

DISEÑO DE UN LIGANTE BITUMINOSO MODIFICADO CON MEMBRANAS DE POLIPROPILENO CON POLÍMEROS CONSIDERANDO VARIACIONES EXTREMAS DE TEMPERATURA EN CHIMBORAZO

Vanesa Bejarano-Chaguancallo¹; Alexandra Camino-Cepeda¹; Vladimir Pazmiño-Chiluiza¹, Alexis Andrade-Valle^{1,2}

¹Universidad Nacional de Chimborazo, vkbejarano.felc@unach.edu.ec, 0992513676

¹ Universidad Nacional de Chimborazo, aecamino.fic@unach.edu.ec, 0983269974

¹ Universidad Nacional de Chimborazo, hypazmino@unach.edu.ec, 0983999784

¹ Universidad Nacional de Chimborazo, alexis.andrade@unach.edu.ec, 0958711980

² Universidad Politécnica de Valencia, alaniv@alumi.upv.es, 0958711980

Resumen

El propósito de esta investigación fue añadir membranas de polipropileno con polímeros para el diseño de un ligante modificado que se comporte adecuadamente en cambios extremos de temperatura en la provincia de Chimborazo. Para su desarrollo se utilizó como base un ligante asfáltico AC-20, SBR y PP; a través del estado del arte se elaboró cinco muestras denominadas con las siglas A, B, C, D y E, finalmente se realizó ensayos de caracterización convencionales y grado de desempeño. Además, mediante la indagación en la INAMHI y Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial se obtuvo información de temperaturas máximas y mínimas registradas en la provincia de Chimborazo durante los últimos 10 años. Los datos obtenidos determinaron que la muestra modificada con 0.5% de PP y 1% de SBR presenta los mejores resultados considerando características físicas y desempeño en temperaturas extremas, debido al incremento de 14.90% del punto de inflamación y 5.4% en la temperatura de falla con respecto al ligante convencional AC-20; mayor deformación ante las cargas solicitadas, una disminución del 53.17 % en su rigidez a una temperatura de -10°C. Por otro lado, a partir de la variación climática de Chimborazo y en base al algoritmo LTPP, se determinó que la temperatura máxima y mínima del pavimento es de 58.50°C y -3.18°C respectivamente. La adición de 0.5% de PP y 1% de SBR mejoró las propiedades físicas y reológicas del ligante convencional, por ende, es apropiado su uso en la provincia de Chimborazo.

Palabras Claves: Ligante asfáltico, ligante modificado, polipropileno, SBR, temperatura.

Abstract

The purpose of this research was to add polypropylene membranes with polymers for the design of a modified binder that behaves adequately in extreme temperature changes in the province of Chimborazo. For its development, an AC-20, SBR and PP asphalt binder was used as a base; through the state of the art, five samples named A, B, C, D and E were elaborated, and finally, conventional characterization and performance grade tests were carried out. Also, information on maximum and minimum temperatures recorded in the province of Chimborazo during the last 10 years was obtained from INAMHI and the Development and Land Management Plan. The data obtained determined that the sample modified with 0.5% PP and 1% SBR presents the best results considering physical characteristics and performance in extreme temperatures, because the increase of 14.90% in the flash point and 5.4% in the fault temperature with respect to the conventional binder AC-20; increased deformation at the requested loads, a decrease of 53.17% in its rigidity at a temperature of -10°C. On the other hand, from the climatic variation of Chimborazo and based on the LTPP algorithm, it was determined that the maximum and minimum temperature of the pavement is 58.50°C and -3.18°C respectively. The addition of 0.5% PP and 1% SBR improved the physical and rheological properties of the conventional binder; therefore, its use in the province of Chimborazo is appropriate.

Keywords: temperature, asphalt binder, modified binder, SBR, polypropylene.

