

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



**“EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL
CEMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO CON NANOARCILLA”**

Por:

ROXANA BALCERA LAYME

Proyecto de grado presentado a consideración de la “UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO”, como requisito para optar el grado académico Licenciatura en Ingeniería Civil.

SEMESTRE II- 2024

TARIJA-BOLIVIA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**“EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL
CEMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO CON NANOARCILLA”**

Por:

ROXANA BALCERA LAYME

SEMESTRE II- 2024

TARIJA-BOLIVIA

DEDICATORIA

A mis padres Modesto Balcera Charali y Fortunata Layme Apaza que fueron los que me impulsaron y animaron en el tiempo que realice mis estudios, siempre orando y pensando en sus hijos, deseándoles siempre lo mejor y que puedan cumplir sus sueños. Este logro es un testimonio de su inmenso amor y dedicación. Valoro mucho las lecciones de vida que me han impartido y por el cariño que siempre me han brindado. Mi gratitud hacia ustedes es imposible de expresar completamente. Esta tesis es un tributo a su legado y a la eterna admiración que siento por ustedes. Gracias por ser los mejores padres del mundo.

RESUMEN

En varios países del mundo investigan la utilización de cemento asfálticos modificados, con el propósito de encontrar alternativas de cementos asfálticos mezclados con productos naturales de manera que puedan modificarse obteniendo condiciones mejores al uso de cementos asfálticos convencionales.

El presente trabajo se enfoca en evaluar las propiedades mecánicas del cemento asfáltico modificado con nanoarcilla de bentonita a través de la caracterización con ensayos de laboratorio, para la utilización en mezclas asfálticas en caliente de pavimentos flexibles.

El método es de tipo investigativo experimental donde se manipuló la variable independiente nanoarcilla de bentonita, y se observó cómo afecta a las propiedades mecánicas del cemento asfáltico normal 85-100 que es el más usado en nuestro medio; para ello el aditivo de nanoarcilla de bentonita son partículas menores a 0,075 mm lo que permite que al adicionar al cemento asfáltico pueda mezclarse de manera homogénea con el objetivo de mejorar la reacción e interacción con el asfalto.

Posteriormente se prepararon 5 muestras de cemento asfáltico modificado, con porcentajes de 0.5%, 1%, 2%, 3% y 4%, de aditivo de nanoarcilla de bentonita. Se realizaron los ensayos de caracterización (penetración, ductilidad, punto de ablandamiento, punto de inflamación, peso específico) para el cemento asfáltico normal, como a las muestras modificadas con diferentes porcentajes de nanoarcilla de bentonita, según las normas del manual de la ABC.

Mediante la evaluación de los resultados obtenidos de los ensayos de caracterización del ligante modificado con nanoarcilla de bentonita, con respecto a los resultados del ligante normal o de referencia, se optó por la muestra modificada al 3%, que presenta mejoras en la propiedad la consistencia y susceptibilidad térmica, por ende un ligante menos susceptible térmicamente, más resistente al envejecimiento tiene un mejor comportamiento físico-químico que el ligante normal.

Para tener la certeza del efecto que tiene el aditivo nanoarcilla de bentonita en la modificación del cemento asfáltico, se realizó el ensayo Marshall con el cemento asfáltico normal y el modificado con los 5 porcentajes de nanoarcilla de bentonita, para realizar comparación en la variación de sus propiedades de la mezcla asfáltica, como su contenido óptimo de cemento asfáltico, estabilidad, fluencia, densidad, vacíos en la

mezcla, vacíos de agregado mineral y vacíos ocupados por el cemento asfáltico. De los resultados del ensayo Marshall se evidencio que en el cemento asfáltico modificado con nanoarcilla de bentonita al 3%, influyó de gran manera obteniendo una mayor estabilidad, menor fluencia, mayor densidad, menor porcentaje de vacíos en la mezcla y mayor en la relación betumen vacíos, en comparación con la mezcla asfáltica con cemento asfáltico normal, concluyendo que el cemento asfáltico modificado al 3% con el aditivo de nanoarcilla de bentonita, mejoran las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica.

