



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MEDIANTE RELACIONES
VOLUMÉTRICAS EMPLEANDO UN ASFALTO MODIFICADO**

Trabajo de titulación previo a la obtención del

Título de Ingenieras Civiles

AUTORAS: Silvana Edith Escobar Lara

Tania Sofia Imbago Umaquina

TUTOR: Francisco Roberto Ortiz Navas

Quito-Ecuador

2026

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotras, Silvana Edith Escobar Lara con documento de identificación N° 1751994102 y Tania Sofia Imbago Umaquina con documento de identificación N° 1726116351; manifestamos que:

Somos las autoras y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 20 de febrero del 2026

Atentamente,



Silvana Edith Escobar Lara
1751994102



Tania Sofia Imbago Umaquina
1726116351

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN
A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotras, Silvana Edith Escobar Lara con documento de identificación N°1751994102 y Tania Sofia Imbago Umaquina con documento de identificación N°1726116351; expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autoras del Proyecto de Investigación: “Diseño de una mezcla asfáltica mediante relaciones volumétricas empleando un asfalto modificado”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingenieras Civiles, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

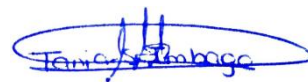
En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 20 de febrero del 2026

Atentamente,



Silvana Edith Escobar Lara
1751994102



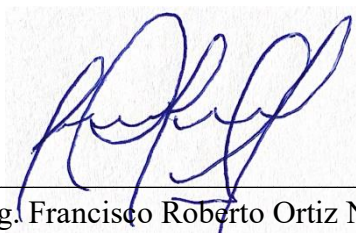
Tania Sofia Imbago Umaquina
1726116351

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Francisco Roberto Ortiz Navas con documento de identificación N°1717631244, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MEDIANTE RELACIONES VOLUMÉTRICAS EMPLEANDO UN ASFALTO MODIFICADO, realizado por Silvana Edith Escobar Lara con documento de identificación N°1751994102 y Tania Sofia Imbago Umaquina con documento de identificación N°1726116351, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Proyecto de Investigación que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 20 de febrero del 2026

Atentamente



Ing. Francisco Roberto Ortiz Navas, PhD.

1717631244

DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MEDIANTE RELACIONES VOLUMÉTRICAS EMPLEANDO UN ASFALTO MODIFICADO

DESIGN OF AN ASPHALT MIXTURE USING VOLUMETRIC RELATIONSHIPS AND A MODIFIED ASPHALT

Silvana Escobar-Lara¹, Tania Imbago-Umaquina², Francisco Ortiz-Navas³

Resumen

Este proyecto analiza el desempeño de mezclas asfálticas diseñadas bajo el método Superpave, comparando una mezcla de control con otra modificada mediante un aditivo químico tipo ZycoTherm. La investigación evalúa el comportamiento de ambas mezclas a través de parámetros volumétricos (VTM, VMA y VFA) y de la resistencia mecánica mediante la prueba de tracción indirecta (ITS), tanto en su condición inicial como después del envejecimiento acelerado a corto y largo plazo. El desarrollo experimental incluyó la caracterización física y mecánica de agregados finos y gruesos, la evaluación del ligante asfáltico, el diseño de tres gradaciones Superpave y la selección de la mezcla óptima. Posteriormente, se incorporó el aditivo según las especificaciones técnicas y se elaboraron briquetas mediante compactación giratoria. A estas muestras se les aplicaron ensayos de contenido de ligante por ignición, determinación de densidades y vacíos, y resistencia mecánica. Los resultados muestran que la mezcla modificada mantiene mayor estabilidad volumétrica frente al envejecimiento, presenta menor pérdida de cohesión y alcanza valores superiores de ITS en comparación con la mezcla de control. Esto indica una mejor adhesión ligante-agregado, menor susceptibilidad a

Abstract

This project analyzes the performance of asphalt mixtures designed using the Superpave method, comparing a control mixture with one modified using a ZycoTherm chemical additive. The research evaluates the behavior of both mixtures through volumetric parameters (VTM, VMA, and VFA) and mechanical strength using the indirect tensile strength test (ITS), both in their initial condition and after short- and long-term accelerated aging. The experimental development included the physical and mechanical characterization of fine and coarse aggregates, the evaluation of the asphalt binder, the design of three Superpave gradations, and the selection of the optimal mixture. Subsequently, the additive was incorporated according to technical specifications, and briquettes were produced using rotary compaction. These samples underwent tests for binder content by ignition, determination of densities and voids, and mechanical strength. The results show that the modified mixture maintains greater volumetric stability against aging, exhibits less cohesion loss, and achieves higher ITS values compared to the control mixture. This indicates improved binder-aggregate adhesion, reduced susceptibility to moisture and fatigue, and potentially greater durability under repeated loading conditions.

¹ Estudiante de la Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica Salesiana - Ecuador.

² Estudiante de la Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica Salesiana - Ecuador.

³ Docente de la Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica Salesiana - Ecuador.

Autor para correspondencia: silvana.escobarlara@hotmail.com tanissimbg@hotmail.com

humedad y fatiga, y una durabilidad potencialmente mayor bajo condiciones de carga repetida. Los hallazgos respaldan el uso de asfaltos modificados en vías de alto tránsito en el Ecuador y proporcionan evidencia técnica alineada con la normativa INEN 2280 y las guías AASHTO/ASTM, aportando criterios para futuras mejoras en especificaciones de diseño y optimización de recursos en infraestructura vial.

Palabras Clave: Superpave, VTM, VMA, VFA, ITS, asfalto modificado, envejecimiento acelerado, ZycoTherm.

