, asfaltos convencional y modificado



Fuente: Elaboración propia.

- La relación estabilidad flujo o rigidez de las mezclas modificadas con polímero EPS presentan un valor de 3969.74 Kg/cm que son superiores a las mezclas convencionales donde solo alcanzan 549.151 Kg/cm en promedio. Con este valor de 3420.589 Kg/cm las mezclas modificadas se comportan mejor en climas cálidos y fríos, ya que no son frágiles ante los cambios bruscos de temperatura y de clima.

Figura 43. Comparación estabilidad/flujo, asfaltos convencional y modificado



Fuente: Elaboración propia

En la investigación de Arévalo y Lucho, 2019. Tuvieron como resultados una rigidez de 3517.0kg/cm² con la mezcla convencional mientras que para la mezcla modificada con poliestireno obtuvieron; 3698.0kg/cm² aumentando en un 5.15% incorporando 0.3% de poliestireno en relación a la mezcla convencional.

Tabla 71. Comparación de resultados factor de rigidez con Arévalo y Lucho, 2019.

Resultados obtenidos en la presente investigación		Arévalo y Lucho, 2019.	
% de EPS	Factor de rigidez (kg/cm)	% de EPS	Factor de rigidez (kg/cm)
3.4%	3969.74	0.3%	3698.0

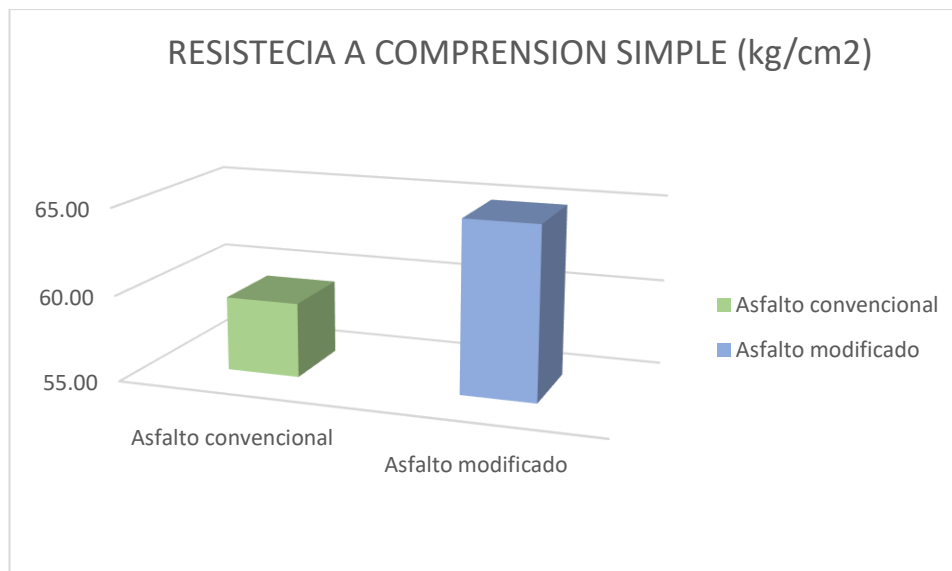
Fuente: Elaboración propia

b) Comparación de los ensayos especiales de las mezclas

Se ilustran gráficamente los resultados de los ensayos especiales entre los asfaltos convencionales y modificados con polímeros.

- El ensayo de resistencia de compresión simple de los asfaltos modificados se ha calculado un promedio de 55.425 Kg/cm² y para los convencionales el valor de 48.065 Kg/cm².

