



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

**Análisis de susceptibilidad a la humedad de mezcla
asfáltica fría con pavimento recuperado (RAP) y
rejuvenecedor comercial mediante índice TSR**

Memoria de Título presentada por

Cristian Alejandro Navarrete Guzmán

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniero Civil

Profesor Guía
Rodrigo Delgadillo Sturla

2025-09-12



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): Memoria o trabajo de título; Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: Análisis de susceptibilidad a la humedad de mezcla asfáltica fría con pavimento recuperado (RAP) y rejuvenecedor comercial mediante índice TSR

Nombre del candidato(a): Cristian Alejandro Navarrete Guzmán

Carrera / Grado: Ingeniería Civil

Campus: Casa Central Valparaíso ; **Departamento:** Obras Civiles

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Rodrigo Delgadillo Sturla, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

6 meses; 12 meses; 2 años; 3 años; 5 años; 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 29-08-2025 ; **Firma:** 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 29-08-2025 ; **Firma:** 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi familia, quienes durante estos seis años de formación académica me entregaron su apoyo incondicional. De manera muy especial, a mi madre, por preocuparse siempre de brindarme todas las herramientas necesarias y el espacio adecuado para que pudiera dedicarme plenamente a mis estudios.

Extiendo mis agradecimientos al profesor Rodrigo Delgadillo Sturla, por darme la oportunidad de integrarme a su equipo de investigación, en donde aprendí enormemente y recibí el apoyo constante por parte del equipo, el profesor y personal de LEMCO, que me motivó a seguir avanzando en el desarrollo de esta memoria.

Finalmente, expreso mi sincera gratitud a las empresas que colaboraron con la donación de los materiales necesarios para llevar a cabo esta investigación: Bitumix S.A., por la provisión del material RAP; Productos Bituminosos S.A. Probisa, por la emulsión asfáltica; y Química Rhenium S.A., por la entrega del líquido rejuvenecedor. Gracias a su apoyo fue posible realizar este trabajo.

Resumen

Esta investigación evalúa el desempeño de mezclas asfálticas frías compuestas por un 100 % de pavimento asfáltico recuperado (RAP) y diferentes dosificaciones de un líquido rejuvenecedor. Se ensayaron tres proporciones del aditivo (9 %, 15 % y 21 %), las cuales fueron comparadas con una mezcla base sin rejuvenecedor. El diseño de mezcla y el proceso de curado se basaron en investigaciones previas. Se consideró al RAP como árido negro y se asumió que el volumen de rejuvenecedor forma parte del contenido de agua durante el mezclado. Se utilizó ensayo de resistencia a la tracción indirecta (TSR) en condiciones secas y saturadas, con el fin de determinar la susceptibilidad a la humedad, en el cual se incorporó una modificación en el procedimiento de acondicionamiento basada en recomendaciones para mezclas frías. Los resultados muestran que el líquido rejuvenecedor mejora notablemente la resistencia a la humedad de las mezclas, alcanzando un valor de TSR cercano al 100 %. Sin embargo, su uso en altas proporciones disminuye significativamente las resistencias mecánicas, comprometiendo la durabilidad del material. Por ello, se recomienda evaluar dosis más bajas y considerar la inclusión de áridos vírgenes que permitan equilibrar la ganancia en adherencia con la pérdida de rigidez asociada al reblandecimiento del ligante.

Abstract

This research evaluates the performance of cold asphalt mixtures composed entirely (100 %) of reclaimed asphalt pavement (RAP) incorporating different dosages of a liquid rejuvenator. Three additive proportions (9 %, 15 %, and 21 %) were tested and compared against a reference mix without rejuvenator. The mix design and curing process were based on previous studies, while modifications were introduced to the conditioning procedure according to recommendations for cold mix asphalt. The RAP was treated as a black aggregate, and the rejuvenator volume was considered part of the mixing water. The indirect tensile strength (TSR) test was conducted under dry and saturated conditions to assess the mixture's moisture susceptibility. Results indicate that the rejuvenator significantly enhances the mixture's moisture resistance, with TSR values approaching 100 %. However, higher rejuvenator dosages led to a marked reduction in mechanical strength, potentially compromising the material's durability. Therefore, it is recommended to explore lower rejuvenator contents and consider the inclusion of virgin aggregates to balance the improved adhesion with the loss of stiffness associated with the softened aged binder.

Índice general

Agradecimientos	I
Resumen	II
Abstract	III
Índice general	IV
Índice de figuras	VI
Índice de tablas	VIII
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes Generales	1
1.2. Objetivos del Estudio	2
1.2.1. Objetivo General	2
1.2.2. Objetivos Específicos	3
1.3. Alcance del Estudio	3
2. Marco Teórico	5
2.1. Mezcla Asfáltica Frias	5
2.1.1. Emulsión	6
2.1.2. Agregados	7
2.1.3. Diseño	10
2.2. Daño por humedad	12
2.2.1. Mitigación del daño por humedad	13
2.2.2. Evaluación de la susceptibilidad	13
2.3. Reclaimed Asphalt Pavement	14
2.4. Propiedades del ligante asfáltico y su evolución	15
2.4.1. Composición química del asfalto	15

2.4.2. Mecanismo de envejecimiento	17
2.4.3. Rejuvenecedores	18
3. Metodología	20
3.1. Metodología y Estudio Experimental	20
3.2. Instrumentos y Equipos	21
3.3. Selección de Materiales	27
3.4. Selección de Agregados	27
3.5. Selección de Emulsión	30
3.6. Selección de rejuvenecedor	32
3.7. Confección de la mezcla	33
3.8. Propiedades Volumétricas	37
3.8.1. Densidad Máxima de la mezcla sin compactar	37
3.8.2. Densidad real de la mezcla compactada	38
3.9. Procedimiento del Ensayo de Tracción Indirecta (TSR)	39
4. Resultados	43
4.1. Caso de Control: Mezcla sin Rejuvenecedor	44
4.1.1. Índice TSR	45
4.2. Mezcla con 9% de Líquido Rejuvenecedor	46
4.2.1. Densidad Máxima teórica	47
4.2.2. Densidad real compactada	48
4.2.3. Índice TSR	48
4.3. Mezcla con 15% de Líquido Rejuvenecedor	49
4.3.1. Densidad Maxima teorica	50
4.3.2. Densidad real compactada	51
4.3.3. Índice TSR	51
4.4. Mezcla con 21% de Líquido Rejuvenecedor	53
4.4.1. Densidad Máxima teórica	54
4.4.2. Densidad real compactada	54
4.4.3. Índice TSR	55
4.5. Análisis de Resultados	56
5. Conclusión	59
Bibliografía	61

Índice de figuras

2.1. Ilustración de cargas en gotas de asfalto. Fuente: Elaboración Propia.	6
2.2. Principio del ensayo Indirect tensile strength. Fuente: [18]	14
2.3. Representación esquemática de las estructuras coloidales en ligantes asfálticos. Fuente: [38]	17
2.4. Cambios en la composición del ligante durante mezclado, colocación y servicio. Fuente: [38]	18
3.1. Diagrama de Flujo de la investigación. Fuente: Elaboración Propia	20
3.2. Compactador Giratorio utilizado. Fuente: Elaboración Propia	21
3.3. Moldes de acero. Fuente: Elaboración Propia	22
3.4. Horno de laboratorio. Fuente: Elaboración Propia	23
3.5. Bomba de vacío. Fuente: Elaboración Propia	24
3.6. Prensa Marshall. Fuente: Elaboración Propia	25
3.7. Balanza adaptada para medir probetas sumergidas. Fuente: Elaboración Propia	26
3.8. Uno de los baños de agua utilizados. Fuente: Elaboración Propia	26
3.9. Gráfico de límites banda IV-A-12. Fuente: Elaboración Propia.	28
3.10. Granulometría acopio RAP. Fuente: Elaboración Propia	28
3.11. Granulometría objetivo. Fuente: Elaboración Propia	28
3.12. RAP seco antes de ser tamizado. Fuente: Elaboración Propia	29
3.13. Emulsión asfáltica antes de ser utilizada. Fuente: Elaboración Propia.	31
3.14. Hoja de seguridad adherida al barril de rejuvenecedor. Fuente: Elaboración Propia	33
3.15. Líquido evacuado durante la compactación. Fuente: Elaboración Propia	34
3.16. Líquido rejuvenecedor calentado a baño maría. Fuente: Elaboración Propia	35
3.17. Espray utilizado para aplicar el rejuvenecedor. Fuente: Elaboración Propia	35
3.18. RAP con cierta cohesión luego de ser mezclado con 21 % de rejuvenecedor. Fuente: Elaboración Propia	36
3.19. Agregado mezclado con agua y emulsión. Fuente: Elaboración Propia	37
3.20. Probeta siendo desmoldada. Fuente: Elaboración Propia	37

3.21. Implementos utilizados para medir la densidad máxima teórica. Fuente: Elaboración Propia	38
3.22. Mezcla en matraz con el volumen de aire extraído. Fuente: Elaboración Propia	38
3.23. Probetas medidas y listas para ensayo. Fuente: Elaboración Propia.	40
3.24. Instrumento utilizado para la medición. Fuente: Elaboración Propia.	40
3.25. Cámara de vacío utilizada para el proceso de saturación. Fuente: Elabora- ción Propia.	41
3.26. Probetas acondicionadas en baño de agua. Fuente: Elaboración Propia.	41
4.1. Gráfica resumen de los resultados de TSR con error estándar. Fuente: Propia	57