The findings support the use of modified asphalts in high-traffic roads in Ecuador and provide technical evidence aligned with INEN 2280 standards and AASHTO/ASTM guidelines, contributing criteria for future improvements in design specifications and resource optimization in road infrastructure.

Keywords: Superpave, VTM, VMA, VFA, ITS, modified asphalt, accelerated aging, ZycoTherm.

1. Introducción

Una mezcla asfáltica forma parte de una infraestructura vial moderna (carreteras, calles, aeropuertos y otro tipo de superficie de tránsito) estas permiten soportar las cargas vehiculares y distribuir esfuerzos hacia las distintas capas inferiores. Además, está enfocada en la combinación de flexibilidad y durabilidad.[1] Estudios han determinado que en Ecuador aproximadamente el 95% de las carreteras tienen superficies de asfalto. Su desempeño se analiza mediante métodos empíricos sustentados por ensayos de laboratorio de los cuales dependerán las condiciones específicas teniendo en cuenta sus limitaciones. Se tiene tipos de mezclas asfálticas dependiendo de su temperatura como son las mezclas calientes, mezclas tibias, mezclas frías y mezclas modificadas y su uso depende de su aplicación ya sea para capas de rodadura o mantenimiento. [2]

Las mezclas asfálticas están compuestas por ligantes asfálticos, árido grueso y fino, vacíos de aire y aditivos. Los aditivos se utilizan para obtener un mejor desempeño en las propiedades del material como: resistencia a las deformaciones permanentes, fatiga y humedad. Existen diversos tipos de aditivos para implementar en dichas mezclas dependiendo del uso que se necesite, entre las cuales están: polímeros, materiales reciclados, agentes adhesivos y entre uno de ellos está el Zycotherm.[3] Por lo tanto, el uso de asfaltos modificados y aditivos químicos se ha convertido en una alternativa relevante dentro de la ingeniería vial, debido a que estos materiales pueden mejorar la interacción ligante-agregado y optimizar el comportamiento de la mezcla frente a condiciones exigentes.[2] Además, su aplicación debe realizarse de manera controlada y validarse

mediante ensayos estandarizados, de modo que la mezcla final mantenga parámetros adecuados y se eviten efectos adversos como un exceso de vacíos, pérdida de cohesión o mayor susceptibilidad a humedad.

El Zycotherm se trata de un aditivo químico basado en nanopartículas utilizado en mezclas caliente (HMA) y mezclas tibias (WMA) para obtener una mejora en la adhesión entre el ligante y los agregados [4], [5]. Su formulación se basa en organosilanos a escala nanométrica, que favorecen una interacción química más fuerte entre la superficie del agregado y el asfalto. Estudios previos han utilizado este aditivo en porcentajes de 0.05% - 0.1% - 0.15% - 0.2% y 0.3% de los cuales se han obtenido resultados como: aumento de la viscosidad entre un 10% a 11%, reducción de la penetración entre un 20% a 40%, disminución del ángulo de fase, su módulo de corte entre un 12% a 24%, aumento de la resistencia a la humedad en un 20% y mejora en la resistencia al agrietamiento, el uso de Zycotherm también contribuye a incrementar la vida útil en climas fríos y de tráfico exigentes [25], [26].

Dado este contexto y dentro del marco teórico, el presente trabajo de investigación intenta determinar cuál es el efecto del aditivo Zycotherm en la resistencia a la tracción cuando este es evaluado mediante metodología Superpave para esto se realizaron ensayos en la que con diversas mezclas se obtiene una mezcla óptima y se incorpora Zycotherm para verificar el efecto que causa en la resistencia a la tracción. Con estos resultados, se busca aportar información técnica que ayude a mejorar el diseño de mezclas y fortalecer la durabilidad de los pavimentos en el Ecuador.[6]

2. Materiales y Métodos

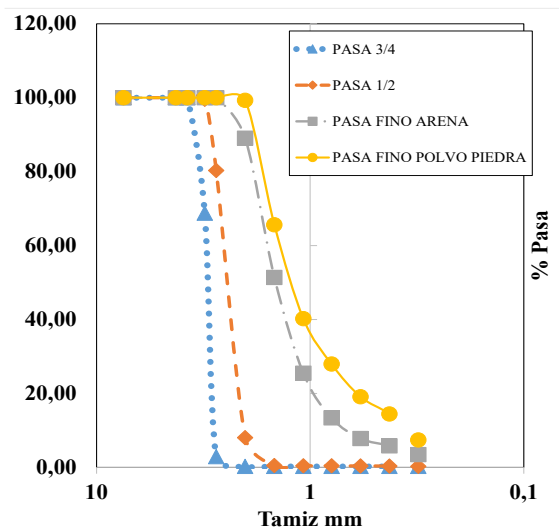
2.1. Materiales utilizados en la campaña experimental.

2.1.1. Materiales Pétreos

Los agregados se obtuvieron de la cantera de Guayllabamba - Pichincha, y corresponden a materiales de tipo ígneo volcánico. Se utilizaron agregados gruesos de ¾" (19 mm) y ½" (12,5 mm), así como arena y polvo de piedra como agregados finos. A cada material se le determinó su granulometría y gravedad específica, propiedades fundamentales para el diseño volumétrico de la mezcla asfáltica mediante la metodología Superpave.