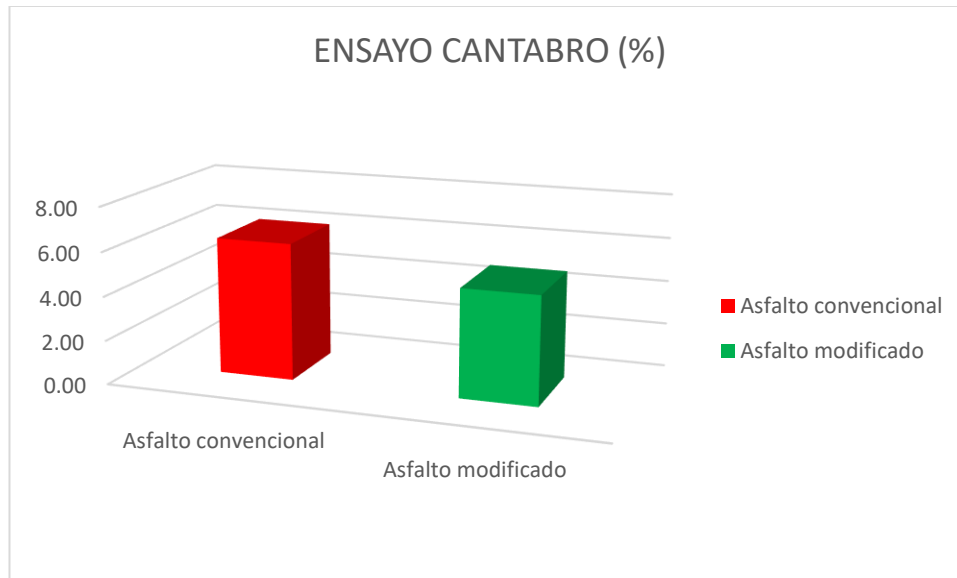
Figura 44. Comparación resistencia de compresión simple, asfaltos convencional y modificado



Fuente: *Elaboración propia*

- En el ensayo de cántabro las mezclas modificadas tienen menor desgaste que los convencionales, siendo de estos un promedio de 3.981% y en las convencionales tiene mayor desgaste que en promedio presentan 5.392% de desgaste. Esto significa que los asfaltos modificados presentan mejor adherencia a las partículas minerales que evitan su desprendimiento y el desgaste ante las cargas de tránsito.

Figura 45. Comparación ensayo de cántabro de pedida por desgaste, asfaltos convencional y modificado



Fuente: *Elaboración propia*

En la investigación de Modera, 2018. Tuvieron como resultados un desgaste a la abrasión cántabro para la mezcla convencional y las modificadas con adición de polipropileno en forma de poli sombra. Con un porcentaje óptimo de 0.5% respecto a la mezcla asfáltica patrón, obteniendo 5.78% de desgaste en la mezcla asfáltica patrón y 6.85% en la mezcla modificada, disminuyendo en 1% en relación a la mezcla asfáltica patrón.

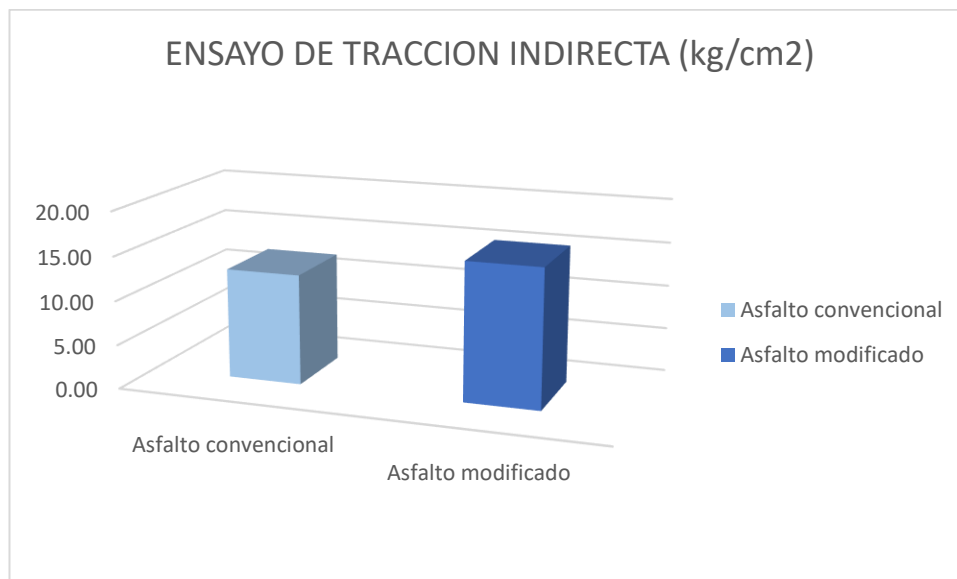
Tabla 72. Comparación de resultados ensayo de cántabro de pedida por desgaste con Modera, 2018.