El costo por cada tambor de 200 kg de cemento asfáltico modificado con nanoarcilla de bentonita, es de 2717,43 Bs dando el precio unitario por 1 kilo de 13,58 Bs y del cemento asfáltico convencional de 11 Bs, dando una diferencia de costo de 23,45 %.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

	Pág.
1.1. ANTECEDENTES	1
1.2. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	2
1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.3.1. Situación problemática.....	3
1.3.2. Formulación del problema	4
1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	4
1.4.1. Objetivo general	4
1.4.2. Objetivos específicos	4
1.5. HIPÓTESIS.....	5
1.6. OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES.	5
1.6.1. Variable Independiente	5
1.6.2. Variable Dependiente.....	5
1.7. DETERMINACIÓN DEL ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN.	5

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. GENERALIDADES.....	7
2.2. CEMENTO ASFÁLTICO.....	7
2.2.1. Historia y origen del cemento asfáltico.....	8
2.2.2. Producción del Asfalto.....	9
2.2.3. Clasificación de los materiales asfálticos.....	11
2.2.4. Composición química del cemento asfáltico.....	11
2.2.4.1. Asfaltenos.....	12
2.2.4.2. Maltenos	12
2.2.5. Propiedades reológicas del asfalto	13

2.2.5.1. Consistencia	13
2.2.5.2. Endurecimiento y envejecimiento.....	14
2.2.5.3. Durabilidad.....	14
2.2.5.4. Adhesión y cohesión	14
2.2.5.5. Susceptibilidad a la temperatura	15
2.2.6. Clasificación del cemento asfáltico.....	16
2.2.6.1. Clasificación por penetración.....	16
2.2.6.2. Clasificación por viscosidad	16
2.2.6.3. Sistema de clasificación Superpave o clasificación por desempeño (PG)	17
2.2.7. Especificaciones técnicas	18
2.2.7.1. Normas	18
2.2.7.2. Penetración.....	19
2.2.7.3. Ensayos de viscosidad.....	20
2.2.7.4. Ensayo de punto de inflamación mediante la Copa Abierta de Cleveland	20
2.2.7.5. El Punto de ablandamiento	21
2.2.7.6. Ensayo de Ductilidad	22
2.2.7.7. Peso Específico	23
2.3. CEMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO.....	24
2.3.1. Principales modificadores utilizados en el cemento asfáltico.....	25
2.3.2. Beneficios de la modificación del asfalto	26
2.3.3. Aplicaciones de los asfaltos modificados	27
2.4. NANOARCILLA	29
2.4.1. Definición.....	30
2.4.2. Tipos de nanoarcilla	31
2.4.3. Composición química de la nanoarcilla de bentonita.	32
2.4.4. Propiedades de la nanoarcilla de bentonita.	32
2.4.5. Ventajas de la nanoarcilla de bentonita.....	33
2.4.6. Importancia de la Nanoarcilla de bentonita.	34
2.5. MEZCLA ASFÁLTICA.....	34
2.5.1. Clasificación de las mezclas asfálticas.....	35

2.5.1.1.	Mezclas asfálticas en caliente:	35
2.5.1.2.	Mezclas asfálticas en frío:	35
2.5.1.3.	Mezclas asfálticas por el sistema de riegos:	35
2.5.2.	Diseño de una mezcla asfáltica	35
2.5.3.	Metodo Marshall	36
2.5.3.1.	Propiedades Método Marshall	37
2.5.4.	Preparación de muestras de ensayo	38
2.5.5.	Procedimiento del ensayo	39
2.5.6.	Ensayos de estabilidad y fluencia	39
2.5.7.	Criterios de diseño normalizado	40
2.6.	MARCO NORMATIVO	41
2.6.1.	Normativa sobre cementos asfalticos vigente (ABC)	41
2.6.2.	Norma ASTM	42
2.7.	MARCO REFERENCIAL	42

CAPÍTULO III

APLICACIÓN PRÁCTICA DEL CEMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO CON NANOARCILLA DE BENTONITA

3.1.	UBICACIÓN	44
3.2.	CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DEL PROYECTO.....	45
3.2.1.	Unidad de muestra, población y tamaño de la muestra:	45
3.2.2.	Tamaño de muestra	45
3.3.	CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES	48
3.3.1.	Caracterización del cemento asfaltico.....	48
3.3.1.1.	Ensayo de penetración (ASTM D5 / AASHTO T49-97).....	50
3.3.1.2.	Ensayo de ductilidad (ASTM D 113 / AASHTO T 51-00)	51
3.3.1.3.	Punto de inflamación mediante la copa abierta de Cleveland (ASTM D 1310-01 / AASHTO T 79-96).	52
3.3.1.4.	Punto de ablandamiento con el aparato de anillo y bola (ASTM D 36 / AASHTO T 53-96)	53