2.1.1.1. Granulometría

La granulometría de los agregados de ¾", ½", arena y polvo de piedra se determinó mediante tamizado conforme a la norma ASTM C136 y NTE INEN 696.[7] Con los resultados obtenidos se construyeron las curvas granulométricas y la curva de la mezcla final A partir de los datos obtenidos, se calculó el porcentaje pasante por cada tamiz y se elaboraron las curvas granulométricas, mostradas en la Figura 1.



propiedades de cohesión, impermeabilidad y trabajabilidad que favorecen su desempeño en la construcción de pavimentos [10], [11].

El cemento asfáltico AC-20 presenta una consistencia semisólida a temperatura ambiente y comportamiento fluido a temperaturas de mezclado entre 130 °C y 170 °C, lo que permite una adecuada distribución del ligante sobre los agregados [10].

Asimismo, se realizó ensayos en el asfalto para determinar sus propiedades tales como fueron, punto de inflamación, penetración, ductilidad, punto de ablandamiento y viscosidad cinemática a 135° cada uno siguiendo su respectiva normativa de la ASTM.

Tabla 2: Resultado de ensayos de asfalto

Ensayos	Resultados	Rango
Penetración	47,7	40-50
Punto de Inflamación	276	232
Punto de Ablandamiento	48	45-51
Ductilidad	114	100
Viscosidad Cinemática a 135°	682	-

Los resultados obtenidos en el ensayo de penetración indican una consistencia adecuada del ligante para su uso en mezclas asfálticas en caliente [12]. En el ensayo de punto de ablandamiento indica un comportamiento adecuado del ligante frente a temperaturas de servicio y una buena estabilidad en la mezcla asfáltica [13]. El resultado de punto de inflamación nos indica que el material posee mayor seguridad térmica durante su almacenamiento, transporte y calentamiento [14]. Para el resultado con ensayo

de ductilidad se evidencia una adecuada ductilidad del ligante para el uso en mezclas asfálticas [15]. Por ultimo los resultados del ensayo de viscosidad cinemática a 60°C Y 135°C obteniendo una adecuada fluidez y consistencia del ligante para su utilización [16]

2.1.3. Aditivo (Zycotherm)

El aditivo Zycotherm es un producto de última generación basado en organosilanos de escala nanométrica, diseñado para mejorar la adherencia entre el ligante asfáltico y los agregados, incrementando la durabilidad de la mezcla asfáltica [17]. Estos compuestos actúan como agentes de enlace químico que modifican la superficie del agregado, haciéndola más compatible con el asfalto y favoreciendo una unión más estable y resistente. Como resultado, se reduce la presencia de aire y se limita la penetración de humedad, lo que disminuye el desprendimiento del ligante y mejora el desempeño del pavimento frente a condiciones ambientales y de tráfico exigentes [18].

Tabla 3: Ficha técnica del aditivo Zycotherm

Propiedad	Valor
Contenido de sólidos	50–70 %
pH	5.5–7.5
Tamaño de partícula	≤ 50 micras
Temperatura de servicio	-20 °C a +60 °C
Solubilidad	Soluble en agua
Vida útil	12 meses

2.2. Diseño de Mezcla Patrón

Para establecer el diseño de una mezcla asfáltica con esta metodología es esencial tener en cuenta varios pasos:

2.2.1. Diseño de Mezcla y Agregados

Para el diseño de la mezcla con metodología Superpave se realizó la granulometría de los 4 materiales a utilizar con los puntos de control del material 1/2 [19].

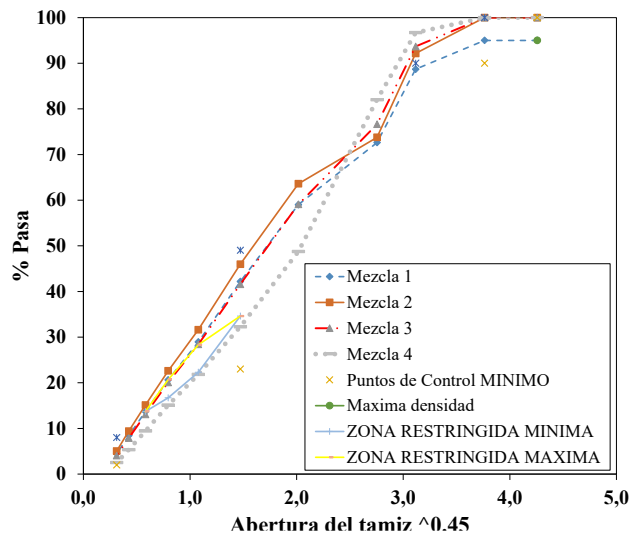


Figura 2. Curvas de cada mezcla a ensayar.

La figura 2 muestra las 4 mezclas con porcentajes diferentes de agregados para determinar la más adecuada que será ensayada.

Se determino los porcentajes iniciales mediante expresión empírica donde se relaciona el porcentaje de ligante con la superficie específica de los agregados y el coeficiente asociado al nivel del tráfico. Para ello, como primer paso se calcula la superficie específica (S) con la granulometría de cada mezcla determinando los valores de G comprendido a material mayor a 3/8", g material entre 3/8" a #4, A material de #4 a #50, a porcentaje de material de #50 a #200 y f material menor a #200.

$$S = 0.17G + 0.33g + 2.30A + 12a + 135f \quad (1)$$

Obtenido el valor de S y determinado M de 4 como tráfico medio se puede determinar el porcentaje de asfalto para cada mezcla.

$$P = M * S^{\frac{1}{5}} \quad (2)$$

Se obtuvo como porcentajes teóricos de asfalto para cada mezcla los siguientes valores en orden: 5.92%, 5.88%, 5.77% y 5.74%. Estos se colocaron para briquetas de 4100g de agregado [19].