Introducción

El diseño, adherencia e incorporación de diferentes materiales en los ligantes bituminosos permitió que las carreteras brinden confort a los usuarios y una ágil apertura al tráfico; es lo que prácticamente hoy en día ha sido utilizado como una metodología positiva que aporte a la construcción de vías a nivel mundial (Baque, 2020).

Países como Brasil, Colombia, México y Chile han realizado investigaciones donde utilizan ligantes asfálticos modificados para alcanzar mejores resultados en comparación con el tradicional, incluso cuentan con normativas vigentes sobre su empleo, la más reciente es el manual de carreteras de Chile (MOPT, 2021), donde se puede encontrar las especificaciones aplicadas al uso de cementos asfálticos modificados con polímeros.

En Ecuador se evidencia algunas limitaciones con respecto al estado de las vías, esto se debe a las variaciones de temperatura que perjudican al cemento asfáltico, dando como consecuencia un bajo desempeño.

Es importante tomar en cuenta que, debido a la ubicación de nuestro país, la temperatura atmosférica varía, según los datos proporcionados en los informes de la estación agrometeorológica indican que, en los últimos años se ha registrado algunas variaciones tanto altas como bajas en la provincia de Chimborazo (INAMHI, 2022).

Por lo tanto, los ligantes bituminosos deben tener la capacidad de ajustarse a estas variaciones extremas, además su desempeño dependerá de los procesos de elaboración; una alternativa es proponer un ligante modificado, el cual tiene la finalidad de mejorar sus características y propiedades sin ser afectados directamente por los agentes atmosféricos y endurecimiento por oxidación del cemento asfáltico (Cárdenas & Fonseca, 2009).

Según Guevara, (2021) indica en su trabajo de investigación “realizar un cemento asfáltico modificado con PP ayuda a disminuir la susceptibilidad al envejecimiento térmico”; mientras que Pérez et al., (2016) menciona que “al añadir polímeros se obtiene una mayor compatibilidad debido a sus propiedades elásticas, mejorando significativamente la rigidez y la elasticidad del ligante asfáltico”.

El desarrollo de esta investigación se basó en la inclusión de polipropileno provenientes de tapabocas combinado con SBR que permitan alcanzar un mejor comportamiento; para ello, se realizó pruebas convencionales del AC-20 y del ligante modificado con la finalidad de evaluar sus características físicas y reológicas; posterior a ello, se aplicó ensayos de desempeño identificando un rango de temperaturas de trabajo; ante variaciones climáticas extremas en la provincia de Chimborazo.

Metodología

El tipo de investigación utilizado fue exploratorio debido a que el tema de estudio buscó mejoras en el ligante bituminoso utilizando polímeros que aportan elasticidad y baja susceptibilidad térmica ante variaciones climáticas; con enfoque experimental en la recolección y análisis de datos numéricos obtenidos en el laboratorio mediante la manipulación de variables (comparación del comportamiento del ligante convencional con el modificado) considerando la normativa INEN, ASTM y AASHTO. La metodología empleada tuvo 3 fases detalladas a continuación:

Fase 1: Temperaturas en la provincia de Chimborazo

Se identificó los sectores más críticos de la provincia de Chimborazo considerando su elevación (msnm), con ello se eligió las temperaturas extremas (máximas y mínimas) en los últimos 10 años, esta información se obtuvo del Plan de Desarrollo de Ordenamiento Territorial (PDOT) de cada uno de los cantones y de la Estación Meteorológica de la ESPOCH. La información recolectada se clasificó en temperaturas del aire máximas y mínimas.