3.3.1.5. Peso específico (ASTM D 71 / AASHTO T 229-97)	55
3.3.2. Caracterización de la nanoarcilla de bentonita.....	56
3.3.2.1. Ensayo del peso específico del aditivo de la nanoarcilla de bentonita	56
3.3.2.2. Ensayo del análisis granulométrico por hidrómetro (ASTM D422).....	60
3.3.3. Cálculos operacionales con el aditivo nanoarcilla de bentonita.....	66
3.3.4. Características del cemento asfáltico con adición de nanoarcilla de bentonita.	67
3.3.5. Caracterización de agregados.....	74
3.3.5.1. Granulometría (ASTM E-40).....	74
3.3.5.2. Peso específico (ASTM E-127; E-128).....	78
3.3.5.3. Peso específico para agregados gruesos (ASTM E-127)	78
3.3.5.4. Peso específico para agregados finos (ASTM E-128)	80
3.3.5.5. Peso específico del Filler	82
3.3.5.6. Ensayo de abrasión por medio de máquina de los Ángeles (ASTM C-131) ..	82
3.3.5.7. Equivalente de arena (ASTM D-2419)	84
3.4. DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA MÉTODO MARSHALL	85
3.4.1. Descripción de la investigación	85
3.4.2. Contenido mínimo de cemento asfáltico.....	85
3.4.3. Dosificación de la mezcla asfáltica	86
3.4.4. Contenido óptimo de cemento asfáltico	87
3.4.5. Preparación de las muestras de ensayo	87
3.4.6. Determinación del cemento asfáltico por el método Marshall.....	90
3.4.7. Mezcla asfáltica convencional con el contenido óptimo.....	90
3.4.8. Mezcla asfáltica modificada al 3% de nanoarcilla de bentonita	91

CAPÍTULO IV

PROCESAMIENTO Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS

4.1. ORGANIZACIÓN DE RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO CONVENCIONAL Y MODIFICADO	93
4.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE CEMENTO ASFÁLTICO NORMAL 85- 100 Y EL MODIFICADO.	94

4.2.1.	Penetración.....	94
4.2.2.	Ductilidad.....	95
4.2.3.	Punto de inflamación.....	96
4.2.4.	Punto de ablandamiento	97
4.3.	JUSTIFICACIÓN DE LA ELECCIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DEL ADITIVO DE NANOARCILLA DE BENTONITA.....	98
4.4.	FORMA DE CUBICACIÓN.....	99
4.5.	ORGANIZACIÓN DE RESULTADOS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA NORMAL 85-100 Y EL MODIFICADO.....	102
4.6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA NORMAL 85-100 Y EL MODIFICADO.....	103
4.6.1.	Estabilidad.....	103
4.6.2.	Densidad.....	104
4.6.3.	% de Vacíos en la mezclas total	105
4.6.4.	Relación betumen vacíos.....	106
4.6.5.	Fluencia	107

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1.	CONCLUSIONES.....	109
5.2.	RECOMENDACIONES.....	111
	BIBLIOGRAFÍA.....	113

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1: Grados de penetración estándar ASTM	16
Tabla 2.2: Requisitos del cemento asfáltico clasificado por viscosidad a 60°C.....	17
Tabla 2.3: Grados asfálticos por desempeño (PG).....	18
Tabla 2.4: Normas AASHTO y ASTM aplicables a asfaltos.	18
Tabla 2.5: Aditivos para modificar el asfalto.....	25
Tabla 2.6: Requisitos de calidad del material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría densa.	40
Tabla 2.7: Ensayos de laboratorio Normalizados para Agregados	40
Tabla 3.1: Valores frecuentes de la variable estandarizada	45
Tabla 3.2: Fórmulas según tamaño de muestra.....	46
Tabla 3.3: Cálculo de muestra estratificada.....	46
Tabla 3.4: Especificaciones Técnica del cemento asfáltico REPSOL	48
Tabla 3.5: Caracterización del cemento asfáltico 85-100.....	49
Tabla 3.6: Resultado del ensayo de penetración del cemento asfáltico	50
Tabla 3.7: Resultados del ensayo de ductilidad	52
Tabla 3.8: Resultados del ensayo de punto de inflamación	53
Tabla 3.9: Resultados del ensayo de punto de ablandamiento.....	55
Tabla 3.10: Resultados del ensayo de peso específico.....	56
Tabla 3.11: Cálculos de la calibración del frasco precipitado	58
Tabla 3.12: Cálculo para determinar el peso específico de la nanoarcilla de bentonita	59
Tabla 3.13: Factores de corrección por temperatura CT.....	62
Tabla 3.14: Valores del K para varias combinaciones de pesos unitarios y temperaturas.....	63