2.2.1.1. Análisis Granulométrico y Curva de Diseño

Para determinar los valores del ensayo Bulk, RICE y porcentaje de vacíos de cada briketa se debe realizar varios cálculos según la ASTM D-1188, ASTM C127 [20]. Estos permiten determinar el porcentaje óptimo de mezcla. Primero se calcula la gravedad específica Bulk.

$$Gsb = \frac{P1 + P2 + \dots + PN}{\frac{P1}{G1} + \frac{P2}{G2} + \frac{PN}{GN}} \quad (3)$$

También se calcula gravedad específica efectiva del agregado (Gse) mediante la gravedad específica máxima (Gmm), porcentaje por masas de la mezcla total suelta (Pmm), contenido de asfalto en el cual se realizó la prueba (Pb) y gravedad específica del asfalto (Gb) [21].

$$Gse = \frac{Pmm - Pb}{\frac{Pmm}{Gmm} - \frac{Pb}{Gb}} \quad (4)$$

Además, se determinó la gravedad específica máxima de la mezcla sin vacíos de aires (Gmm) mediante (Pmm), contenido de agregado (Ps), contenido de asfalto (Pb), gravedad específica efectiva del agregado (Gse) y gravedad específica del asfalto (Gb)

$$Gmm = \frac{Pmm}{\frac{Ps - Pb}{Gse + Gb}} \quad (5)$$

Se obtiene la absorción de asfalto (Pba) mediante, gravedad específica del agregado (Gse), gravedad específica volumétrica del agregado (Gsb), gravedad específica del asfalto (Gb).

$$Pba = 100 * \frac{Gse - Gsb}{Gsb * Gse} * Gb \quad (6)$$

El contenido de asfalto efectivo (Pbe) se obtuvo mediante, contenido de asfalto (Pb), asfalto absorbido (Pba) y contenido de agregado (Ps).

$$Pbe = Pb - \frac{Pba}{100} * Ps \quad (7)$$

El porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA) se calcula mediante, Gsb, Gmb y Ps.

$$VMA\% = \left(100 - \frac{Gmb * Ps}{Gsb}\right) \quad (8)$$

Se determino el porcentaje de vacíos de aire en la mezcla compactada con los valores de Gmm y Gmb

$$Va = 100 * \frac{Gmm - Gmb}{Gmm} \quad (9)$$

Se obtiene el porcentaje de vacíos llenos con asfalto del VMA utilizando los datos de VMA Y Va.

$$VFA\% = 100 * \left(\frac{VMA - Va}{VMA}\right) \quad (10)$$

Los datos obtenidos previamente de los distintos ensayos, permitió determinar que la mezcla optima es la numero 1, esta fue seleccionada porque posee menor porcentaje de vacíos, lo que favorece en la mezcla.

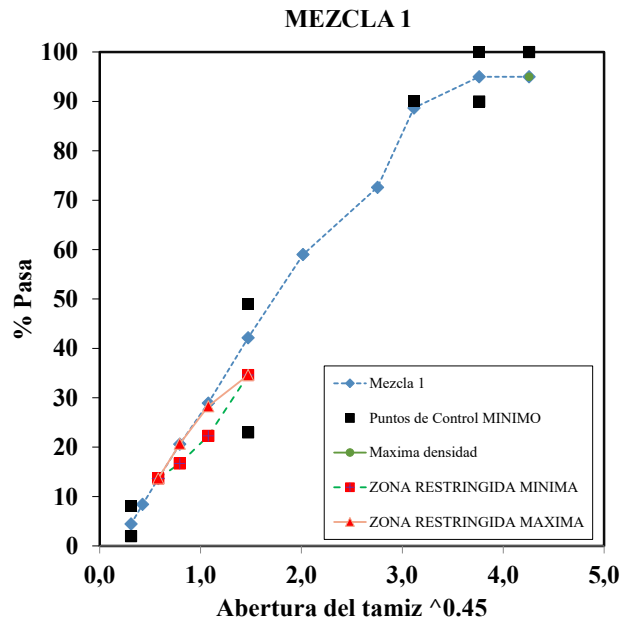


Figura 3. Curva granulométrica mezcla 1.

La gráfica muestra cómo la distribución del tamaño de las partículas del agregado en la mezcla 1. Cada punto indica cuánto material pasa por cada tamiz.

La comparamos con los límites Superpave y la zona restringida para ver si cumple con la norma. Las curvas se mantienen dentro de los rangos permitidos, por lo que la gradación es adecuada. Esto significa que la mezcla tendrá buen comportamiento en pavimento y no debería presentar fallas prematuras [19].

(%) Vacíos en la mezcla total (Vv) vs (% Asfalto)