Con el algoritmo para el comportamiento del pavimento a largo plazo (LTPP) se transformó la temperatura del aire a temperatura de trabajo en base a las ecuaciones descritas (Segovia, 2014), a continuación:

$$T_{20mm} = (T_{air} - 0.00618 * [Lat]^2 + 0.2289 * Lat + 42.2)(0.9545) + 17.78 \quad (1)$$

Donde:

T_{20mm} = temperatura alta de diseño a 20mm de profundidad, (°C)

T_{air} = temperatura del aire máxima promedio, (°C)

Lat = latitud gráfica del sitio, (grados sexagesimales)

$$T_{pav} = -1.56 + 0.72 * T_{air} - 0.004 * [Lat]^2 + 6.26 * [\log]_{10} (H + 25) - z * (4.4 + 0.52 * \sigma_{air})^{0.5} \quad (2)$$

Donde:

T_{pav} = temperatura baja del ligante bajo la superficie, (°C)

T_{air} = temperatura del aire mínima promedio, (°C)

Lat = latitud gráfica del sitio, (grados sexagesimales)

H = profundidad desde la superficie, (mm)= 20mm

z = distribución normal estándar

σ_{aire} = desviación estándar de la temperatura baja del aire, (°C)

La temperatura máxima del pavimento corresponde a la ecuación (1), mientras que la temperatura mínima hace énfasis en la ecuación (2).

Fase 2: Ligante Asfáltico Modificado

La información acerca de propiedades, características y dosificación se obtuvo a partir del estado del arte; la obtención del SBR fue de forma pura (bloque de color amarillento) mientras que el PP se consiguió de las mascarillas quirúrgicas (capas externas).

Se realizó cinco muestras denominadas con la nomenclatura A, B, C, D y E, para ello se utilizó el ligante bituminoso AC-20 y se modificó con 0.5, 1.0, 1.5, 1,75 % de membranas de Polipropileno, 1, 2, 3, 4 % de SBR respectivamente.

La muestra A es el ligante convencional.

Para las otras muestras, se realizó el siguiente procedimiento:

- a. Se calentó el betún hasta que esté totalmente líquido y cuando alcanzó una temperatura de 160°C se añadió el respectivo porcentaje de SBR.
- b. Posterior a ello, se agitó mecánicamente la mezcla con la ayuda de un aspa a una velocidad constante durante 1 hora, controlando que la temperatura de mezclado se encuentre entre 160 a 180°C.
- c. Transcurrido este tiempo, se controló que la muestra se encuentre a una temperatura de 150°C y se añadió el porcentaje de membranas de polipropileno. Se agitó mecánicamente la muestra a una velocidad constante durante 30 minutos más, manteniendo una temperatura de 150 a 170°C; finalizado este tiempo se retiró la muestra de la fuente de calor y se las dejó enfriar a temperatura ambiente.



Figura 1. Elaboración de los ligantes asfálticos modificados

Las muestras fueron analizadas en el ensayo de Viscosímetro Rotacional (RV), donde se obtuvo la viscosidad a diferentes rangos de temperatura. Además, se realizó ensayos

convencionales de caracterización física tales como: Penetración, Peso Específico, Punto de Inflamación, Ablandamiento y Ductilidad.



Figura 2. Ensayos convencionales de caracterización física

Una vez culminado este proceso se analizó los resultados con la finalidad de seleccionar la muestra que cumplió los parámetros y especificaciones de la normativa INEN y ASTM, la misma que fue sometida a ensayos por Grado de Desempeño como el Reómetro de Corte Dinámico (DSR), Envejecimiento a Corto Plazo (RTFO), Envejecimiento a Largo Plazo (PAV) y el Reómetro de Viga a Flexión (BBR).



Figura 3. Ensayos por grado de desempeño

Fase 3: Comparación de resultados

Con los resultados obtenidos en la Fase 1 y Fase 2 se procedió a compararlos y determinar si el ligante modificado presenta mejora en sus propiedades con respecto al ligante convencional, además se evaluó su desempeño de operación en la provincia de Chimborazo.