Índice de tablas

2.1. Requisitos y ensayos asociados a las características de los agregados. Fuente: [35]	9
2.2. Clasificación de gradaciones de agregados y sus características. Fuente: Elaboración Propia	10
3.1. Ensayos RAP. Fuente: [32]	27
3.2. Límites granulométricos banda IV-A-12: Fuente: Manual de Carreteras, Volumen 5	28
3.3. Resultados del ensayo de extracción de ligante. Fuente: [32]	30
3.4. Resultados del análisis de emulsión asfáltica. Fuente: [32]	32
4.1. Distribución de agregados para mezcla con solamente RAP. Fuente: Elaboración Propia	44
4.2. Cálculo de densidad real y vacíos de aire para mezcla sin rejuvenecedor. Fuente: Elaboración Propia	44
4.3. Resumen de resultados del ensayo TSR para mezcla con 0% de rejuvenecedor Fuente: Elaboración Propia	46
4.4. Distribución de agregados para mezcla con 9% de líquido rejuvenecedor Fuente: Elaboración Propia.	47
4.5. Densidad máxima teórica de mezcla suelta Fuente: Elaboración Propia.	47
4.6. Cálculo de densidad real y vacíos de aire para mezcla con 9% de rejuvenecedor. Fuente: Elaboración Propia.	48
4.7. Resumen de resultados del ensayo TSR para mezcla con 9% de rejuvenecedor. Fuente: Elaboración Propia	49
4.8. Distribución de agregados para mezcla con 15% de líquido rejuvenecedor. Fuente: Elaboración Propia	50
4.9. Densidad máxima teórica de mezcla suelta para mezcla con 15% de líquido rejuvenecedor. Fuente: Elaboración Propia.	51
4.10. Cálculo de densidad real y vacíos de aire para mezcla con 15% de rejuvenecedor. Fuente: Elaboración Propia	51

4.11. Resumen de resultados del ensayo TSR para mezcla con 15 % de rejuvenecedor. Fuente: Elaboración Propia	52
4.12. Distribución de agregados para mezcla con 21 % de líquido rejuvenecedor. Fuente: Elaboración Propia	53
4.13. Densidad máxima teórica de mezcla suelta para mezcla con 21 % de líquido rejuvenecedor. Fuente: Elaboración Propia	54
4.14. Cálculo de densidad real y vacíos de aire para mezcla con 21 % de rejuvenecedor. Fuente: Elaboración Propia	55
4.15. Resumen de resultados del ensayo TSR para mezcla con 21 % de rejuvenecedor. Fuente: Elaboración Propia	56

1 | Introducción

1.1. Antecedentes Generales

La red vial nacional pavimentada de Chile ha experimentado un crecimiento sostenido a lo largo de los años. No obstante, una proporción significativa de sus caminos aún se compone de ripio (36%), tierra (15%) o materiales diversos, mientras que solo un 21% corresponde a superficies con mezclas asfálticas, lo que evidencia la existencia de una vasta cantidad de kilómetros pendientes de pavimentación. Dentro de las vías ya pavimentadas, el asfalto constituye el principal material utilizado [30]. A esto se suma la falta de datos estadísticos sobre la red vial urbana, donde se observa que gran parte de estas vías también están compuestas por carpetas asfálticas. En conjunto, estos antecedentes reflejan tanto la eficacia y uso extendido del asfalto, además del desafío pendiente en materia de pavimentación.

Sin embargo, el desarrollo y la aplicación de mezclas asfálticas tradicionales, especialmente las mezclas en caliente, han implicado un alto consumo energético y de recursos, además de generar emisiones contaminantes que contribuyen a la huella de carbono y al calentamiento global [24]. En este contexto, resulta fundamental explorar alternativas que, sin comprometer el desempeño, sean ambientalmente más sostenibles, económicamente viables y eficientes para abordar la gran cantidad de caminos aún no pavimentados en el país.

Las mezclas asfálticas en frío (Cold Mix Asphalt, CMA) se presentan como una alternativa en esta línea. Estas se elaboran a partir de la combinación de un agente emulsificante, agua y agregados, sin requerir elevadas temperaturas, lo que permite una reducción considerable en el consumo energético. No obstante, las CMA presentan ciertas limitaciones técnicas, como menor resistencia mecánica en su vida temprana, mayor contenido de vacíos, mayor susceptibilidad a la humedad y dificultad en el proceso de compactación. Además de una variada cantidad de procedimientos de diseños que no han sido acordados universalmente que afectan al momento de asegurar desempeños óptimos. [39].

Numerosas investigaciones han buscado optimizar el rendimiento de las CMA mediante

ajustes en el diseño de mezcla y la incorporación de aditivos [37], destacando especialmente el uso de materiales reutilizados. Entre ellos, el Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) ha cobrado relevancia debido a su disponibilidad y potencial reutilización. Este material proviene de la recuperación de pavimentos envejecidos, cuyo asfalto presenta alta rigidez como resultado de procesos de oxidación prolongados.

El uso de RAP en mezclas frías ha mostrado beneficios en ciertas propiedades mecánicas respecto a las mezclas frías son solamente agregado virgen [40]; sin embargo, su incorporación en altos porcentajes puede incrementar la susceptibilidad a la humedad y la aparición de agrietamientos por el alto nivel de rigidez presente en el ligante [10]. Estas observaciones subrayan la necesidad de una evaluación más detallada de su comportamiento, considerando distintas proporciones de incorporación.

Para compensar las propiedades del asfalto envejecido, se ha propuesto el uso de agentes rejuvenecedores, los cuales buscan reducir la viscosidad del ligante y restaurar parcialmente sus características originales. Esta estrategia adquiere particular importancia al trabajar con elevados contenidos de RAP y es por esto que distintos tipos de rejuvenecedores han sido ensayados en la literatura, donde reportaron diversos niveles de eficacia según sus componentes y condiciones de aplicación [19]. Por lo que es tanto importante considerar el tipo de aditivo y su metodología de implementación.

En este contexto, la presente memoria se propone contribuir a esta línea de investigación mediante la evaluación de mezclas asfálticas en frío que incorpora RAP en altas proporciones, junto con un rejuvenecedor comercial. El estudio se centrará en analizar la susceptibilidad a la humedad, con el objetivo de determinar si la incorporación de este aditivo permite mitigar una de las principales desventajas de estas mezclas, o si, por el contrario, su efecto resulta limitado o incluso adverso.

1.2. Objetivos del Estudio

1.2.1. Objetivo General

- Analizar el efecto de la incorporación de líquido rejuvenecedor comercial en diferentes dosis en mezcla asfáltica fría con asfalto reutilizado (RAP), evaluado según su susceptibilidad a la humedad mediante valor TSR (Tensile strength ratio) a modo de evaluar el uso de altos contenidos de RAP y aditivo.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Determinar las proporciones adecuadas de asfalto reutilizado (RAP) y líquido rejuvenecedor a incorporar en la mezcla asfáltica fría, basándose en metodología de diseño previa, de manera que cumpla con porcentaje de vacíos.
- Recopilar los resultados obtenidos del ensayo de tracción indirecta, conforme a procedimiento ASTM D4867-22 y recomendaciones de estudio de Federal Lands Highway (FLH), desglosando el esfuerzo máximo resistente de las probetas acondicionadas frente al efecto de la humedad, así como los parámetros necesarios para calcular el índice Tensile Strength Ratio (TSR).
- Analizar comparativamente los parámetros, identificando similitudes y diferencias entre las distintas dosis y otras investigaciones previas.

1.3. Alcance del Estudio

- En el presente estudio, se lleva a cabo la confección de las mezclas asfálticas frías con RAP siguiendo una metodología comparada con compactador giratorio [32], replicando granulometría, porcentaje optima de asfalto, porcentaje total de agua optima. Además de utilizar la misma clasificación de materiales.
- Se utiliza el procedimiento de curado optimo investigado para este tipo de mezcla [34]
- Los agregados son provistos por Bitumix S.A. y el aditivo corresponde a un rejuvenecedor llamado Danox A-RJ, suministrado por Quimica Rhenium S.A. y producido por Kao Chemicals.
- No se contempla la verificación de la calidad ni de la procedencia de los agregados contenidos en el material reutilizado (RAP), dado que se asume que, al haber sido previamente utilizados en pavimento, estos debieron cumplir con requisitos técnicos establecidos. Asimismo, se omite la fuente del RAP, considerando que su utilización debe entenderse como la de un insumo más dentro del proceso de diseño, independiente de su procedencia específica.
- Los casos comparativos son mezclas asfálticas frías con 100 % RAP y líquido rejuvenecedor, abarcando 3 combinaciones: **9 %**, **15 %**, **21 %** de líquido rejuvenecedor respecto al peso del ligante que recubre el agregado, además de considerar el RAP como 'roca negra' (un agregado más, sin considerar la mezcla de asfalto viejo con nuevo)

- Se determina el índice de tracción indirecta mediante ensayo que sigue procedimiento ASTM D4867-22, salvo parámetros de acondicionamientos, los cuales provienen de recomendación por un estudio que busca asistir a Federal Lands Highway [12]

2 | Marco Teórico

2.1. Mezcla Asfáltica Frias

Las mezclas asfálticas en frío, también conocidas como Cold Mix Asphalt (CMA), forman parte del diverso conjunto de mezclas utilizadas en la construcción de pavimentos flexibles, junto con las mezclas asfálticas en caliente (HMA) y las mezclas tibias (WMA). Que a diferencia de estas dos últimas, las CMA no requieren del calentamiento elevado de los agregados ni del calentamiento del ligante asfáltico durante su fabricación, lo que se traduce, en cierto grado, en un ahorro energético y una reducción de emisiones contaminantes durante el proceso de producción [24].

Este tipo de mezclas puede utilizar como elemento cohesivo principal ya sea una emulsión asfáltica, asfalto espumado o asfalto cortado, los cuales se combinan con agregados a temperatura ambiente, facilitando su producción y aplicación en condiciones ambientales moderadamente frías. No como las mezclas calientes que presentan mayores restricciones de pavimentación bajo temperaturas bajas debido a su limitado tiempo de trabajabilidad.