Tabla 3.15: Valores de profundidad efectiva basados en hidrómetros y cilindros de sedimentación dados	63
Tabla 3.16: Factores de corrección “a” para el peso unitario de sólidos	65
Tabla 3.17: Planilla de cálculo.....	65
Tabla 3.18: Resultados del ensayo del hidrometro de nanoarcilla de bentonita	66
Tabla 3.19: Resultados del ensayo de penetración al 0,5% de nanoarcilla de bentonita	67
Tabla 3.20: Resultados del ensayo de penetración al 1% de nanoarcilla de bentonita ..	68
Tabla 3.21: Resultados del ensayo de penetración al 2% de nanoarcilla de bentonita ..	68
Tabla 3.22: Resultados del ensayo de penetración al 3% de nanoarcilla de bentonita ..	68
Tabla 3.23: Resultados del ensayo de penetración al 4% de nanoarcilla de bentonita ..	69
Tabla 3.24: Resultados del ensayo de ductilidad al 0,5% de nanoarcilla de bentonita.	69
Tabla 3.25: Resultados del ensayo de ductilidad al 1% de nanoarcilla de bentonita.....	69
Tabla 3.26: Resultados del ensayo de ductilidad al 2% de nanoarcilla de bentonita.....	69
Tabla 3.27: Resultados del ensayo de ductilidad al 3% de nanoarcilla de bentonita.....	70
Tabla 3.28: Resultados del ensayo de ductilidad al 4% de nanoarcilla de bentonita.....	70
Tabla3.29: Resultados del ensayo de inflamación al 0,5% de nanoarcilla de bentonita.....	70
Tabla 3.30: Resultados del ensayo de inflamación al 1% de nanoarcilla de bentonita..	70
Tabla 3.31: Resultados del ensayo de inflamación al 2% de nanoarcilla de bentonita..	71
Tabla 3.32: Resultados del ensayo de inflamación al 3% de nanoarcilla de bentonita..	71
Tabla 3.33: Resultados del ensayo de inflamación al 4% de nanoarcilla de bentonita..	71
Tabla 3.34: Resultados de ablandamiento al 0,5% de nanoarcilla de bentonita	71
Tabla 3.35: Resultados del ensayo de ablandamiento al 1% de nanoarcilla de bentonita.....	72

Tabla3.36: Resultados del ensayo de ablandamiento al 2% de nanoarcilla de bentonita.....	72
Tabla3.37: Resultados del ensayo de ablandamiento al 3% de nanoarcilla de bentonita.....	72
Tabla3.38: Resultados del ensayo de ablandamiento al 4% de nanoarcilla de bentonita.....	72
Tabla 3.39: Resultados del peso específico al 0,5% de nanoarcilla de bentonita	73
Tabla3.40: Resultados del ensayo de peso específico al 1% de nanoarcilla de bentonita.....	73
Tabla3.41: Resultados del ensayo de peso específico al 2% de nanoarcilla de bentonita.....	73
Tabla3.42: Resultados del ensayo de peso específico al 3% de nanoarcilla de bentonita.....	74
Tabla3.43: Resultados del ensayo de peso específico al 4% de nanoarcilla de bentonita.....	74
Tabla 3.44: Granulometría del agregado grueso (grava)	75
Tabla 3.45: Granulometría agregado grueso (gravilla).....	76
Tabla 3.46: Granulometría agregado fino	77
Tabla 3.47: Cantidad mínima de muestra según tamaño máximo nominal del árido	78
Tabla 3.48: Resultado del peso específico del agregado grueso (Grava)	80
Tabla 3.49: Resultado del peso específico del agregado grueso (Gravilla)	80
Tabla 3.50: Resultado del peso específico del agregado fino (arena).....	81
Tabla 3.51: Resultado del peso específico del filler	82
Tabla 3.52: Resultado del ensayo del desgaste de los Ángeles de la grava.....	83
Tabla 3.53: Resultado del ensayo del desgaste de los Ángeles De la gravilla.....	83
Tabla 3.54: Resultado del equivalente de arena.....	85

Tabla 3.55: Contenido mínimo del cemento asfáltico método de área superficial	86
Tabla 3.56: Dosificación de la mezcla asfáltica.....	86
Tabla 3.57: Contenido óptimo de cemento asfáltico.....	90
Tabla 3.58: Cálculo para las briquetas convencionales	90
Tabla 3.59: Resultado de las 18 briquetas de la Mezcla asfáltica modificado.....	91
Tabla 3.60: Resultado de las 30 briquetas de la Mezcla asfáltica modificada.....	91
Tabla 3.61: Promedio de las 30 briquetas de la mezcla asfáltica modificada al 3% de nanoarcilla de bentonita	92
Tabla 4.1: Resultados de la caracterización del cemento asfáltico 85-100.....	93
Tabla 4.2: Resultados de la caracterización del cemento asfáltico modificado.....	93
Tabla 4.3: Análisis de precios unitarios del cemento asfáltico modificado.....	99
Tabla 4.4: Resultado de las 18 briquetas de la Mezcla asfáltica modificada.....	102
Tabla 4.5: Promedio de las 30 briquetas de la mezcla asfáltica modificada.....	102