Resultados

Temperaturas máximas y mínimas en Chimborazo

Para el análisis de las temperaturas en la Red Vial de Chimborazo, se utilizó información bibliográfica del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial y de la estación

meteorológica INAMHI de los últimos 10 años. La provincia cuenta con varios corredores viales que permiten la comunicación con Guaranda, Ambato, Baños de Agua Santa, Macas, Cuenca, Guayaquil, entre otros, como se indica en la Tabla 1:

Tabla 1. Registro de la variación de temperaturas en Chimborazo

Corredor Vial	Sector	Ubicación	Elevación (msnm)	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)
E 46	Atillo	Parroquia de Cebadas, Cantón Guamote.	3547	10	0
E 491	El Arenal	Límite entre la provincia de Guaranda y Chimborazo.	4407	10	-4
-	Urbina	Perteneciente a la parroquia de San Andrés, cantón Guano.	3621	17	4
-	Santa Fe de Galán	Parroquia rural del cantón Guano.	3600	12	6
E 35	Alausí	Achupallas	3497	14	4
		Huigra	1260	26	18
E 490	Baños de Agua Santa	Provincia de Tungurahua, a 54.8 Km de la ciudad de Riobamba.	2641	20	6
E 487	Cumandá	Sur oeste de la provincia de Chimborazo, a 127 Km de la ciudad de Riobamba.	335	32	10.6
-	Riobamba	-	2733 - 2900	26.8	0.2
E 487	Pangor (Colta)	Noroccidente de Chimborazo, a 18 Km de la ciudad de Riobamba.	2990 - 3865	28	-12

Transformación de la temperatura del aire a temperatura del pavimento

Tabla 2. Temperaturas máximas de trabajo

Sector	Temp. °C
Cumandá	32.0
Riobamba	26.8
Atillo	10.0
El Arenal	10.0
Urbina	17.0
Santa Fe de Galán	12.0
Achupallas (Alausí)	14.0
Sibambe (Alausí)	26.0
Baños de Agua Santa	20.0
Colta	32.0
Promedio, °C	19.98
desv. Estándar	8.69
T °C +/- 2 σ, °C	37.35
Latitud	1.67
T 20mm, °C	58.50

Tabla 3. Temperatura mínima de trabajo

Sector	Temp. °C
Atillo	0
El Arenal	-4
Urbina	4
Santa Fe de Galán	6
Achupallas	4
Sibambe	18
Baños de Agua Santa	6
Cumandá	10.6
Riobamba	0.2
Pangor (Colta)	-12
Promedio, °C	3.28
desv. Estándar	8.12
T °C +/- 2 σ, °C	-12.95
Latitud	1.67
H pav (mm)	20.00
Z	-0.90
σ aire	8.12
T pav, °C	-3.18

Se aplicó el algoritmo LTPP y se obtuvo la temperatura máxima de trabajo en el pavimento para la provincia de Chimborazo de 58.50 °C y mínima de -3.18 °C.