Por otro lado, en términos de desempeño mecánico, las CMA presentan ciertos desafíos que han limitado su implementación en la práctica, especialmente en capas de rodadura sometidas a tránsito elevado. Entre sus principales limitaciones se encuentra la baja estabilidad y resistencia en sus etapas iniciales, los tiempos prolongados de curado que podrían retrasar la habilitación del tránsito y una mayor susceptibilidad a la humedad, atribuida a la combinación de la elevada presencia de vacíos de aire y la limitada cohesión interna de la mezcla [24].

A pesar de estas limitaciones, diversos estudios han demostrado que las mezclas asfálticas en frío pueden mejorar significativamente su comportamiento cuando se aplican metodologías de diseño adecuadas. Con un tiempo de curado suficiente, es posible alcanzar niveles de rigidez comparables a los de las mezclas asfálticas en caliente cuando se incorporan aditivos que complementan su desempeño mecánico [37, 39]. Entre los aditivos comúnmente utilizados se incluyen cemento portland, cal hidratada, polímeros y fibras sintéticas [24].

De manera similar, el uso de pavimento asfáltico reutilizado (RAP) como componente agregado permite reducir el consumo de materiales nuevos además de mejorar la resistencia al ahuellamiento. Específicamente, mezclas con un contenido de RAP del orden del 60 % han evidenciado desempeños mecánicos superiores a los de las mezclas frías convencionales [2]. Asimismo, presentan una resistencia aceptable frente al daño por humedad, con valores tanto de resistencia seca como acondicionada más altos en comparación con aquellas sin contenido reutilizado [1].

2.1.1. Emulsión

La emulsión asfáltica es un componente fundamental en las mezclas en frío, ya que actúa como mecanismo de adhesión entre las partículas de agregado. Dicho material presenta una baja viscosidad a temperaturas normales (0 a 40 °C) y su composición se basa en una dispersión acuosa en la que el asfalto se encuentra suspendido.

Específicamente, al inicio el asfalto se presenta en forma de gotas cargadas eléctricamente, debido a la presencia de emulsificante y los propios componentes ionizables del asfalto, que crean una barrera electrostática entre las gotas Figura 2.1, impidiendo que las gotas se unan de inmediato. Sin embargo, cuando estas barreras reciben suficiente energía, se produce un fenómeno denominado floculación, que consiste en gotas que se acercan entre sí cada vez más para proceder al siguiente estado, donde estas están lo suficientemente cerca para ocurrir la fusión.

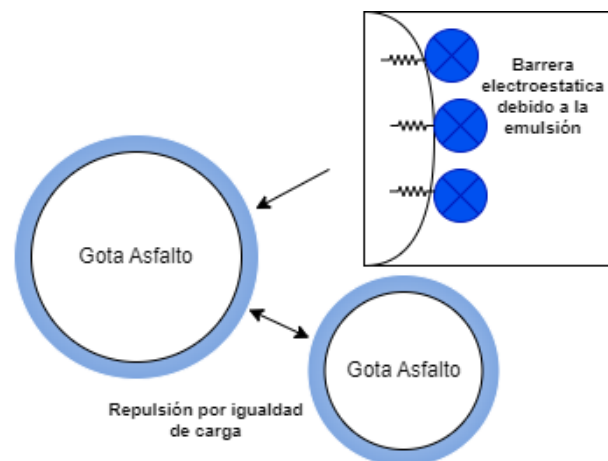


Figura 2.1: Ilustración de cargas en gotas de asfalto. Fuente: Elaboración Propia.

La floculación puede prevenirse mediante la agitación constante de la mezcla, pero una vez que las gotas se fusionan, el proceso es irreversible. Factores como el reposo, la evaporación del agua, la congelación o el uso de emulsiones asfálticas de mayor viscosidad aceleran el proceso de fusión [36].

A todo este proceso, también se le asigna el nombre de "quebrado" de la emulsión, que clasifica en cierta manera el comportamiento que tendrá la emulsión en el momento de mezclado.

Las formas de clasificación de emulsiones asfálticas pueden basarse en dos características principales: el signo de carga de la barrera electrostática que cubren las gotas de asfalto y la rapidez con la que se produce el proceso de quebrado.

- **Emulsiones catiónicas:** Las gotas tienen carga positiva.
- **Emulsiones aniónicas:** Las gotas tienen carga negativa.

En cuanto a la reactividad, existen tres tipos principales de emulsiones:

- **Emulsiones de quebrado rápido :** Estas emulsiones se endurecen rápidamente cuando se combinan con agregados de baja área superficial, como los utilizados en tratamientos superficiales.
- **Emulsiones de quebrado medio :** Su endurecimiento es más lento, lo que las hace adecuadas para mezclas abiertas con agregados de baja área superficial.
- **Emulsiones de quebrado lento :** Son las más adecuadas para mezclarse con agregados reactivos de alta área superficial.

Esta clasificación está establecida por algunos estándares internacionales ASTM D977, ASTM D2397, AASHTO M140, AASHTO M208 y también se encuentra mencionada en especificaciones nacionales como el Manual de Carreteras. Dichas especificaciones proponen sistemas de nomenclatura que permiten identificar rápidamente las características principales de una emulsión asfáltica, facilitando en gran medida su identificación

Por ejemplo, en el caso de las emulsiones catiónicas, según la norma ASTM, estas se expresan como CRS, CMS y CSS, que hace referencia a una velocidad de quebrado rápido, medio y lento, respectivamente. Por otro lado, las emulsiones aniónicas se identifican simplemente como RS, MS y SS, sin utilizar la letra 'C', siguiendo el mismo criterio de velocidad de quebrado. En ambos casos, las siglas pueden ir acompañadas de números y letras adicionales que especifican propiedades adicionales, como la viscosidad y alguna característica asociada al asfalto residual.

2.1.2. Agregados

Los agregados constituyen el segundo componente fundamental en las mezclas asfálticas frías, pues, representan el mayor porcentaje en peso y además de ser los responsables de resistir los esfuerzos internos. Estos materiales, duros e inertes, se presentan en diversos

tamaños y pueden estar formados por arena, grava, rocas chancadas, conchas, escoria, entre otros. Cuando estos no contemplan otro elemento externo, se denominan como árido virgen.

Para el diseño y la implementación de mezclas, es esencial que los agregados cuenten con una distribución de tamaños adecuada, así como con propiedades de resistencia, tenacidad, y angularidad que favorezcan la trabazón de las partículas. Además, deben poseer cierta porosidad, una superficie limpia e hidrofóbica. Para verificar todas estas especificaciones, ensayos han sido estandarizados para asegurar su función óptima en distintos aspectos, los cuales se resumen en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Requisitos y ensayos asociados a las características de los agregados. Fuente: [35]

Característica	Función	Ensayo	Requisito
Dureza / Tenacidad	Resistencia a la abrasión y degradación; calidad de las partículas	ASTM C131, ASTM C535	Pérdida de peso máxima; ASTM D692, D1073; AASHTO M283
Solidez	Resistencia al congelamiento y descongelamiento	ASTM C88, AASHTO T103	Pérdida de peso máxima; ASTM D692; AASHTO M283
Forma de partícula y textura superficial	Fricción; resistencia al deslizamiento; compactación; estabilidad de mezcla	ASTM D3398, ASTM D4791, ASTM C1252	Porcentaje mínimo de partículas trituradas; ASTM D692; AASHTO M283
Resistencia al pulido	Resistencia al deslizamiento y desgaste	ASTM D3319, ASTM E303, ASTM E660, ASTM D3042	Valor de pulido máximo; ácido insoluble mínimo
Durabilidad	Resistencia al envejecimiento y a la intemperie	ASTM D3744	Índice de durabilidad mínimo
Resistencia al 'stripping'	Resistencia al efecto del agua	ASTM D1664, NCHRP 246, 274, AASHTO T283, ASTM D1075, ASTM T182	Porcentaje mínimo de recubrimiento; ciclos de congelamiento; AASHTO M283
Peso específico y absorción de agua	Cálculos de porosidad	ASTM C127, ASTM C128	—
Absorción de asfalto	Cálculos de durabilidad	ASTM D2041	—
Gradación y tamaño	Resistencia, trabajabilidad, durabilidad, compactación y otros.	ASTM C117, ASTM C136, C702, AASHTO T30	Porcentajes mínimos y máximos según tamices estándar; ASTM D3515
Composición mineral	Mojabilidad y potencial 'stripping'; porosidad	ASTM C294, ASTM C295	—
Limpieza y materiales nocivos	Resistencia a la intemperie y efectos del agua	ASTM C117 y D422, ASTM C123, ASTM C142, ASTM D4219, ASTM D4318	Máximo de terrones de arcilla y partículas blandas del 1%; equivalente de arena mínimo 25–45%; índice plástico no superior a 4–6; porcentaje de finos; ASTM D422; D1073; AASHTO M283

Por otra parte, la gradación, concepto que describe la distribución de tamaños de los agregados, se determina mediante tamices con aberturas que van desde los 50 [mm] hasta los 0.075 [mm]. A través de estos, se obtiene un porcentaje retenido en cada tamiz, lo que permite visualizar la proporción contribuyente para cada tamaño

Asimismo, la gradación de los agregados ha sido clasificada en función de esta característica, utilizando denominaciones como continua o densa, discontinua y uniforme, las cuales se resumen en la Tabla 2.2. De forma complementaria, otras investigaciones emplean términos equivalentes como dense-graded mixtures, stone-filled sheet mixtures, fine-graded mixtures y open-graded mixtures, donde cada una tendrá cierto efecto en la cantidad de ligante asfáltico requerido, trabajabilidad, densidad, estabilidad y desempeño [11].