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1: Asfalto Natural Lago Peach Lake y asfalto refinado	8
Figura 2.2: Representación esquemática de la producción de asfaltos.....	10
Figura 2.3: Composición química del asfalto	13
Figura 2.4: Comportamiento del asfalto(Consistencia vs. Temperatura)	15
Figura 2.5: Ensayo de penetración.....	19
Figura 2.6: Equipo viscosímetro.....	20
Figura 2.7: Equipo de punto de inflamación cuchara de Cleveland	21
Figura 2.8: Ensayo de punto de ablandamiento	22
Figura 2.9: Ensayo de ductilidad	23
Figura 2.10: Nanoarcilla de bentonita	29
Figura 2.11: Nanoarcilla de bentonita	30
Figura 2.12: Equipo Marshall	37
Figura 3.1: Ubicación de la planta de agregados y de asfalto La Pintada	44
Figura 3.2: Medición de la penetración en el cemento asfáltico	50
Figura 3.3: Reposo de las briquetas en baño maría a 25°C	51
Figura 3.4: Desarmado de las briquetas y colocado al ductilímetro.....	52
Figura 3.5: Registro de la temperatura del cemento asfáltico.....	53
Figura 3.6: Vaciado y enrasado del cemento asfáltico en los anillos	54
Figura 3.7: Medición de la temperatura del ensayo de intervalos pequeños	55
Figura 3.8: Vaciado del cemento asfáltico del ensayo de peso específico	56
Figura 3.9: Ensayo del peso específico del aditivo nanoarcilla de bentonita	59
Figura 3.10: Lecturación con el hidrómetro 152H	61
Figura 3.11: Pesado de muestras del aditivo en diferentes porcentajes.....	67

Figura 3.12: Agregado grueso reposando 24 hrs y siendo secadas superficialmente	79
Figura 3.13: Pesaje sumergido del agregado grueso.....	79
Figura 3.14: Ensayo de peso específico del agregado fino.....	81
Figura 3.15: Ensayo de peso específico del Filler	82
Figura 3.16: Ensayo del desgaste de los Ángeles	83
Figura 3.17: Ensayo de equivalente de la arena.....	84
Figura 3.18: Mezclado del agregado con el cemento asfáltico.....	88
Figura 3.19: Compactado de 25 golpes por cada capa	88
Figura 3.20: Extracción de la briqueta del molde.....	89
Figura 3.21: Reposo de las briquetas según su dosificación.....	89
Figura 4.1: Comparación del cemento asfáltico de referencia con el modificado con el ensayo de penetración	94
Figura 4.2: Comparación del cemento asfáltico de referencia con el modificado con el ensayo de ductilidad.....	95
Figura 4.3: Comparación del cemento asfáltico de referencia con el modificado con el ensayo de punto de inflamación.....	96
Figura 4.4: Comparación del cemento asfáltico de referencia con el modificado con el ensayo de punto de ablandamiento	97
Figura 4.5: Justificación de la elección del porcentaje de 3% de nanoarcilla de benonita.....	98
Figura 4.6: Comparación de costos de cemento asfáltico normal y cemento asfáltico modificado con nanoarcilla de bentonita	100
Figura 4.7: Comparación de los resultados de estabilidad.....	103
Figura 4.8: Comparación de los resultados de la densidad.....	104
Figura 4.9: Comparación de los resultados de % de vacíos en la mezcla total	105
Figura 4.10: Comparación de los resultados de RBV	106

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXOS A	CARACTERIZACIÓN DE LA NANOARCILLA DE BENONITA
ANEXOS B	CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO 85-100
ANEXOS C	CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO CON NANOARCILLA DE BENTONITA (0,5%,1%,2%, 3%,4%)
ANEXOS D	GRANULOMETRÍA DE LOS AGREGADOS
ANEXOS E	CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS
ANEXOS F	DOSIFICACIÓN DEL DISEÑO DE MÉTODO MARSHALL
ANEXOS G	REGISTRO FOTOGRÁFICO
ANEXOS H	FICHAS TÉCNICAS
ANEXOS I	VALIDACIÓN DE FIRMAS