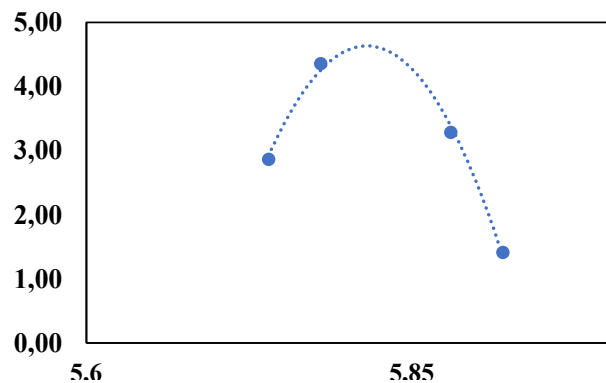


Figura 4. Curva de mezcla de vacíos vs % Asfalto

% Volumen de agregado Mineral (VAM) vs (%)Asfalto

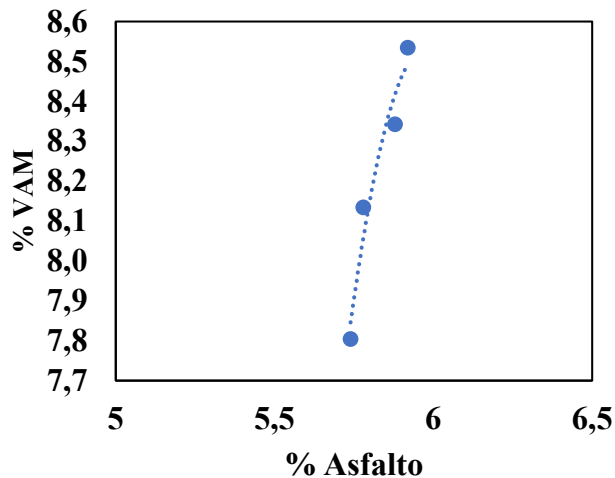


Figura 5. Curva de agregado mineral vs % Asfalto

(%) Vacíos llenos con Asfalto VFA vs (%) Asfalto

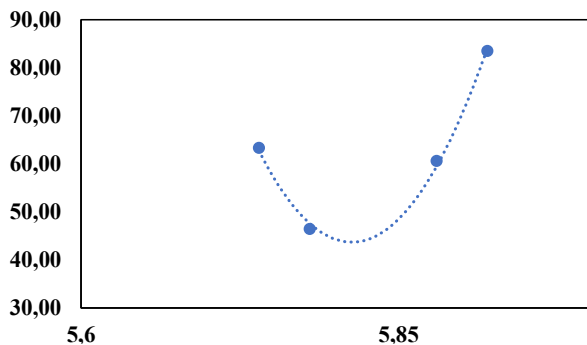


Figura 6. Curva de VFA vs % Asfalto

Densidad Gmb vs (%) Asfalto.

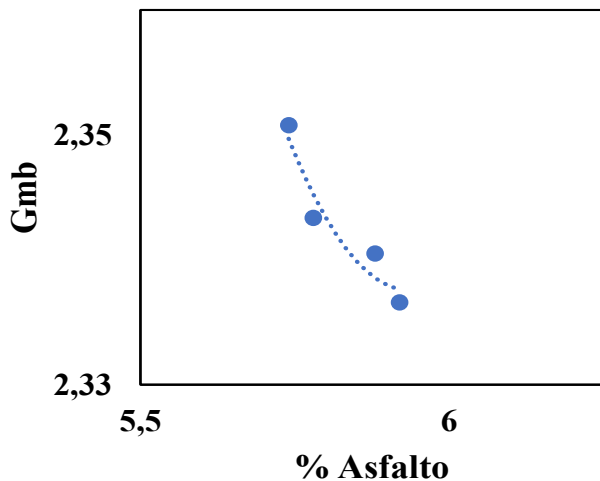


Figura 7. Curva de Gmb vs % Asfalto

También se realizó el ensayo de resistencia a la tracción de cada briqueta pen estado húmedo y seco, con ellos podemos determinar el comportamiento que tiene la mezcla en estimación de lluvias [19].

Tabla 4: Resultado de tracción indirecta en briquetas secas.

SECO				
Briqueta 5.74%				
Carga=	12,464	12464	N	
Diámetro=	15,01	150,1	Mm	ITS1= 0,4023
Altura=	13,14	131,4	Mm	
Briqueta 5.77%				
Carga=	12,635	12635	N	
Diámetro=	14,98	149,8	Mm	ITS2= 0,4137
Altura=	12,98	129,8	Mm	
Briqueta 5.88%				
Carga=	12,803	12803	N	
Diámetro=	14,97	149,7	Mm	ITS3= 0,4195
Altura=	12,98	129,8	Mm	
Briqueta 5.92%				
Carga=	13,254	13254	N	
Diámetro=	14,96	149,6	Mm	ITS4= 0,4382
Altura=	12,87	128,7	Mm	

Tabla 5: Resultado de tracción indirecta en briquetas húmedas.

HÚMEDO				
Briqueta 5.74%				
Carga=	9,423	9423	N	
Diámetro=	14,98	149,8	mm	ITS1= 0,3043
Altura=	13,16	131,6	mm	
Briqueta 5.77%				
Carga=	9,708	9708	N	
Diámetro=	14,98	149,8	mm	ITS2= 0,3183
Altura=	12,96	129,6	mm	

Briqueta 5.88%

Carga= 9,902 9902 N
Diámetro= 14,97 149,7 mm ITS3= 0,3244
Altura= 12,98 129,8 mm

Briqueta 5.92%

Carga= 10,729 10729 N
Diámetro= 14,96 149,6 mm ITS4= 0,3548
Altura= 12,87 128,7 mm

La mezcla asfáltica presentó una resistencia a la tracción indirecta ITS seco fue de 0.418 MPa y un ITS húmedo de 0.325 MPa, obteniendo así un índice de resistencia a la tracción indirecta ITSR de 77.8%, lo que indica un valor inferior al mínimo de 80%. Esto evidencia que la mezcla posee una susceptibilidad al daño por humedad y necesita una incorporación de aditivo para mejorar la adhesión [22].

Tabla 6: Resultados de vacíos y rice

% Asfalto	Bulk	RICE	Vv (%)
5,74	2,35	2,42	2,86
5,78	2,34	2,45	4,35
5,88	2,34	2,42	3,29
5,92	2,34	2,37	1,41

En la tabla 6 se presenta los datos de vacíos, RICE y Bulk obtenidos de cada mezcla, con la que se puede decir que el mejor resultado se obtuvo con la mezcla 1.