Tabla 2.2: Clasificación de gradaciones de agregados y sus características. Fuente: Elaboración Propia

Tipo de gradación	Descripción	Características principales
Uniforme	Predomina un único tamaño de partícula.	Alta permeabilidad; baja estabilidad; requiere forma y textura del agregado para generar trabazón.
Continua o densa	Amplia distribución de tamaños, desde gruesos hasta finos.	Buena compactación; baja permeabilidad; alta resistencia estructural.
Discontinua	Mezcla de partículas grandes y pequeñas, con escasez de tamaños intermedios.	Comportamiento similar a la continua, con mayor resistencia pero con una alta absorción de asfalto

2.1.3. Diseño

El diseño de mezclas asfálticas requiere la consideración de múltiples variables que influyen desde la selección y especificación de los materiales hasta el proceso de mezclado. El objetivo fundamental es obtener una mezcla cuyas propiedades cumplan con parámetros predefinidos, asegurando así un desempeño mecánico adecuado y una buena durabilidad en servicio.

En el caso de las mezclas asfálticas en caliente (HMA), uno de los métodos más ampliamente utilizados es el método Marshall. Este se basa en el control de propiedades volumétricas como la densidad y el contenido de vacíos, utilizando la estabilidad Marshall

como principal parámetro de resistencia. No obstante, algunas críticas señalan que el método de compactación empleado no simula de forma realista el proceso de densificación que ocurre bajo condiciones reales de tránsito.

Por otra parte, existe el método Hveem, el cual también considera variables como densidad, vacíos y estabilidad, pero se diferencia por emplear un proceso de compactación por amasado (kneading) y por utilizar la estabilidad Hveem como indicador de resistencia.

Finalmente, uno de los métodos más recientes en comparación de los anteriores, está el método Superpave, el cual fue desarrollado con un enfoque basado en el desempeño. Este sistema busca predecir el comportamiento real de la mezcla frente a las condiciones de carga y clima. La compactación se realiza utilizando el compactador giratorio Superpave, e incluye procedimientos adicionales como el Ensayo de Corte Superpave y el Ensayo de Tracción Indirecta. Asimismo, introduce un sistema nuevo para la clasificación y selección de ligantes asfálticos [29].

En el caso de las mezclas tibias (WMA) y frías (CMA), no se dispone de metodologías de diseño completamente estandarizadas para cada una. Por lo general, los procedimientos adoptados corresponden a adaptaciones de los métodos anteriormente mencionados. Particularmente para las WMA, se han empleado diversas metodologías como Marshall, Superpave, Hveem, Hubbard-Field y las denominadas mezclas asfálticas de alto módulo (High-Modulus Asphalt Mixtures), entre otras [28].

En el caso de las mezclas asfálticas en frío, diversas instituciones como el US Forest Service, Asphalt Emulsion Manufacturers Association (AEMA) y el Asphalt Institute han trabajado durante años en el desarrollo de metodologías de diseño apropiadas para este tipo de mezclas. Desde 1979, se comenzó a utilizar como base los métodos Marshall y Hveem, los cuales fueron adaptados para su aplicación en mezclas en frío. Posteriormente, en 1986, AEMA actualizó estas metodologías, y luego en 1989 el Asphalt Institute publica un documento detallado, el Manual Series No. 14 (MS-14) [13], el cual es nombrado en varias investigaciones asociadas a las mezclas frías.

El MS-14 establece ser una guía para realizar de análisis, diseño y control de la construcción de mezclas asfálticas en frío [3]. Este manual abarca aspectos como mezclas producidas in situ, en planta, materiales y diseños. Entre los diseños nombrados por el documento, se encuentran los mismos que se han ido modificando en los años, como el método Marshall y el método Hveem.

En particular, el diseño Marshall modificado se centra en la relación entre estabilidad y flujo como indicador clave para asegurar la resistencia frente a deformaciones y despla-

mientos bajo cargas de tránsito. Asimismo, se considera el análisis volumétrico mediante la evaluación de densidad y porcentaje de vacíos, ya que estos influyen directamente en la susceptibilidad de la mezcla por el ingreso de agua y aire.

2.2. Daño por humedad

También conocido como stripping, es el daño producido a las mezclas asfálticas debido al efecto de la humedad. Se produce cuando el agua compite con el ligante por la superficie del árido, debilitando la unión entre agregado-ligante. Se ha visto que dicha debilidad provoca ciertos tipos de fallas en el pavimento como el desprendimiento, deformaciones, agrietamiento y exudación.

Específicamente el mecanismo por el cual sucede este fenómeno no es del todo claro, las investigaciones establecen que podrían deberse por diversas teorías simultáneas [26].

La primera de las 3 principales teorías, es la Mecánica, la cual explica que la adhesión es afectada por las propiedades de los agregados, como la textura, porosidad, área superficial y forma. La rugosidad promueve favorece el anclaje mecánico con el ligante asfáltico. En cambio, las superficies lisas, como las de los agregados ricos en cuarzo, tienden a ofrecer menor resistencia, incrementando así la probabilidad de daño por humedad. La porosidad también juega un papel importante: mientras una porosidad moderada permite la absorción adecuada del asfalto, contribuyendo a una mejor adherencia, una porosidad excesiva puede generar capas delgadas de ligante que puedan permitir el paso del agua [26].

Asimismo, el área superficial de los agregados incide indirectamente en el espesor de la película asfáltica. Las fracciones finas del agregado aumentan esta área superficial por unidad de peso, lo que requiere una mayor cantidad de ligante para mantener una película de ligante uniforme. Por ejemplo, cuando el contenido de asfalto se mantiene constante, una mayor área superficial (más agregado fino) reduce el espesor de la película, debilitando la barrera protectora frente a la humedad [26].

La segunda teoría es la Reacción química y orientación molecular, que explica cómo los agregados con carácter ácido, como el granito y la grava, tienden a ser más susceptibles que los agregados básicos, como el calizo. Esta diferencia se debe, en parte, a la interacción química entre los compuestos polares presentes en el asfalto y la superficie del agregado. Los sulfoxidos y ácidos carboxílicos son absorbidos en distinto grado dependiendo del tipo de agregado, y algunos pueden ser desplazados fácilmente por el agua, lo que incrementa la posibilidad de pérdida de adhesión [26].

La tercera y última teoría, es la de energía superficial, pues, la adhesión de los materiales (agregado y ligante) solo es posible si la tensión o energía superficial libre es superior a la del agua.

2.2.1. Mitigación del daño por humedad

Para mejorar la afinidad del ligante y los agregados, es posible añadir aditivos mejoradores de adherencia, los cuales de cierta manera intervienen los distintos mecanismos por los cuales el agua desplaza el ligante asfáltico.

Los aditivos crean un enlace químico entre el ligante y el agregado, orientándose en la parte lipofílica hacia el ligante, mientras que los grupos polares de la parte hidrofílica generan uniones con los grupos silicatos y carbonatos de la superficie del agregado[31].

Otra forma de mitigación, es intervenir en el tratamiento o característica del agregado, ya sea con un precalentamiento a modo de evaporar todo contenido de agua posible antes del mezclado y limpiar estos para evitar todo tipo de impurezas. Incluso es posible recurrir a la utilización de RAP, el cual se ha visto que aguantan mejor el daño por humedad que el agregado virgen [22].

2.2.2. Evaluación de la susceptibilidad

Desde la década de 1930, se han desarrollado diversos ensayos destinados a identificar el daño por humedad en mezclas asfálticas. Estos métodos pueden agruparse en dos grandes categorías: por un lado, aquellos que evalúan visualmente la separación del ligante en mezclas sueltas recubiertas, tras ser sometidas a inmersión en agua; y por otro, los que emplean especímenes compactados, los cuales se acondicionan para simular condiciones de servicio. En este segundo grupo, la evaluación se basa en la comparación entre los resultados obtenidos de muestras acondicionadas y no acondicionadas [20].

Dentro de las metodologías utilizadas para este fin, se encuentran el ensayo de tracción indirecta bajo acondicionamiento Lottman, la norma ASTM D4867 (con saturación de humedad), los ensayos de ebullición (ASTM D3625), los de compresión en inmersión (ASTM D1075, AASHTO T165), la prueba de pedestal de congelación-deshielo, y el procedimiento AASHTO T283, el cual combina saturación con un ciclo de congelación y deshielo [20].

Una de las técnicas más empleadas es el ensayo de tracción indirecta, comúnmente conocido como ensayo TSR (Tensile Strength Ratio). Este método consiste en aplicar una carga vertical sobre una probeta cilíndrica dispuesta horizontalmente, generando un estado de esfuerzos que induce tracciones en el plano diametral, como se ilustra en la fig. 2.2. Esto

permite simular, de manera simplificada, las condiciones de tracción que enfrentan las capas de rodadura bajo cargas de tránsito.

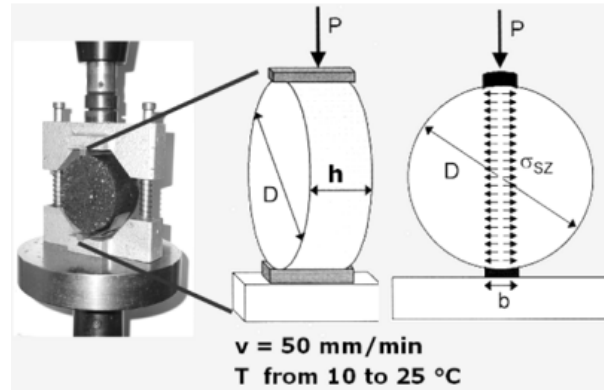


Figura 2.2: Principio del ensayo Indirect tensile strength. Fuente: [18]

Para representar una condición crítica y estandarizada de exposición a la humedad, se establece comúnmente un contenido de vacíos de aire cercano al 7 %, facilitando la infiltración de agua en la mezcla. A partir de esto, se compara la resistencia a la tracción de probetas secas con la de otras previamente acondicionadas en ambientes húmedos, obteniendo el índice TSR.