Resultados obtenidos en la presente investigación		Modera, 2018.	
% de EPS	cántabro de pedida por desgaste (%)	% de Polipro pileno	cántabro de pedida por desgaste (%)
3.4%	3.981%	0.5%	5.78%

Fuente: *Elaboración propia*

- En el ensayo de tracción indirecta los asfaltos modificados tienen un valor promedio de 14.770 Kg/cm² y los asfaltos convencionales alcanzan a 10.612 kg/cm², esto nos indica que los primeros presentan mayor esfuerzo a la tracción evitando de esta manera los fisuramientos a temperaturas severos y al tránsito.

Figura 46. Comparación ensayo de tracción indirecta asfaltos convencional y modificado



Fuente: *Elaboración propia*

En la investigación de Modera, 2018. El ensayo de resistencia a tracción se realizó para mezclas asfálticas con contenido del 5% de cemento asfáltico con adición de 0.5% y 1.0% de polipropileno en forma de polisoma, se puede observar un aumento en la relación de la resistencia a la tracción. Dicho aumento, es considerado un indicativo de la adherencia, pudiendo aumentar la cohesión y consecuentemente la durabilidad de la mezcla asfáltica.

Tabla 73. *Comparación de resultados ensayo de tracción indirecta con Modera 2018.*

Resultados obtenidos en la presente investigación		Modera, 2018.	
% de EPS	tracción indirecta (kg/cm ²)	% de EPS	tracción indirecta (kg/cm ²)
3.4%	14.77	0.5%	11.86
3.4%	14.770	1.0%	16.39

Fuente: *Elaboración propia*

4.1.2. Contrastación de las hipótesis específicas

4.1.2.1. Contrastación de hipótesis específica I

HE1: Influye en las propiedades de estabilidad y flujo de la mezcla asfáltica en caliente modificada con partículas de poliestireno expandido en comparación de la mezcla asfáltica convencional.

De acuerdo a la prueba estadística T-Students para un total de 15 muestras para la mezcla asfáltica convencional y 9 muestras para la mezcla asfáltica modificada con poliestireno expandido, teniendo como premisa para la variable Estabilidad no se acepta la hipótesis nula H_0 , para lo cual se acepta la hipótesis alterna H_a , entonces Influye en la propiedad de estabilidad de la mezcla asfáltica en caliente modificada con partículas de poliestireno expandido en comparación de la mezcla asfáltica convencional, por ende mejorara la capacidad de resistir deformaciones a las cargas solicitadas de tráfico y para la variable Flujo se acepta la hipótesis nula H_0 , no Influye en la propiedad de flujo de la mezcla asfáltica en caliente modificada con partículas de poliestireno expandido en comparación de la mezcla asfáltica convencional, por tanto la propiedad de flujo no se ve afectada y esto hace



que mezcla modificada tenga la misma trabajabilidad con respecto a la mezcla asfáltica convencional.

En base a las pruebas estadísticas se llega a la conclusión que la modificación de la mezcla asfáltica con poliestireno Expandido (EPS 3.4%) si Influye en las propiedades de estabilidad y flujo de la mezcla asfáltica en caliente modificada con partículas de poliestireno expandido en comparación de la mezcla asfáltica convencional.

4.1.2.2. Contrastación de hipótesis específica II

HE2: Mejora las propiedades mecánicas de una mezcla a base de poliestireno expandido a comparación de las que presentan las mezclas asfálticas convencionales.