2.4.5 Selección del contenido óptimo teórico de asfalto

Analizando los resultados obtenidos se pudo seleccionar que los mejores resultados se obtuvieron con el porcentaje de 5.92% comprendidos a un menor valor de vacíos, mayor resistencia de tracción en estado húmedo y seco.[19]

Obteniendo el porcentaje teórico de asfalto se toma este valor como base y se le agregará +0.5, +1 y -0.5 para determinar la mezcla control que será clave al incorporar el aditivo.[19]. se procede a realizar nuevamente los ensayos de los cuales se escoge al mejor para incrementar aditivo Zycotherm y determinar la mejoría que genere en ella.[19]

Tabla 7: Porcentaje de diseño para el ligante de asfalto.

Contenido de ligante	-0,5	5,42
	0,5	6,42
	1	6,92

3. Resultado y Discusiones

3.1. Resultados y Selección de la Mezcla Control

Tabla 8: Resultado de tracción indirecta mezcla control.

HÚMEDO			
Briqueta 5.42%			
Carga=	8,852	8852	N
Diámetro=	14,96	149,6	mm ITS1= 0,2865
Altura=	13,15	131,5	mm
Briqueta 6.42%			
Carga=	10,858	9858	N
Diámetro=	14,98	149,8	mm ITS2= 0,3228
Altura=	12,98	129,8	mm
Briqueta 6.92%			
Carga=	10,964	10964	N
Diámetro=	14,96	149,6	mm ITS3= 0,3597
Altura=	12,97	129,7	mm

Tabla 9: Resultado de tracción indirecta mezcla control seca.

SECO			
Briqueta 5.42%			
Carga=	11,284	11284	N
Diámetro=	14,98	149,8	mm TS1= 0,3647
Altura=	13,15	131,5	mm

Briqueta 6.42%

Carga= 13,295 13295 N
 Diámetro= 14,98 149,8 mm TS2= 0,4346
 Altura= 12,98 129,8 mm

Briqueta 6.92%

Carga= 13,302 13302 N
 Diámetro= 14,97 149,7 mm TS3= 0,4358
 Altura= 12,98 129,8 mm

Con los datos obtenidos anteriormente se determina que la resistencia a tracción húmeda ITS fue de 0.341MPa y en seco 0.435MPa con lo cual la mezcla control será de 6.42% teniendo un valor de 78.4% el cual no llega al valor mínimo establecido. A esto se le incorpora aditivo Zycotherm con dosificación de 0.10% de la mezcla de asfalto, siguiendo las especificaciones técnicas del fabricante ya que este es un porcentaje común [17], [18]. La mezcla control posee 4100g de agregados, 281.28g de asfalto y 0.28g de Zycotherm.

Para determinar el porcentaje óptimo al cual se le adiciona el aditivo Zycotherm se le vuelve a realizar los ensayos de vacíos, Bulk y RICE el que tenga mejores propiedades será nuestra mezcla control [23].

Tabla 10: Resultado de la mezcla

% Asfalto	Bulk	RICE	%V _v
5,42%	2,33	2,42	3,77
6,42%	2,35	2,45	4,08
6,92%	2,26	2,37	4,42

Una vez realizado los ensayos de Bulk, RICE y vacíos a nuestro porcentaje teórico podemos analizar los resultados y determinar que el porcentaje óptimo es de 6.42% para lo cual se le agrega Zycotherm de acuerdo lo especificado por el fabricante.[19]