Cabe señalar que el ensayo TSR no está diseñado para predecir el desempeño estructural del pavimento. Su propósito principal es identificar combinaciones de ligante y agregado susceptibles a la humedad, así como evaluar la efectividad de aditivos que mejoran la adherencia en condiciones adversas [31].

2.3. Reclaimed Asphalt Pavement

El Pavimento Asfáltico Reutilizado (RAP) es un material proveniente del pavimento asfáltico removido que ha sido pulverizado y recuperado mediante fresado, el cual se encuentra con cierto grado avanzado de envejecimiento.

En las mezclas frías, el RAP se emplea para mejorar las propiedades del asfalto en frío y hacer su uso más conveniente, pues, no solo reduce el costo de las nuevas mezclas asfálticas, sino que también disminuye el uso de recursos naturales.

Estudios han mostrado que tiene cierta relevancia en las propiedades y desempeño mecánico de las mezclas, como la resistencia a la tracción indirecta, la estabilidad a altas temperaturas, la resistencia a la humedad y la vida útil en fatiga [40].

Sin embargo, en otros estudios se ha observado que la utilización de RAP, podría crear problemas asociado a su susceptibilidad a la humedad y resistencia al agrietamiento debido a la presencia de ligante suficientemente envejecido o rígido [10].

A pesar de esto, se ha determinado que existen un porcentajes de RAP que ofrece resultados óptimos, algunos de ellos llegando ser superiores a los obtenidos con mezclas frías convencionales. Mejorando la resistencia al ahuellamiento y otorgando una resistencia a la humedad comparable, además de proporcionar un módulo resiliente más elevado.[2].

2.4. Propiedades del ligante asfáltico y su evolución

Para comprender los cambios que experimenta el pavimento asfáltico durante su vida útil y las razones detrás de la incorporación de ciertos aditivos que buscan modificar sus propiedades, es necesario primero conocer en detalle la composición del ligante.

2.4.1. Composición química del asfalto

Iniciando con la composición química, los elementos que componen el ligante son principalmente carbono en su mayoría y otros en menor proporción como el hidrógeno, azufre, oxígeno, nitrógeno, a pesar de ser una lista relativamente pequeña de elementos, el asfalto tiene una estructuración química compleja y variable, que difícilmente puede ser comparable entre muestras debido a distintos factores, como el refinamiento y su degradación en el tiempo. Si se quisiera realizar un análisis completo del ligante, sería extremadamente exigente ya que produciría una larga cantidad de datos y correlaciones que dificultaría su práctica.

Es posible clasificar la composición en 2 grupos principales, Asfaltenos y Maltenos, donde este último tiene una subcategoría: Resinas, Aromáticos y Saturados [38] .

Al conjunto de esta subcategoría, incluyendo los asfaltenos, es comúnmente conocido como SARA.

- **Asfaltenos:** Son considerados una molécula altamente polar y compleja, además de componer aproximadamente el 5 al 25 % del ligante. Tiene un peso molecular relativamente significativo, entre 1.000 hasta 100.000, y es responsable de aumentar la rigidez y viscosidad del ligante.
- **Maltenos:** También conocidos como "Petrolenos" corresponden a la fracción restante, siendo hidrocarburos más volátiles y ligeros, con un peso molecular menor

respecto a los asfaltenos.

- **Resinas:** Son largas cadenas de hidrógeno y carbono que contienen pequeñas porciones de oxígeno, azufre y nitrógeno, con un peso molecular entre 500 y 50.000. Son altamente adhesivas, entregando ductilidad, maleabilidad, plasticidad y unión.
- **Aromáticos:** Son cadenas de carbono no polares que tienen un anillo no saturado que domina y tiene una capacidad alta de disolución con otras moléculas de hidrocarburo de mayor peso molecular. Representan la mayor cantidad del ligante (40 % hasta 65 %), con un peso molecular entre 300 y 2.000.
- **Saturados:** Son cadenas abiertas o ramificadas de hidrocarburos no polares, que representan entre 5 % a 20 % del ligante y tienen un peso molecular similar a los aromáticos.

La estructura del asfalto demuestra la interacción de las diferentes fracciones anteriormente mencionadas, mediante una disposición coloidal, que consiste en "micelas" de asfaltenos de alto peso molecular, dispersas en un medio aceitoso compuesta por maltenos. Específicamente, las micelas son asfaltenos rodeados por una capa pesada compuesta por resinas que actúa como capa estabilizadora de disolución, existiendo una zona de transición desde el centro de la micela hasta el exterior con resinas menos polares. Existen 2 estructuras que sirven como clasificación y que predominan en la mayoría de los ligantes. La primera denominada "**SOL**" (Solución), ocurre al existir una cantidad suficiente de resinas y aromáticos con suficiente capacidad de disolución, en donde los asfaltenos son peptizados (dispersos de manera estable). Por otro lado, si los aromáticos o resinas no son suficientes para la disolución, los asfaltenos son capaces de aglomerarse, generando estructuras irregulares y empaquetadas con espacios llenos de líquido intermicelar. Estos ligantes son denominados como "**GEL**" (gelatina) [38].

Existen diferencias en el comportamiento entre ambas microestructuras, donde las tipo "SOL" están asociadas a alta ductilidad, poca tixotropía (limitada capacidad de fluir al ser sometida a una fuerza), alta susceptibilidad a la temperatura y baja tasa de envejecimiento, en cambio, las de tipo "GEL" demuestran una baja ductilidad, alta tixotropía, baja susceptibilidad a la temperatura y un alta tasa de envejecimiento. Asimismo, existen ligantes cuyo comportamiento es combinado y son elástico en su etapa temprana, denominados tipo "**SOL-GEL**" [10].

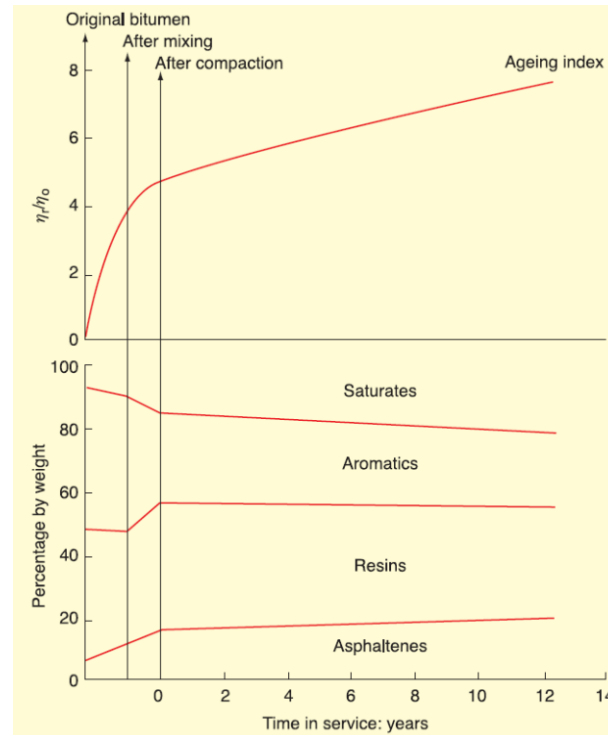


Figura 2.4: Cambios en la composición del ligante durante mezclado, colocación y servicio.

Fuente: [38]

2.4.3. Rejuvenecedores

Los agentes rejuvenecedores son un aditivo cuyo propósito es compensar las consecuencias por la susceptibilidad al envejecimiento propio del ligante, y al mismo tiempo modificar la respuesta del pavimento ante demandas relacionadas con deterioros como fatiga y cambios térmicos.

En términos químicos, el rejuvenecedor no busca revertir el proceso de oxidación, sino que revertir los efectos que son producto del envejecimiento, restaurando su microestructura. Cuando el asfalto se encuentra altamente envejecido, se asemeja a una configuración de tipo "GEL", sin embargo, al aplicar un rejuvenecedor en la dosis apropiada, existe un aumento en la cantidad de resina y aromáticos, que al mismo tiempo restaura la relación asfaltenos y maltenos, tendiendo a una estructura mixta de tipo "SOL-GEL" [10]. Es por eso que es común utilizarlo cuando se diseña mezclas con alto contenido de RAP.

Algunas investigaciones proponen una clasificación de los rejuvenecedores en 2, los que tienen un solo componente y los compuestos.

Los grupos amino, hidroxilo y aldehído son los más efectivos para rejuvenecer asfaltos deteriorados y los rejuvenecedores con grupos hidroxilo eran más eficaces para asfaltos envejecidos por PAV, mientras que los de aldehído lo eran para asfaltos envejecidos por ultravioleta. Sin embargo, el uso de un solo componente ligero puede generar problemas de rendimiento. En comparación, los agentes compuestos, como aceites vegetales reciclados, aceite de cocina reciclado, entre otros aceites que muestran mejores resultados al restaurar la estabilidad a altas temperaturas del asfalto envejecido [19].

Por otro lado, algunos autores proponen una clasificación alternativa basada en el efecto que los aditivos tienen sobre el ligante asfáltico [33].

1. **Suavizantes**, también llamados rejuvenecedores reológicos.
 - **Suavizantes Incompatibles**: cuyo principal efecto es disminuir la viscosidad.
 - **Suavizantes Solubles**, que restauran el balance en el contenido de SARA, aportando fracción de maltenos.
2. **Compatibilizadores**, que ayudan a renovar las características físicas y químicas del ligante mediante la disrupción de las asociaciones intermoleculares entre los asfaltenos.

3 | Metodología

3.1. Metodología y Estudio Experimental

En la Figura 3.1, se muestra el diagrama de flujo del plan de trabajo de la investigación, en la cual se señala las distintas fases que contienen las distintas tareas o elementos considerados.