De acuerdo a la prueba estadística T-Students para un total de 6 muestras, para la variable compresión simple no se acepta la hipótesis nula H_0 , lo cual se acepta la hipótesis alterna H_a , entonces mejora la propiedad mecánica de resistencia a la carga de la mezcla asfáltica con poliestireno expandido. De acuerdo al ensayo de resistencia de compresión simple, los asfaltos modificados tienen una mejor resistencia en comparación a los asfaltos convencionales

Para la variable cántabro de pérdida por desgaste no se acepta la hipótesis nula H_0 , lo cual se acepta la hipótesis alterna H_a , entonces mejora la propiedad mecánica de durabilidad de la mezcla asfáltica con poliestireno expandido, obtenido como resultado un menor desgaste, a comparación de las que presentan las mezclas asfálticas convencionales. Esto significa que los asfaltos modificados presentan mejor resistencia y adherencia a las partículas minerales que evitan su desprendimiento y el desgaste ante las cargas de tránsito.

Para la variable tracción indirecta no se acepta la hipótesis nula H_0 , lo cual se acepta la hipótesis alterna H_a , entonces mejora la propiedad mecánica de cohesión de la mezcla



asfáltica con poliestireno expandido. En el ensayo de tracción indirecta los asfaltos modificados tienen una mejor resistencia a la tracción que los asfaltos convencionales, El valor obtenido es la resistencia máxima a rotura y es considerado como un indicador de la cohesión de la mezcla, esto nos indica que los primeros mejoraran la capacidad de resistir al esfuerzo de corte debido a la interacción entre el ligante y los agregados, evitando de esta manera los fisuramientos a temperaturas severas y al tránsito.

La relación estabilidad flujo o rigidez de las mezclas modificadas con poliestireno expandido son superiores a las mezclas convencionales. Entonces las mezclas modificadas se comportan mejor en climas cálidos y fríos, ya que no son frágiles ante los cambios bruscos de temperatura y de clima.

De acuerdo a los ensayos realizados se pudo llegar a la conclusión que teniendo como premisa, se toma la hipótesis alterna H_a por lo cual la modificación de la mezcla asfáltica con poliestireno Expandido (EPS 3.4%) Mejora las propiedades mecánicas de una mezcla a base de poliestireno expandido a comparación de las que presentan las mezclas asfálticas convencionales, mejorando las fallas del asfalto como ahuellamientos, fisura miento por fatiga o efecto térmico, reduciendo las deformaciones permanentes del asfalto, pero no controlando totalmente el gradiente térmico puesto que el asfalto se comporta termoplásticamente y que el polímero utilizado no tienen propiedades elastómeras, al haber un gradiente térmico muy pronunciado esto generará pequeñas micro fisuras.



V. CONCLUSIONES

CONCLUSIÓN RESPECTO AL OBJETIVO GENERAL

Las mezclas asfálticas modificadas con polímeros EPS si influye en las propiedades mecánicas y durabilidad, con valores superiores a las mezclas convencionales como es en: el ensayo Marshall, resistencia a la compresión simple, perdida por desgaste del ensayo cántabro, tracción indirecta, inmersión - compresión, etc., lo que indica que tiene mayor resistencia; que permite alargarla durabilidad de los pavimentos asfálticos.

Conclusiones respecto al objetivo específico N° 1

- El flujo de los asfaltos convencionales es de 3.35 mm mientras de los asfaltos modificados con polímero EPS es de 3.495 mm, siendo superior en la fluencia en 0.145 mm.

ESTABILIDAD(Kg)	
Mezcla asfáltica convencional	1148.77
Mezcla asfáltica modificado	1387.30
RESULTADO	238.53
MEJORA (%)	20.76

- Los asfaltos modificados tienen mayor estabilidad superando en más del 20 % a los asfaltos convencionales.

FLUJO (mm)	
Mezcla asfáltica convencional	3.350
Mezcla asfáltica modificado	3.495
RESULTADO	0.145

Conclusiones respecto al objetivo específico N° 2

Se realizó ensayos de laboratorio acorde a las normativas y reglamentos establecidos, para el análisis de las propiedades mecánicas en ambas mezclas en caliente, convencional y

modificado con poliestireno expandido. Obteniéndose una mejora considerable en las propiedades

- Resistencia a la carga (*Ensayo de compresión simple*): En el ensayo de resistencia de compresión simple de los asfaltos modificados es superior en 9.46% en comparación a la resistencia a las mezclas convencionales.