Ensayo de Viscosidad Rotacional

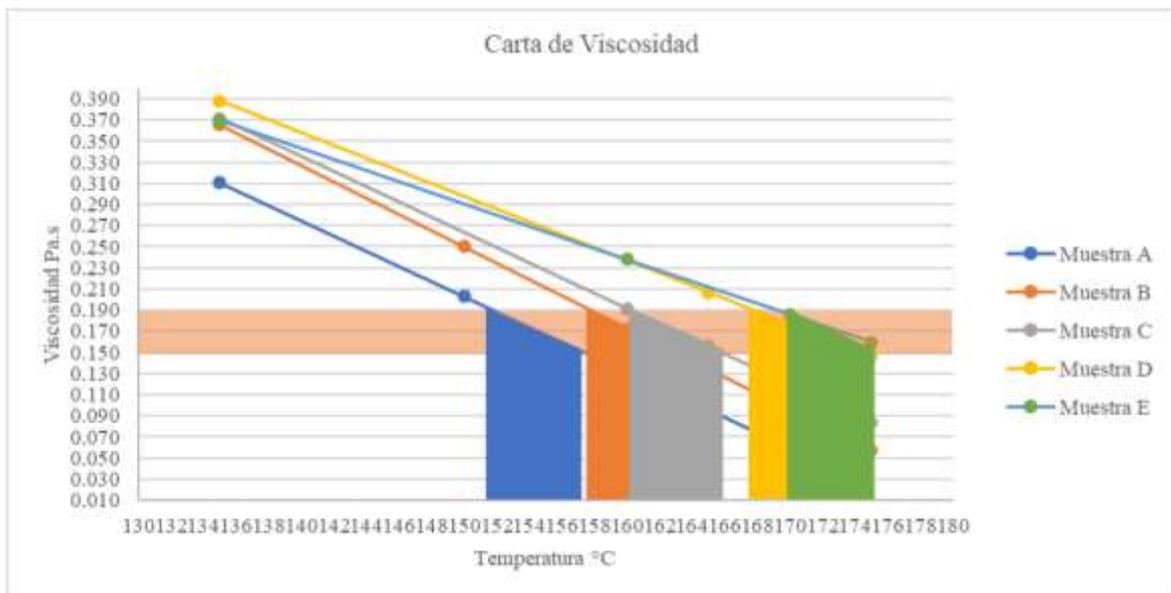


Figura 4. Carta de Viscosidad de las diferentes muestras

Tabla 4. Viscosidad y temperatura de mezclado de las muestras

Muestra	Rango de viscosidad (Pa.s)	Rango de Temperatura (°C)
A	0.17 ± 0.2	152 – 157
B	0.17 ± 0.2	158 – 163
C	0.17 ± 0.2	160 – 165
D	0.17 ± 0.2	168 – 174
E	0.17 ± 0.2	169 – 175

En base a la normativa ASTM D 2493 (2006), se definió el rango de viscosidad de 0.17 ± 0.2 Pa.s, y con ello se determinó la temperatura de mezclado del ligante convencional (muestra A) y modificado (muestras B, C, D y E).

Ensayos convencionales de caracterización física

Tabla 5: Verificación del cumplimiento de normativa en ensayos de caracterización

Ensayo	Unidad	Normativa	Especificaciones		A	B	C	D	E
			Mínimo	Máximo					
<i>Viscosidad Rotacional (T. Mezclado)</i>	mPa s	ASTM D 4402 – 02	156	161	152 – 157	158 – 163	160 – 165	168 – 174	169 – 175
		MOPT	135	160					
<i>Penetración</i>	dmm	NTE INEN 917	60	70	60	71.25	69	71.25	59
<i>Peso Específico</i>	g	ASTM D 4402 – 02	1	.....	1.008	1.124	1.121	1.145	1.148
<i>Punto de Inflamación</i>	°C	NTE INEN 3030	230	.....	232	235	270	300	.....
<i>Ablandamiento</i>	°C	ASTM D 36/D36M-14	48	67	49	49.9	.....	.....	.....
<i>Ductibilidad</i>	cm	NTE INEN 2515	20	.....	20	9	.....	.....	.....

Nota. Cabe mencionar que en ensayo de ductilidad fue realizado con el residuo del RTFO es por ello que se obtiene un resultado de 9 cm.

Los resultados obtenidos en la Tabla 5, determinaron que la muestra B (0.5% PP y 1% SBR) cumplió con los parámetros de Caracterización Física en base a las normativas INEN y ASTM, por lo tanto, se procede a realizar ensayos PG en dicha muestra.

Ensayos de grado de desempeño

Tabla 6: Verificación del cumplimiento de normativa en el ensayo DSR

Ensayo	Normativa	Recomienda	Muestras	Factor de Ahuellamiento $G^*/\text{sen}\delta$ (kPa)	Temperatura de Falla (°C)	Grado de desempeño
DSR	AASHTO M320	64	<i>AC-20</i>	1.16	65.3	64
	NTE INEN 3030		<i>B</i>	1.74	68.8	64

Tabla 7: Verificación del cumplimiento de normativa en el ensayo RTFO

Ensayo	Normativa	Recomienda	Muestra	Pérdida de masa (%)
RTFO	ASTM D 2872 – 19		<i>AC-20</i>	-0.035
	AASHTO M320		<i>B</i>	-0.050