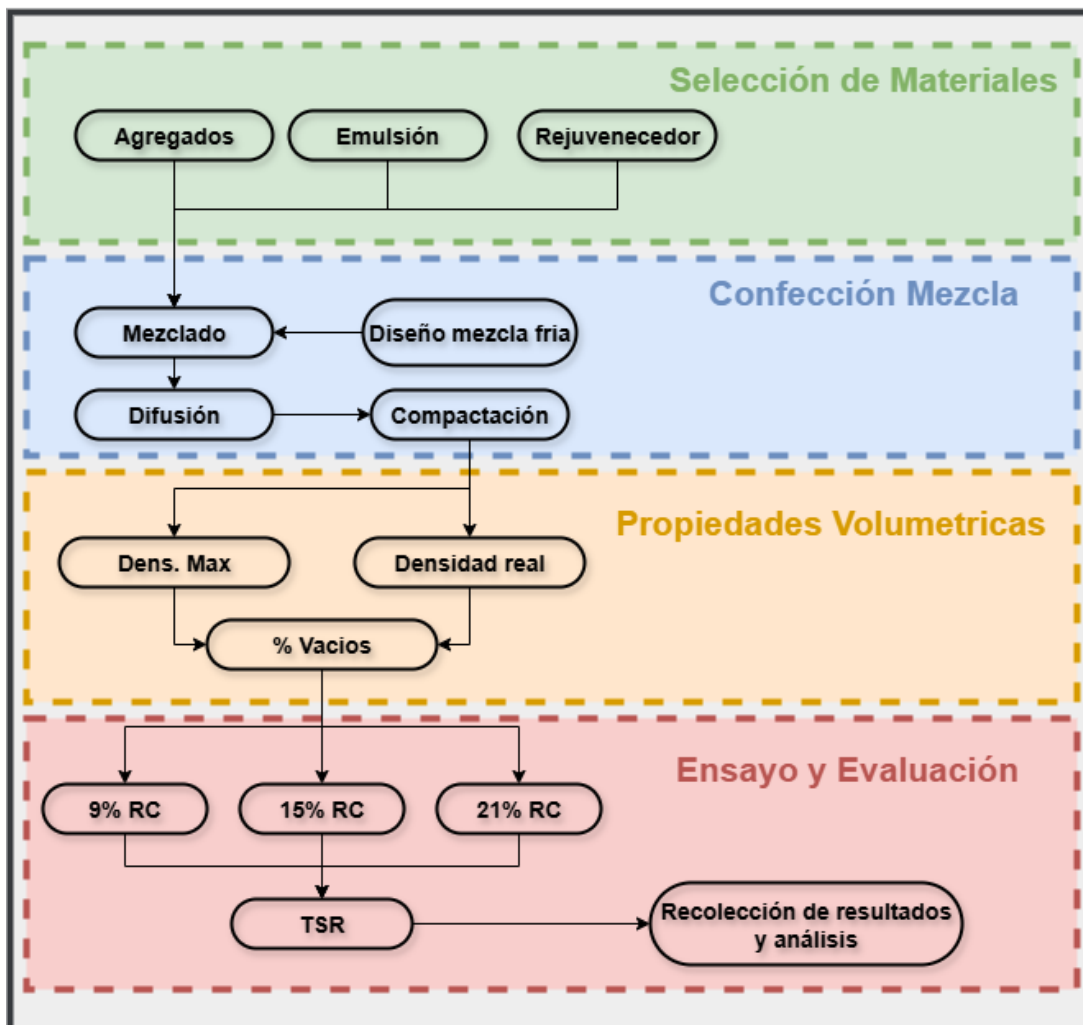


Figura 3.1: Diagrama de Flujo de la investigación. Fuente: Elaboración Propia

3.2. Instrumentos y Equipos

Para la ejecución de los distintos procedimientos experimentales desarrollados en esta investigación, se requirió del uso de diversos instrumentos de laboratorio. A continuación, se describen los principales equipos utilizados:

Compactador Giratorio TROXLER

Se utiliza el Compactador Giratorio Superpave TROXLER de la Figura 3.2 para la confección de probetas y cumple con las especificaciones de las normas ASTM D6925-15, AASHTO T312 y EN 12697-31. Este opera mediante un sistema hidráulico y está diseñado para compactar probetas cilíndricas mediante un ángulo de giro constante, garantizando condiciones de carga y deformación que simulan el proceso de compactación en la práctica.



Figura 3.2: Compactador Giratorio utilizado. Fuente: Elaboración Propia

El ángulo de giro utilizado fue de $20,25 \pm 0,35$ [mrad] ($1,16 \pm 0,02^\circ$), mientras que la velocidad de rotación del molde es de $30,0 \pm 0,5$ [rpm]. La carga vertical aplicada durante la compactación es de 600 ± 60 [kPa] en los primeros 5 giros y de 600 ± 18 [kPa] en los siguientes.

También el equipo cuenta con un sistema de medición de altura de alta precisión que registra una vez por giro con una resolución de $0,1$ [mm], permitiendo una lectura continua

a lo largo de la compactación.

Su configuración permite operar bajo dos modos, ya sea compactación por número de giros definidos o por altura objetiva. Siendo esta última la opción utilizada en la confección de las probetas en esta investigación.

Moldes de acero

Los moldes de la Figura 3.3 son los utilizados para ser los recipientes de las mezclas dentro del compactador giratorio, estos tienen un diámetro interior de aproximadamente 150 [mm]. Permiten la compactación de probetas de variadas alturas, ya sea una altura mínima de 50 [mm] o máxima de 180 [mm], además debe ser capaz de aguantar altas temperaturas para utilización de tanto mezclas frías, tibias o calientes.



Figura 3.3: Moldes de acero. Fuente: Elaboración Propia

Hornos

Los hornos corresponden a equipos de tiro forzado con capacidad de operación en un rango de temperatura de trabajo desde 5 °C o 10 °C hasta los 300°C. Estos hornos permiten un control preciso de temperatura, con una exactitud de hasta 0,1°C para valores inferiores a 99,9°C y de 0,5°C para temperaturas superiores a 100°C. Cuentan puertas de acero inoxidable totalmente aisladas con cierre de compresión de dos puntos, y rejillas internas también de acero inoxidable. Estas características aseguran condiciones térmicas constantes, que permiten el almacenamiento y acondicionamiento apropiado de las probetas tanto

para la etapa de curado y difusión del líquido rejuvenecedor.



Figura 3.4: Horno de laboratorio. Fuente: Elaboración Propia

Bomba de Vacío

Equipo capaz de generar una presión residual de 0 a 15 PSI a una temperatura de 25°C, consta de un motor de 1/8 HP y un diafragma para el vacío. Es utilizado para la saturación de probetas y procedimiento de la obtención de la densidad máxima teórica suelta.



Figura 3.5: Bomba de vacío. Fuente: Elaboración Propia

Prensa de Ensayo (Máquina Marshall)

La prensa de ensayo utilizada corresponde a una máquina de estabilidad Marshall, diseñada específicamente para determinar valores de carga y flujo de mezclas asfálticas. Esta prensa está conformada por una estructura robusta de dos columnas, con un cabezal superior ajustable accionado por un pistón electromecánico con capacidad máxima de 50 kN. La operación es manual mediante un interruptor, que acciona un gato mecánico encargado de elevar el cabezal inferior a una velocidad constante de 50,8 mm/min.



Figura 3.6: Prensa Marshall. Fuente: Elaboración Propia

Balanzas

Se utiliza una balanza con capacidad de 10.000 [g] y precisión de 0,1 [g]. Incluye un sistema de suspensión y válvula de desborde para mantener constante el nivel del agua durante pesadas hidrostáticas. Esta es utilizada tanto para la medición de las propiedades volumétricas y preparación de la mezcla.



Figura 3.7: Balanza adaptada para medir probetas sumergidas. Fuente: Elaboración Propia

Baños de Agua

Se utilizan dos baños termostataados, ambos con una capacidad de mantener una temperatura estable de 25°C :



Figura 3.8: Uno de los baños de agua utilizados. Fuente: Elaboración Propia

3.3. Selección de Materiales

A continuación, se detallan los materiales empleados en la elaboración de las mezclas asfálticas. Se presentan las características de los agregados reutilizados (RAP), la emulsión asfáltica y el líquido rejuvenecedor incorporado para contrarrestar la rigidez. Cada componente es descrito en función de sus propiedades y su función dentro de la investigación.

3.4. Selección de Agregados

Los agregados utilizados en esta investigación provienen de material reutilizado del fre-sado de un pavimento asfáltico (RAP), suministrado por la empresa Bitumix S.A. Cabe mencionar que se desconoce la procedencia del camino que fue extraído.

Los resultados de los ensayos que caracterizan al RAP, se presentan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Ensayos RAP. Fuente: [32]

Propiedad	Valor
Densidad Aparente suelta [kg/m ³]	1619
Densidad Real Seca [kg/m ³]	2555
Densidad Neta [kg/m ³]	2646
Desgaste de los Ángeles [%]	15
Índice de Plasticidad [%]	N.P
Equivalente de Arena [%]	79
Cubicidad de Partículas [%]	96

Para su utilización en la mezcla, inicialmente se establece una banda granulometrica de referencia, la cual asegure ciertas características deseadas de la mezcla que se compactará, en este caso se selecciona la banda IV-A-12 la cual consiste en una granulometria semidensa según el Manual de Carreteras, Volumen 5 [15].