(%) Vacíos en la mezcla total (V_v) vs (%) Asfalto

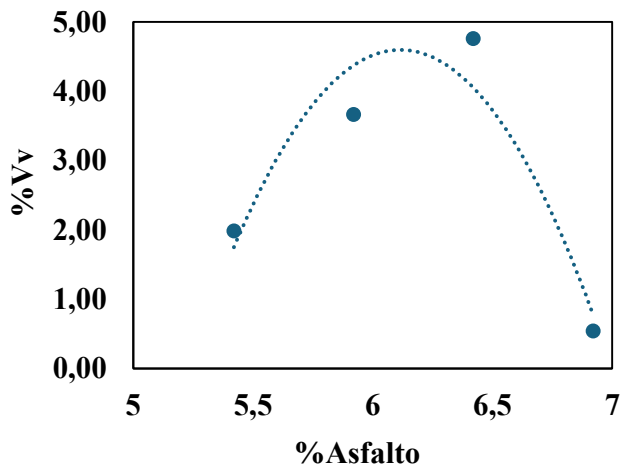


Figura 8. Curva de mezcla de vacíos vs % Asfalto

% Volumen de agregado Mineral (VMA) vs (%)Asfalto

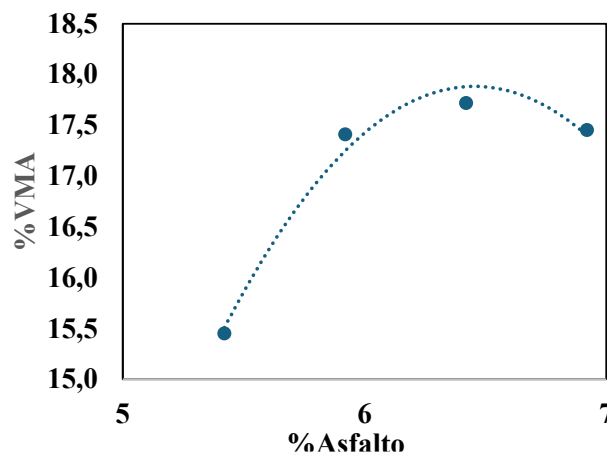


Figura 9. Curva de agregado mineral vs % Asfalto

(%) Vacíos llenos con Asfalto VFA vs (%) Asfalto

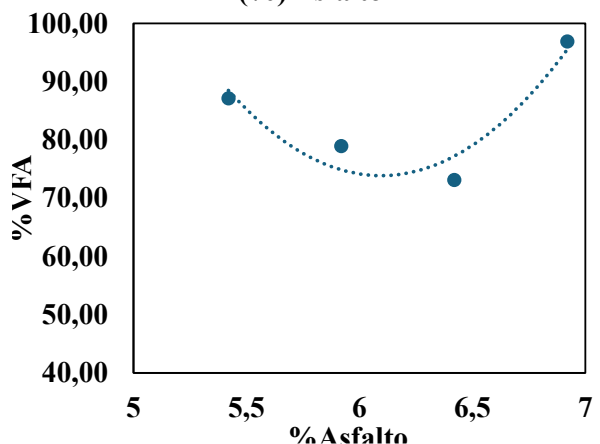


Figura 10. Curva de VFA vs % Asfalto

Tabla 12: Resultado de tracción indirecta incluido aditivo.

HÚMEDO			
Briqueta 1			
Carga=	12,858	12858	N
Diámetro=	14,6	146	mm ITS1= 0,4319
Altura=	12,98	129,8	mm
Briqueta 2			
Carga=	12,86	12860	N
Diámetro=	14,97	149,7	mm ITS2= 0,4213
Altura=	12,98	129,8	mm

Tabla 13: Resultado de tracción indirecta seco incluido aditivo.

SECO			
Briqueta 1			
Carga=	15,295	15295	N
Diámetro=	14,98	149,8	mm ITS1= 0,5000
Altura=	13	130	mm
Briqueta 2			
Carga=	15,302	15302	N
Diámetro=	14,97	149,7	mm ITS2= 0,5013
Altura=	12,98	129,8	mm

Densidad Gmb vs (%) Asfalto.

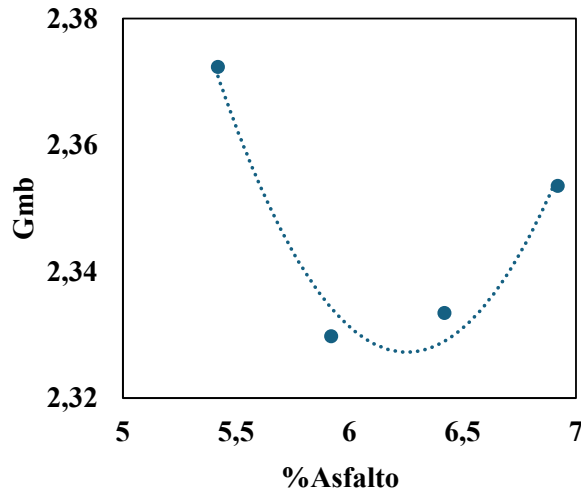


Figura 11. Curva de Gmb vs % Asfalto

3.2 Efecto del Zycotherm en la mezcla en resistencia a tracción

Para determinar la incidencia del Zycotherm en la mezcla asfáltica y obtener resultados de resistencia a tracción se elabora 2 briquetas las cuales estarán en condiciones húmedas y secas. Estas se ensayan con carga y obtener el índice de resistencia a tracción comparando el porcentaje de 80% mínimo según normativa. Además, obtener resultados de vacíos.[19]

Para ello las gráficas mostradas a continuación representas los vacíos que se encontró en la mezcla. Interpretando los resultados dio una disminución de vacíos en la mezcla.

Tabla 11: Propiedades volumétricas de la mezcla con Zycotherm

% Asfalto	Bulk	Rice	Vv (%)
6.42%	2,36	2,45	3.67

Se muestra los resultados obtenidos de los ensayos a tracción para briquetas húmedas obtenido un ITS húmedo de 0.427MPa y briquetas secas un ITS seco de 0.501MPa incorporado aditivo, en la cual su índice de resistencia a la tracción fue de 85.2%, se observa una notable mejoría.



Figura 12. Comparación de ITSR, %Vv, Rice y Bulk.

Con la inclusión del aditivo Zycotherm, el Índice de resistencia a la tracción indirecta por humedad (ITSR) aumento a 85.2 %, superando el

criterio normativo. Este incremento reafirma que el Zycotherm mejora la adhesión entre agregado y ligante, disminuye efectos desfavorables de la humedad y aumenta la durabilidad y su desempeño.

4. Conclusiones

El diseño de la mezcla asfáltica mediante la metodología Superpave permitió obtener una gradación adecuada y un contenido óptimo de asfalto de 5.92 %, valor que garantizó el cumplimiento de los parámetros volumétricos establecidos, logrando un equilibrio entre estabilidad y durabilidad de la mezcla.

La mezcla de control, evaluada sin aditivo, presentó una disminución significativa de la resistencia a tracción indirecta al pasar de condición seca a condición húmeda, obteniéndose un ITSR de 77.8 %, valor inferior al mínimo recomendado. Este resultado evidenció la susceptibilidad de la mezcla al daño por humedad, lo cual puede afectar negativamente su desempeño en servicio.

La incorporación del aditivo Zycotherm, mediante el método de vía húmeda, permitió mejorar el comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica, incrementando tanto el ITS seco como el ITS húmedo, lo que refleja una mayor resistencia estructural del material.