Tabla 8: Verificación del cumplimiento de normativa en el ensayo BBR

Ensayo	Normativa	Recomienda	Muestra	Deformación (mm)	Rigidez (MPa)	Valor m
BBR	AASHTO M320 NTE INEN 3030	RIGIDEZ= Min. 300 Mpa m=min 0.30	<i>AC-20</i>	0.5657	138.863	0.3182
			<i>B</i>	1.3498	63.1496	0.3332
			<i>B</i>	1.3077	66.9069	0.3196

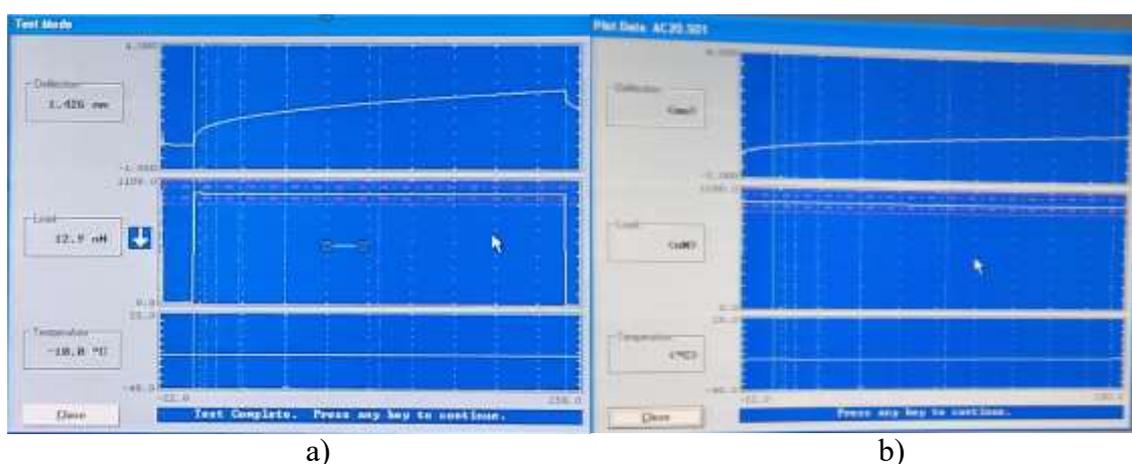


Figura 5. Ensayo BBR: a) Deflexión del ligante asfáltico modificado, b) Deflexión del ligante asfáltico convencional

Fuente: (Laboratorios de Pavimentos PUCE, 2023)

La Figura 5 mostró la deflexión de un asfalto modificado y de un convencional, donde la muestra B (0.5% de PP y 1% de SBR) refleja una mayor deflexión a una temperatura de -10°C , además cumplió con los parámetros establecidos en la normativa NTE INEN 3030 y AASHTO M320.

Discusión

Después de haber realizado el análisis de diferentes sectores críticos en la provincia de Chimborazo se identificó que al estar ubicado en la región Interandina y estar al límite con la región Costa hay una variación climática máxima de 32°C perteneciente a Cumandá y una mínima de -12°C registrada en Pangor perteneciente al Cantón Colta.

Es necesario identificar las temperaturas de trabajo del pavimento, por lo tanto, se transformó la temperatura del aire a la de operación mediante el algoritmo LTPP, esto permitió obtener como un valor máximo 58.50°C y mínimo de -3.18°C . Cabe mencionar que solo en la ciudad de Riobamba según Cobo, (2016) se registra 52.21°C y 16.83°C como máxima y mínima. Con ello se determinó que la elevación de los sectores críticos es de gran importancia e influyeron de forma significativa en los resultados.

Entre los tipos para realizar mezclas asfálticas, según Capitaó et al., (2019) la vía seca incorpora los modificadores al agregado y posterior a ello con el ligante (CILA, 2019), sin embargo, según Navia et al., (2021) la vía húmeda consiste en agregar los modificadores directamente al ligante asfáltico y hay que tomar en cuenta que la forma en la que se mezclen los modificadores repercutirá en los resultados obtenidos.