Tabla 3.2: Límites granulométricos banda IV-A-12: Fuente: Manual de Carreteras, Volumen 5

Tamiz (mm)	Límite Inf. (%)	Límite Sup. (%)
20 (3/4")	100	100
12.5 (1/2")	80	95
10 (3/8")	70	85
5 (Nº 4)	43	58
2.5 (Nº 8)	28	42
0.63 (Nº 30)	13	24
0.315 (Nº 50)	8	17
0.16 (Nº 100)	6	12
0.08 (Nº 200)	4	8

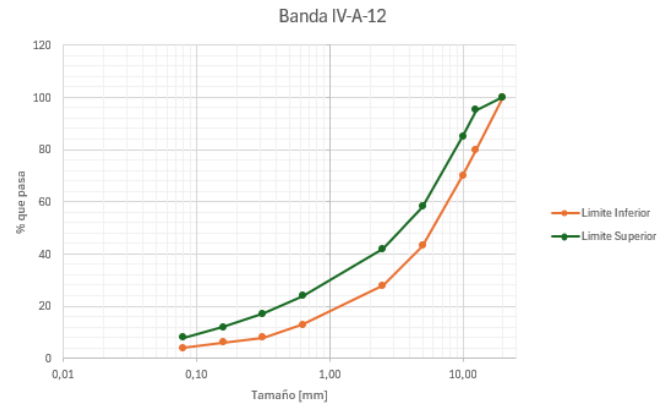


Figura 3.9: Gráfico de límites banda IV-A-12. Fuente: Elaboración Propia.

Ahora que se conoce el rango de tamaños que debe cumplir la mezcla, se procede a analizar la granulometría de los acopios de material disponible, para esto primero se selecciona una muestra representativa usando el método de cuarteo de muestras, luego se tamiza y se determina la granulometría de los pétreos, ambos procedimientos según Manual de Carreteras, Volumen 8 [16]. En la Figura 3.10, se muestra la distribución de tamaños del acopio de material recibido y como esta se ubica respecto a los límites de la banda. En este se observa que supera los límites superiores en tamaños grandes, y por otro lado se aleja del límite inferior en los tamaños mas pequeños. Esto se traduce que el material representa gran cantidad de pétreos finos y baja cantidad de pétreos gruesos, en donde hay una baja o inexistente cantidad de agregados de tamaño 12.5 [mm].

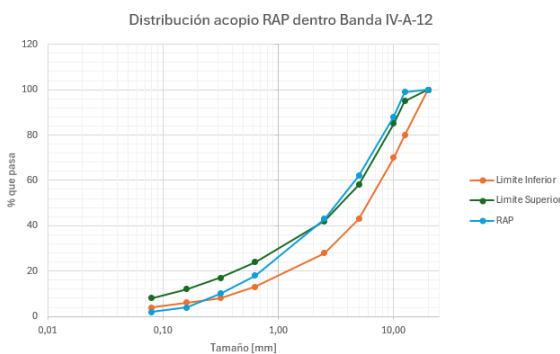


Figura 3.10: Granulometría acopio RAP. Fuente: Elaboración Propia

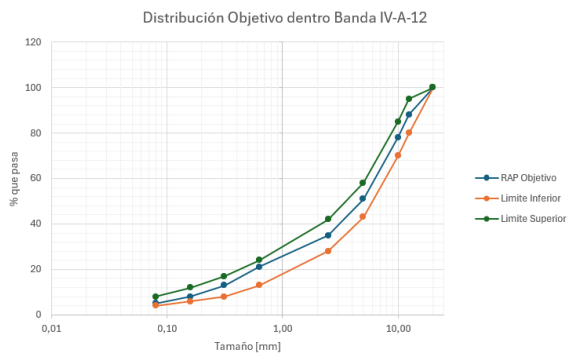


Figura 3.11: Granulometría objetivo. Fuente: Elaboración Propia

Para solucionar lo anterior, se define una granulometría objetivo [32] que se mantenga dentro de los límites de la banda especificada y sea compatible con la disponibilidad del

material. Para suplir la falta de fracción gruesa (12,5 [mm]), se incorpora material proveniente de un segundo acopio suministrado por Bitumix S.A., que corresponde a fresado de tamaño mayor.

Una vez definido los tamaños necesarios y verificado la disponibilidad de los agregados, estos son secados, tamizados, almacenados y posteriormente utilizados según la curva granulométrica objetivo indicada en la Figura 3.11.



Figura 3.12: RAP seco antes de ser tamizado. Fuente: Elaboración Propia

Por otro lado, para determinar una dosificación adecuada del líquido rejuvenecedor, es necesario conocer el contenido de ligante envejecido presente en el RAP. Para ello, se emplea el procedimiento de extracción por centrifugación seguido del ensayo de recuperación del ligante, conforme al Manual de Carreteras, Volumen 8 [16]. Los resultados obtenidos, resumidos en la Tabla 3.3, indican que el contenido de ligante recuperado corresponde a un 4,16 % del peso total del RAP.

Tabla 3.3: Resultados del ensayo de extracción de ligante. Fuente: [32]

Nombre del solvente utilizado	Tricloroetileno
Masa inicial (muestra con asfalto) [g] (M1)	2236,6
Masa agregado sin asfalto [g] (M2)	2127,4
Masa filtro inicial [g] (Mfi)	29,77
Masa filtro final [g] (Mff)	31,08
Material fino retenido en filtro [g] (M4)	1,31
Masa crisol inicial [g] (Mci)	80,43
Masa crisol con cenizas [g] (Mcf)	80,98
Contenido de cenizas crisol [g] (C)	0,55
Solvente recuperado [cm ³] (V1)	3360
Volumen alícuota [cm ³] (V2)	100
Material fino solvente recuperado [g] (M3)	18,48
Masa pétreo total (M2 + M3 + M4) [g] (pt)	2147,19
Contenido de asfalto (% ligante ref. al agregado) (B)	4,16

3.5. Selección de Emulsión

Se emplea una emulsión catiónica de quiebre lento clasificada como CSS-1h, debido a que su carga positiva, presenta una alta afinidad con los agregados comunes en Chile (agregados con alto porcentaje de sílice y carga negativa). Esta interacción favorece la afinidad de los materiales, mejorando la adhesión entre el asfalto-agregado. Además, la emulsión de quiebre lento proporciona un mayor tiempo de trabajabilidad en el laboratorio, permitiendo realizar el proceso de mezcla de manera adecuada antes de que la emulsión se rompa y pierda sus propiedades de dispersión.



Figura 3.13: Emulsión asfáltica antes de ser utilizada. Fuente: Elaboración Propia.

Se recomienda llevar un control de la forma de almacenaje de la emulsión, manteniendo una temperatura ambiente entre 3°C y 30°C . En el caso de guardarse en periodos largos, es posible realizar un mezclado mecánico periódico, a modo de ralentizar el proceso de fusión y no haya porciones significativas de asfalto y agua separados. De lo contrario es recomendable utilizar una emulsión nueva a modo de descartar como factor de variabilidad en resultados.

La emulsión es proporcionada por Productos Bituminosos. S.A., Probisa. la cual indica que dicha emulsión cumple tanto las especificaciones nacionales del MOP, Minvu y Serviu, como también normativas internacionales tal como ASTM D 2397. Esto ultimo es verificado en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4: Resultados del análisis de emulsión asfáltica. Fuente: [32]

Parámetro	Unidad	Valor	Especificación	Método
Viscosidad Saybolt Furol a 25°C	Ssf	29	Mín. 20 - Máx. 100	MC 8.302.12
Ensayo de estabilidad en almacenamiento, 24 hrs.	%	<1	Máx. 1,0	MC 8.302.5
Tamizado	%	0,03	Máx. 0,10	MC 8.302.5
Mezcla de cemento	%	<2	Máx. 2,0	MC 8.302.5
Ensayo de carga de partícula	-	Positiva	Positiva	MC 8.302.5
Destilación				
Aceite destilado por volumen de emulsión	%	0	Informar	MC 8.302.5
Residuo	%	60,7	Mín. 57	MC 8.302.5
Ensayo del residuo de la destilación				
Penetración a 25°C, 100g, 5 seg	0,1mm	46	Mín. 40 - Máx. 90	MC 8.302.3
Ductilidad 25°C, 5cm/min	cm	83	Mín. 40	MC 8.302.8
Solubilidad en tricloroetileno	%	>97,5	Mín. 97,5	MC 8.302.11
Ensayo de la mancha (30 % Xilol)	% Xilol	Negativo	Negativo	MC 8.302.7
Densidad a 25°C	kg/m ³	1,009	Informar	AASHTO T59

3.6. Selección de rejuvenecedor

Se utiliza el aditivo DANOX A-RJ como rejuvenecedor comercial (RC), el cual es una amina líquida de carácter corrosivo cuya formulación se basa en derivados de sebo (tallow derivative) cuya composición predominan compuestos como nitrilos, sebo y fracciones obtenidas por cortes de destilación. Este producto ha sido desarrollado por la empresa Kao Chemicals Europe, el cual fue específicamente formulado para contrarrestar la rigidez, fragilidad, y tendencia al agrietamiento prematuro que se presentan en mezclas con ligante envejecido. Está clasificado como un rejuvenecedor ha utilizar en mezclas calientes y tibias, sin embargo, se selecciona como aditivo experimental para conocer su influencia en la susceptibilidad a la humedad a pesar de que su utilización en mezclas frías no sea del todo adecuada, además de descubrir su compatibilidad con mezclas asfálticas frías.

El DANOX A-RJ actúa reconstituyendo la composición química del ligante envejecido presente en el RAP, disminuyendo su viscosidad y mejorando así la flexibilidad de la mezcla final. A diferencia de otros aditivos que se evaporan durante el proceso de mezclado, este rejuvenecedor permanece en la mezcla, facilitando su trabajabilidad y compatibilidad con el ligante original. [25].