La mezcla modificada con Zycotherm alcanzó un ITSR de 83.3 %, superando el valor mínimo exigido del 80 %, lo que demuestra una mejor adhesión entre el ligante y los agregados y una menor pérdida de resistencia frente a la presencia de humedad. Se concluye que el uso del Zycotherm resulta viable y se recomienda para mejorar el daño por humedad.

Referencias

- [1] F. A. Reyes, M. F. Madrid, and S. X. Salas, “Mezclas asfálticas,” 9, vol. 17, 2007.
- [2] F. L. Roberts, L. N. Mohammad, and W. L.B., “History of Hot Mix Asphalt Mixture Design in the United States,” *Perspectives in Civil Engineering: Commemorating the 150th Anniversary of the American Society of Civil Engineers*, 2003.
- [3] E. H. Nasr, A. Sukkari, G. G. Al-Khateeb, W. Zeiada, M. W. Alani, and H. Ezzat, “Effect of Zycotherm Nano-Based Warm Mix Additive on the Properties of Asphalt Binders in the UAE,” in *Materials Science Forum*, vol. 1142, Trans Tech Publications Ltd, 2024, pp. 117–126.
- [4] M. Singh, K. Jain, S. K. Singh, and S. S. Kahlon, “Assessment of asphalt binder and mixes modified with Zycotherm and Sulphur,” *Mater. Today Proc.*, vol. 49, pp. 2217–2224, 2021.
- [5] B. S. Kumar, P. G. Kumar, R. C. Sekhar, and S. Koch, “Enhancing Pavement Performance and Environmental Sustainability: An Evaluation of Warm Mix Asphalt Using Zycotherm SP,” *Lecture Notes in Civil Engineering*, vol. 621, pp. 237–252, 2025.
- [6] A. Eltwati *et al.*, “Effect of Warm Mix Asphalt (WMA) Antistripping Agent on Performance of Waste Engine Oil-Rejuvenated Asphalt Binders and Mixtures,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 15, no. 4, Feb. 2023.
- [7] Ecuador and P. Edición, “INEN 696 ÁRIDOS. ANÁLISIS GRANULOMETRICO EN LOS ÁRIDOS, FINO Y GRUESO” INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN NORMA TÉCNICA ECUATORIANA, 2011

- [8] Ecuador and P. Edición, “*INEN 857 ÁRIDOS. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA (GRAVEDAD ESPECÍFICA) Y ABSORCIÓN DEL ÁRIDO GRUESO.*” INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN NORMA TÉCNICA ECUATORIANA. 19, Oct. 2010
- [9] Ecuador, P. Revisión, and P. Edición, “*INEN 860: ÁRIDOS. DETERMINACIÓN DEL VALOR DE LA DEGRADACIÓN DEL ÁRIDO GRUESO MEDIANTE MÁQUINA DE LOS ÁNGELES.*” INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE. 2011
- [10] M. H. Hao and P. W. Hao, “Research on optimization of aggregate gradation design for AC-20 asphalt mixture in airport pavement,” *Wuhan Ligong Daxue Xuebao/Journal of Wuhan University of Technology*, vol. 32, no. 18, pp. 58–62, Sep. 2010.
- [11] M. Hu, L. Li, J. Wang, and K. Yang, “Experimental Study on Pavement Performance and Leaching Characteristic of Asphalt Mixture with Bottom Ash Aggregate[炉渣沥青混合料路用性能与浸出特性试验研究],” *Jianzhu Cailiao Xuebao/Journal of Building Materials*, vol. 22, no. 3, pp. 480–486, Jun. 2019.
- [12] American Society for Testing and Materials, West Conshohocken “*ASTM D5/D5M: Standard Test method for Penetration of Bituminous Materials.*” West Conshohocken (USA)., 2020.
- [13] American Society for Testing and Materials “*ASTM D36/D36M-09 Standard Test Method for Softening Point of Bitumen.*” West Conshohocken (USA).,2020
- [14] American Society for Testing and Materials “*Método ASTM D92 Determinación de Puntos de Inflamación y Fuego*”., West Conshohocken (USA)., 2020
- [15] American Society for Testing and Materials “*ASTM D113 Standard Test Method for Ductility of Bituminous Mterials.*” West Conshohocken (USA).,2017
- [16] American Society for Testing and Materials “*ASTM-D2170 - Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Asphalts.*” West Conshohocken (USA)., 2020
- [17] Zydex Industries “*Ficha Técnica Zycotherm.*” OPTIMASOIL, 2020
- [18] Bitumenchem AS, “*Anti-stripping agents improve adhesion between asphalt and stone.*” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 12. 4, Feb 25. 2023
- [19] T. Chile and C. Pacheco “*Manual de laboratorio para el diseño de mezclas asfálticas en caliente mediante el método SUPERPAVE para el laboratorio de pavimentos de la Universidad Politécnica Salesiana*”, Trabajo de titulación, Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador Sede QUITO Carrera de Ingeniería Civil 2025.
- [20] American Society for Testing and Materials “*ASTM D1188 - D1188M-22 Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Compacted*

Bituminous Mixtures Using Coated Samples.” *West Conshohocken (USA)*., 2017

- [21] American Society for Testing and Materials “ASTM D2041 Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures.” *West Conshohocken (USA)*., 2019
- [22] G. G. Al-Khateeb, A. Sukkari, H. Ezzat, E. Nasr, and W. Zeiada, “Reología de la mezcla asfáltica tibia modificada con caucho granulado (WMA),” *Polymers (Basel)*., vol. 16, no. 7, Apr. 2024.
- [23] State Highway and Transportation Officials “AASHTO T 283 Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures.” *West Conshohocken* Feb. 2003