De acuerdo con la normativa (ASTM D4402-02, 2015) las muestras A y B cumplen con los valores límites (156 – 161 MPa.s); mientras que las muestras C, D y E sobrepasan este rango, por lo que se debe tener cuidado con la cantidad de modificadores a incluirse debido a que la muestra se vuelve más viscosa dificultando el proceso de preparación y por ende en su trabajabilidad; la inclusión de altos porcentajes de modificadores produjo un mayor gasto energético.

En los resultados obtenidos, el ensayo de penetración determinó que el aumento de modificadores influyó directamente en su comportamiento siendo más blando en las muestras B, C y D, sin embargo, la muestra E (4%SBR + 1.75%PP) tiene un comportamiento rígido y no cumplió con los parámetros descritos en la normativa (INEN 917, 2013), descartando el uso de modificadores con mayor cantidad de modificadores.

Una muestra con mayor porcentaje de modificadores conllevó al aumento de su peso específico, sin embargo, todas las muestras cumplieron con la norma (ASTM D4402-02, 2015). Asimismo, el punto de inflamación de las muestras modificadas aumentó consiguiendo muestras con menor riesgo de combustión y cumpliendo la (INEN 3030, 2017). Además, según el ensayo de ablandamiento, la muestra B cumplió con la (ASTM D36-06, 2010)

En cuanto a los análisis por grado de desempeño, en el ensayo DSR la muestra modificada B cumplió con la normativa INEN 3030 y AASTHO, además presentó una temperatura de falla de 68.3°C siendo superior al ligante AC-20 la cual falla a 65.3°C .

El ensayo BBR consiste en formar una viga con ligante asfáltico, la muestra B fue sometida a -10°C obteniendo una mayor deformación ($\delta = 1.3498 \text{ mm}$) y por ende una menor rigidez ($R = 66.9069$) en comparación con el ligante convencional AC-20 ($\delta = 0.5657 \text{ mm}$ y $R=138.863$) en base a los datos obtenidos en el Laboratorio de Pavimentos PUCE, lo que significó que la muestra modificada B es mucho más elástica ante temperaturas bajas extremas y puede ser empleada en sectores susceptibles a variaciones de temperatura extrema.

Conclusiones

La provincia de Chimborazo debido a su ubicación presenta una variación climática considerable, identificando temperaturas mínimas en zonas de mediana – alta montaña como Atillo, El Arenal, Urbina, Achupallas, Riobamba y Colta, mientras que temperaturas máximas en zonas bajas como Cumandá, Huigra; su variación de temperatura climática del aire va de un extremo a otro debido a su ubicación geográfica, siendo la más alta 32°C y la más baja de -12°C .

Con la información recolectada y en base al algoritmo LTPP se pudo estimar las temperaturas internas máxima y mínima del pavimento en la provincia de Chimborazo, obteniendo como resultados valores de 58.5°C y -3.18°C respectivamente.

Se analizó muestras de ligante bituminoso convencional y modificado mediante varios ensayos, se inició con pruebas de viscosidad rotatoria donde se obtuvo que la muestra B una temperatura de mezclado de 158°C a 163°C ; posteriormente caracterización física como penetración, peso específico, punto de inflamación, ductilidad y ablandamiento; en base a los resultados obtenidos se determinó que a mayor contenido de modificadores hay un aumento en el gasto energético durante su proceso de mezclado y ligeramente un incremento de su peso específico, sin embargo, se obtuvo un buen comportamiento ante el punto de llama ya que hubo menor probabilidad de inflamación con respecto al ligante convencional.

La muestra B conformada por 0.5 % de polipropileno y 1% de SBR tuvo un mejor desempeño con respecto al ligante convencional AC-20, esta fue sometida a ensayos de PG obteniendo resultados satisfactorios; en el ensayo DSR se determinó que la falla se da a una temperatura de 68.8°C , mientras que en el BBR tuvo un buen comportamiento hasta -10°C .