RESISTENCIA A COMPRESION SIMPLE	
(kg/cm²)	
Asfalto convencional	59.31
Asfalto modificado	64.92
RESULTADO	5.61
MEJORA (%)	9.46

- Estabilidad / flujo (*Ensayo de estabilidad y flujo de Marshall*): La relación estabilidad flujo o rigidez de las mezclas modificadas son mayores en un 16.05% que las mezclas convencionales. Con este valor las mezclas modificadas se comportan mejor en climas cálidos y fríos, ya que no son frágiles en climas fríos y no son susceptibles ante la temperatura mayor.

FACTOR DE RIGIDEZ (kg/cm)	
Asfalto convencional	3420.59
Asfalto modificado	3969.74
RESULTADO	549.15
MEJORA (%)	16.05

- Durabilidad (*Desgaste por abrasión y/o el ensayo de pérdida de masa por inmersión en agua*): En el ensayo de cántabro las mezclas modificadas tienen menor desgaste que los convencionales, donde los primeros superan en 26.62% más que los segundos. Esto significa que los asfaltos modificados

presentan mejor adherencia a las partículas minerales que evitan su desprendimiento y el desgaste antelas cargas de tránsito.

ENSAYO CANTABRO (%)	
Asfalto convencional	5.41
Asfalto modificado	3.97
RESULTADO	-1.44
MEJORA (%)	26.62

- Flexibilidad (*Ensayo de tracción indirecta*): En el ensayo de tracción indirecta los asfaltos modificados son superiores a la tensión en aproximadamente en un 38.77% respecto a los asfaltos convencionales, esto nos indica que los primeros presentan mayor esfuerzo a la tracción evitando de esta manera los ahuellamientos a altas temperaturas y fisuramientos a bajas temperaturas.

ENSAYO DE TRACCION INDIRECTA (kg/cm²)	
Asfalto convencional	10.73
Asfalto modificado	14.89
RESULTADO	4.16
MEJORA (%)	38.77

De acuerdo a los ensayos realizados llegamos a la conclusión de que con la adición de poliestireno expandido (EPS 3.4%) mejoran las propiedades mecánicas como resistencia a la carga, factor de rigidez, durabilidad y flexibilidad, reduciendo las deformaciones permanentes del asfalto, pero no controlando totalmente el fenómeno de gradiente térmico puesto que el asfalto se comporta termoplásticamente ya que el polímero utilizado no tienen propiedades elastómeras y al haber un gradiente térmico muy pronunciado esto generará pequeñas micro fisuras.



Conclusiones respecto al objetivo específico N° 3

Se hizo el diseño para ambas mezclas asfálticas en caliente, convencional y modificada. Primeramente, realizándose el diseño de mezcla asfáltica en caliente convencional por el método Marshall, para hallar el porcentaje óptimo de cemento asfáltico y dosificación adecuada de agregados; determinando así la mezcla asfáltica patrón óptimo. Seguidamente se sustituye en porcentaje en peso de cemento asfáltico con poliestireno expandido EPS en proporciones de 1.5% 3.0% y 4.5%, realizando el diseño de mezclas para cada porcentaje de poliestireno empleando el método Marshall, tomando base el porcentaje de bitumen y la dosificación de agregados óptimos de la mezcla asfáltica patrón convencional.

Para finalmente obtener el diseño óptimo de mezcla asfáltica modificado, con la dosificación adecuada de agregados, cemento asfáltico y porcentaje óptimo de poliestireno expandido EPS, como se muestra en la figura.

Resultados finales del diseño de mezcla asfáltica en caliente (modificado)

MEZCLA DE AGREGADOS (PROPORCION EN PESO)	
Agregado grueso chancado	37.50%
Gravilla chancada	36%
Agregado fino zarandeado	24.50%
Cemento portland	2%
Total	100%
CEMENTO ASFALTICO	
Tipo de asfalto	C. A. 120/150
% Óptimo de C. A.	6.10%
Polímero EPS	3.40%

Fuente: *Elaboración propia*



VI. RECOMENDACIONES

RECOMENDACIONES

Para conocer más profundamente las propiedades mecánicas de los asfaltos modificados con poliestireno expandido se pueden realizar más pruebas para determinar las resistencias como son: a la tracción, a la fatiga, a la elongación, rigidez, etc. A parte de lo que se ha desarrollado en la presente tesis de investigación.