La muestra B se comporta adecuadamente en temperaturas extremas estimadas de forma bibliográfica en la provincia de Chimborazo y el algoritmo LTPP; determinando que el polipropileno mejoró las características ante temperaturas altas (64°C) y el SBR disminuyó problemas de fatiga a temperaturas bajas (-22°C), con ello se le calificó con PG 64-22 considerando los requisitos de la norma NTE INEN 3030.

Referencias Bibliográficas

- ASTM D 2493. (2006). *Viscosity-Temperature Chart for Asphalts*. 12, 1–5.
<https://www.astm.org/standards/d2493>
- ASTM D36-06. (2010). *Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus)*. <https://www.astm.org/standards/d36>
- ASTM D4402-02. (2015). ASTM D4402-02 (2016), Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer1. *ASTM International*, 14(July), 1–5.
https://www.astm.org/d4402_d4402m-23.html
- Baque, B. (2020). Evaluación del estado del pavimento flexible mediante el método del PCI de la carretera puerto-aeropuerto (Tramo II), Manta. Provincia de Manabí Assessment of the state of flexible pavement using the pci method of the port-airport highway (Section II). Bl. *Dominio de Las Ciencias*, 6(Tramo II), 203–228.
- Cárdenas, J., & Fonseca, E. (2009). Modelación del comportamiento reológico de asfalto convencional y modificado con polímero reciclado, estudiada desde la relación viscosidad-temperatura. *Revista EIA*, 12(2), 125–137.
- CILA. (2019). Memorias del XX Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto. *Retos y Oportunidades En El Mundo Del Asfalto*, 1–2176.
- Cobo, L. (2016). *Isla de calor por la incidencia de los fenómenos de transferencia en pavimentos flexibles en la ciudad de Riobamba*.
<http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/6497>
- Guevara, C. (2021). *Caracterización fisicoquímica y determinación del grado de desempeño de asfalto de la Refinería Esmeraldas modificado con polipropileno*. Universidad Central del Ecuador.
- INAMHI. (2022). *Estación Agrometeorológica - Escuela Superior Politécnica de Chimborazo*. <https://www.esPOCH.edu.ec/index.php/estacion-meteorologica.html>
- INEN 917. (2013). *Materiales Bituminosos. Determinación de la Penetración*.
<https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/917-1.pdf>
- INEN 3030. (2017). *Productos derivados de petróleo. Ligante asfáltico de acuerdo con el Grado de Desempeño*.
https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte_inen_3030.pdf
- MOPT. (2021). *Manual de Carreteras. Volumen N° 8. Especificaciones y métodos de muestreo, ensaye y control* (Dirección).
https://vialidad.mop.gob.cl/areasdevialidad/laboratorionacional/Documents/Volumen_N°8_Jun.2020.pdf

- Navia, L., Pereira, E., & Sarati, J. (2021). *Análisis mezcla asfáltica modificada con fibras de polipropileno de tapabocas usados*. 1–79.
[https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/27104/1/Trabajo de Grado Entrega Navia-Pereira-Sarasti REV28112021.pdf](https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/27104/1/Trabajo%20de%20Grado%20Entrega%20Navia-Pereira-Sarasti%20REV28112021.pdf)
- Pérez, I., Pérez, V., García, A., Pérez, F., Miró, R., & Botella, R. (2016). Estudio del uso de ligantes modificados en mezclas antifisuras. *Departamento de Infraestructura Del Transporte y Del Territorio*.
<http://hdl.handle.net/2117/87673>
- Segovia, A. J. (2014). Predicción De Las Deformaciones Plásticas Permanentes De Mezclas Asfálticas En Caliente, Correlacionando Determinaciones De Rigidez Del Ligante Y Ensayos Dinámicos De Carga. *Tesis Para Optar El Título de Master En Ing. Civil- Pontificias Universidad Católica Del Ecuador*, 171.
<http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/11401>