La fabricación de mezclas asfálticas modificadas en planta debe realizarse a una temperatura entre 170 ° a 180°C.

Se recomienda realizar futuros diseños de mezclas asfálticas modificadas, haciendo uso de los polímeros, para mejorar los performances de las vías, lo que redundará en la economía por ende tener mayor durabilidad y menor inversión.

A parte de determinar las ventajas de las mezclas asfálticas modificadas con poliestireno expandido sería interesante identificar algunas desventajas de las mezclas asfálticas modificadas con respecto a las mezclas convencionales. se recomienda seguir realizando más estudios de los efectos de los polímeros en las mezclas asfálticas y realizar tramos de prueba para evaluar el comportamiento funcional en zonas establecidas.

Se recomienda a las instituciones interesadas implementar laboratorios con equipos especializados que permitan efectuar estudios más profundos.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alarcon, J. (2003). *Estudio del Comportamiento de Mezclas Bituminosas Recicladas en Caliente en Planta*. (Tesis de grado). Universidad Politécnica de Cataluña., Barcelona, España.
- Almeida, C. (2014). *Uso de bloques de poliestireno expandido en terraplenes*. (Tesis de grado). Universidad Central del Ecuador, Ecuador.
- Arevalo, H., & Lucho, J. (2019). *Influencia de la incorporación de poliestireno en las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas en caliente*, Lima-2019. (Tesis de grado). Universidad Cesar Vallejo, Lima-Perú.
- Balarezo, F., & Tanaka, R. (2022). *Análisis del uso de residuos plastoc reciclados en la estabilidad, durabilidad e impermeabilidad de una mezcla asfáltica*. (Tesis de grado). Universidad privada del Norte, Trujillo.
- Beranjano, J., & Caicedo, C. (2017). *Análisis del comportamiento físico-mecánico de la mezcla asfáltica tipo MDC.19 con fibra natural de caña de azúcar*. (Tesis de grado). Universidad Católica de Colombia., Bogotá.
- Billmeyer, W. (2004). *Ciencia de los Polímeros*. España: Reverte. Obtenido de <https://educacionquimica.wordpress.com/2014/04/30/algunas-aplicaciones-de-los-polimeros/>
- Caceres, C. (2007). *Análisis de la Metodología Superpave para el Diseño de Mezclas Asfálticas en México*. (Tesis de Grado). Universidad de las Américas Puebla., Cholula, Mexico. Obtenido de http://caterina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/caceres_m_ca/



- Fernandez, A., & Ruiz, J. (2018). *Mezcla asfáltica modificada con poliestireno por vía seca*. (Tesis de grado). Pontificia Universidad Católica de Ecuador, Ecuador.
- Galdos, G. (2022). *Resistencia mecánica de mezcla asfáltica en frío con adición de poliestireno expandido, Huancayo, Junin - 2021*. (Tesis de grado). Universidad Peruana los Andes, Huancayo - Perú.
- Garnica, P., Delgado, H., & Sandoval, C. (2005). *Análisis comparativo de los métodos de Marshall y Superpave para compactación de mezclas asfálticas*. Mexico: Laboratorios acreditados por EMA.
- Guamanquispe, F. (2017). *Análisis de las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas con adición de caucho de llanta reciclado*. (Tesis de grado). Universidad técnica de Ambato, Ambato-Ecuador.
- Hernandez, J. C. (2008). *Características físicas y propiedades mecánicas de los suelos y sus métodos de medición*. (Tesis de grado). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- Hernandez, R., Fernandez, C., & Baptista, M. (2014). *Metodologías de la Investigación*. México: Interamericana Editores, S.A.
- Hernández, R., Fernandez, C., & Baptista, M. (2010). *Metodología de la investigación*. (5ta Edición). Mexico: McGraw-Hill.
- Herrera, C. (2015). Tecnopor. *El poliestireno expandido y su comportamiento estructural en la construcción*. (Tesis de grado). Universidad de Piura, Piura.
- Huaman, N. (2011). *La deformación permanente en las mezclas asfálticas*. (Tesis de grado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú. Obtenido de http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/819/1/huaman_gn.pdf



- Instituto del Asfalto, E. (1982). *Manual de Principios de Construcción de Pavimentos de Estados Unidos*: Asphalt Institute.: Lexington.
- Leiva, L. A. (10 de Mayo de 2018). *tecnologia del asfalto*. Chile. Obtenido de <https://construmine.webnode.cl/1/tecnologia-del-asfalto/>
- Medina, A., & De la Cruz, M. (2015). *Evaluación superficial del pavimento flexible del Jr. José*. (Tesis de grado). Universidad Peruanan de Ciencias Aplicadas., Lima, Perú.
- MTC. (2015). *Provias nacional, Plan operativo institucional*. Ministerio de transporte y comunicaciones, Lima.
- Padilla, A. (2004). *Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista*. (Tesina). Universitat Politecnica de Catalunya, Mexico. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/3334>
- Parra, E. (2018). *Sustitucion parcial del asfalto en una mezcla para pavimento a base de poliestirenos reciclados*. (Tesis de grado). Universidad Autonoma de Queretaro, Mexico.
- Pinedo, J. (2018). *Diseño de adoquines para pisos de transito liviano reaprovechando residuos de poliestireno expandido, agregados y emulsión asfáltica*. (Tesis de grado). Universidad César Vallejo, Tarapoto, Perú. Obtenido de <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/43520>
- Robinson, H. (2015). *Polimeros en asfalto*. Articulo de investigación. United States of America, Reino Unido.



- Sanchez, A. (2006). *Analisis comparativo de las características físicas entre el asfalto convencional y el asfalto modificado con poliestireno y llanta triturada*. (Tesis de grado). Universidad de la Salle, Bogotá.
- Segura, A. T. (2017). *Estudio del comportamiento físico y mecánico de mezclas asfálticas; con materiales reutilizables en la construcción como escoria de acero*. (Tesis de Grado). Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia. Obtenido de <https://repository.ucatolica.edu.co/entities/publication/51ab388f-f30d-4fdd-aec1-048612745776>
- Smith, M., & Collis, L. (1994). *Áridos” Áridos Naturales y de Machaqueo para la Construcción*. (L. S. Regueiro., Ed.) España: The Geological Society.
- Valdes, G., Calibi, A., & Sanchez, E. (2015). Evaluación de la durabilidad de mezclas asfálticas en función de las propiedades físicas de los. *FONDECYT*, 92-93.
- Valle, R. (1963). *Carreteras, calles y aeropistas principios generales de la mecanica de suelos aplicados a la pavimentacion y metodos para el calculo de pavimentos flexibles*. Caracas: El ateneo.
- Zuluaga, E., Gomez, N., & Correa, A. (2021). Desarrollo de un asfalto altamente modificado con polímero SBS a partir de un asfalto base convencional de la refinería Ecopetrol Barrancabermeja 60-70 variando la concentración de polímero. *Bistua*, 34-35.



ANEXOS



DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo Mhayer Quispe Aslla
identificado con DNI 70122579 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

Ingeniería Civil

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación para la obtención de Grado

Título Profesional denominado:

"Influencia en las propiedades Mecánicas y Durabilidad
de la mezcla asfáltica con sustitución Parcial con
Es un tema original. poliestileno expandido"

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 31 de Julio del 2023


FIRMA (obligatoria)



Huella



AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo Mhayer Quispe Aslla
identificado con DNI 70122579 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación para la obtención de Grado

Título Profesional denominado:

"Influencia en las propiedades Mecánicas y Durabilidad de la mezcla asfáltica con sustitución parcial con poliestireno expandido"

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los "Contenidos") que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 31 de Julio del 2023


FIRMA (obligatoria)



Huella