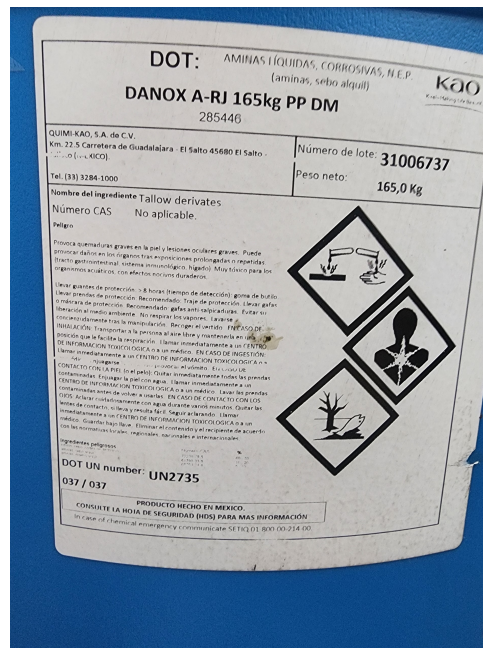


Figura 3.14: Hoja de seguridad adherida al barril de rejuvenecedor. Fuente: Elaboración Propia

3.7. Confección de la mezcla

Siguiendo el método propuesto en una investigación previa que adapta el uso del compactador giratorio y el ensayo TSR para mezclas asfálticas frías [32], se empleó una dosificación de agua de premezclado del 2 % y un contenido de emulsión del 6 %. Esto corresponde a un 4 % de agua óptima total y un 3,64 % de asfalto residual (60,7% de la emulsión) sobre la masa total del agregado.

Antes de incorporar el agua y la emulsión a la mezcla, se realiza un proceso de difusión del rejuvenecedor en los agregados reutilizados (RAP), ya que se ha visto que es mejor implementar el rejuvenecedor antes del agua ya que podría dificultar el acceso al ligante del RAP por su comportamiento hidrofóbico [21].

Cabe destacar que el volumen de rejuvenecedor incorporado fue considerado como parte del contenido total de agua de premezclado, bajo el supuesto de que su comportamiento durante el mezclado sería similar al del agua, actuando como agente lubricante entre los agregados. Esta decisión se basa en ensayos preliminares donde el rejuvenecedor fue añadido sin ajustar proporcionalmente el contenido de agua, lo que resultó en una saturación del volumen de vacíos en las probetas. Por lo tanto, durante la compactación se observó una evacuación significativa de agua y emulsión (Figura 3.15),

lo cual no solo podría afectar en la resistencia de la mezcla, sino que también implicaba un riesgo para el equipo de laboratorio (si bien se sabe que el compactador giratorio Superpave permite cierta evacuación de líquidos en comparación con otros métodos, se optó por evitar cualquier posibilidad de falla por presión hidrostática)

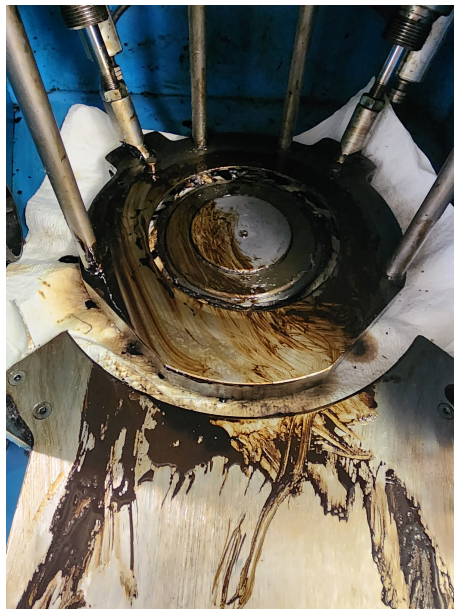


Figura 3.15: Líquido evacuado durante la compactación. Fuente: Elaboración Propia

La aplicación del rejuvenecedor se efectuó mediante un espray Figura 3.17 para asegurar una distribución homogénea con los agregados y el rejuvenecedor. Para esto el líquido es previamente calentado en baño maría de ser necesario Figura 3.16 hasta una temperatura de 25°C (temperatura ambiente) y la mezcla se realiza de forma pausada: al alcanzar la mitad, un tercio y un cuarto para las dosis 9%, 15% y 21% respectivamente, se efectúan mezclados rápidos, y una vez completada la dosificación, se continúa con un mezclado final de 2 minutos.



Figura 3.16: Líquido rejuvenecedor calentado a baño maría. Fuente: Elaboración Propia



Figura 3.17: Espray utilizado para aplicar el rejuvenecedor. Fuente: Elaboración Propia

Luego las mezclas preparadas son almacenadas en un horno a 25 °C durante un período de 5 días, permitiendo así una activación entre el ligante envejecido y el rejuvenecedor. Esta metodología se basa en un estudio previo que utilizó otro tipo de rejuvenecedor, donde concluyen que los efectos del rejuvenecimiento alcanzan su punto óptimo entre los días 5 y 7, ya que una exposición mayor puede generar una disminución en la resistencia a tracción indirecta [27].



Figura 3.18: RAP con cierta cohesión luego de ser mezclado con 21 % de rejuvenecedor.
Fuente: Elaboración Propia

Transcurrido el período de difusión, se procede a la confección de probetas o determinación de la densidad máxima teórica. En esta etapa, los agregados son mezclados con agua durante 2 minutos, seguidos por 2 minutos adicionales con emulsión. Inmediatamente después, la mezcla se coloca en los moldes y es compactada utilizando el compactador giratorio. Luego de la compactación, las probetas permanecen en el molde durante una hora hasta alcanzar una resistencia mínima que permita el desmolde (criterios similar aplicado en mezclas asfálticas en caliente). Y finalmente, las probetas son curadas en horno durante 3 días a 60 °C, conforme a comparaciones de métodos de curados según valor TSR [34].



Figura 3.19: Agregado mezclado con agua y emulsión. Fuente: Elaboración Propia



Figura 3.20: Probeta siendo desmoldada. Fuente: Elaboración Propia

3.8. Propiedades Volumétricas

Una vez confeccionadas las probetas, se procede a determinar sus propiedades volumétricas. La densidad máxima teórica y la densidad compactada son necesarias para cumplir con los requisitos establecidos en la norma ASTM D4867M-22 *Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Mixtures* [9], en lo referido al contenido de vacíos de aire. Asimismo, estas propiedades son necesarias para calcular la saturación de las probetas antes del ensayo TSR.

3.8.1. Densidad Máxima de la mezcla sin compactar

Siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM D2041M-19 *Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Asphalt Mixtures* [4], donde se pesa el matraz lleno de agua, la masa seca y el matraz con agua con mezcla sin vacíos, se determina la densidad máxima teórica de la mezcla según Ecuación 3.2, la cual representa la relación entre la masa total de la mezcla y su volumen, excluyendo el contenido de vacíos de aire. La densidad máxima teórica se calcula una única vez por diseño y se asume constante para todas las mezclas que comparten el mismo porcentaje de rejuvenecedor.

$$\text{Grav.Max.Teor.} = \frac{A}{A + D - E} \quad (3.1) \quad \rho_{mm} = \frac{A}{A + D - E} \times 997,0 \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (3.2)$$

Donde:

- Grav.Max.Teor.: Gravedad específica máxima teórica de la mezcla.
- ρ_{mm} : Densidad máxima teórica de la mezcla [kg/m³].
- A : Masa de la muestra seca en aire [g].
- D : Masa del recipiente y matraz lleno con agua a 25 °C [g].
- E : Masa del recipiente, la muestra y el agua a 25 °C [g].



Figura 3.21: Implementos utilizados para medir la densidad máxima teórica. Fuente: Elaboración Propia



Figura 3.22: Mezcla en matraz con el volumen de aire extraído. Fuente: Elaboración Propia

3.8.2. Densidad real de la mezcla compactada

Luego se calcula la densidad de real de la mezcla compactada según ASTM D2726: *Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Bituminous Mixtures* [5], utilizando la Ecuación 3.3.

$$\text{Dens.Real} = \frac{A}{B - C} \times 997,0 \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (3.3)$$

- $\frac{A}{B-C}$: Gravedad específica aparente.
- A : Masa de la probeta en aire [g].
- B : Masa de la probeta en aire con superficie seca [g].
- C : Masa de la probeta en agua [g].

Cabe destacar que la Ecuación 3.3 es solamente aplicable si se tiene una absorción de agua menor del 2%, utilizando la Ecuación 3.4.

$$\text{Porcentaje de agua absorbida} = \frac{B - A}{B - C} \times 100 \quad (3.4)$$

Con ambas densidades calculadas, es posible la obtención del porcentaje de vacíos de aire utilizando Ecuación 3.5, según lo establecido en ASTM D3203-22: *Standard Test Method for Percent Air Voids in Compacted Asphalt Mixtures* [7]. Y se debe verificar que cada probeta tenga $7\% \pm 1\%$ de vacíos de aire.

$$V_a = 100 \left(1 - \frac{\text{Grav.Esp.Ap}}{\text{Grav.Esp.Máx.Teor}} \right) \quad (3.5)$$

Donde:

- V_a : Porcentaje de vacíos de aire en la mezcla.
- Grav.Esp.Ap: Gravedad específica aparente de la mezcla compactada.
- Grav.Esp.Máx.Teor: Gravedad específica máxima teórica de la mezcla.

3.9. Procedimiento del Ensayo de Tracción Indirecta (TSR)

Para medir la susceptibilidad de las probetas, se utiliza como base la norma estándar ASTM D4867M-22 *Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Mixtures* [9], complementada con un procedimiento modificado de la norma AASHTO T 283. Este último es propuesto en el estudio por The Federal Lands Highway (FLH) [12], debido a que el acondicionamiento original puede resultar severo para las mezclas asfálticas frías. Lo anterior ha sido observado en otras investigaciones que trabajaron con el mismo tipo de material y metodología, donde utilizaron agregado virgen y las probetas presentaron índices de resistencia muy bajos o resultados nulos [32, 34].

En detalle, para cada caso de estudio, las probetas son compactadas, curadas y medidas

antes del ensayo, luego se establece dos subconjuntos de al menos tres probetas cada uno, recomendando la realización de una probeta adicional a modo de prueba.



Figura 3.23: Probetas medidas y listas para ensayo. Fuente: Elaboración Propia.

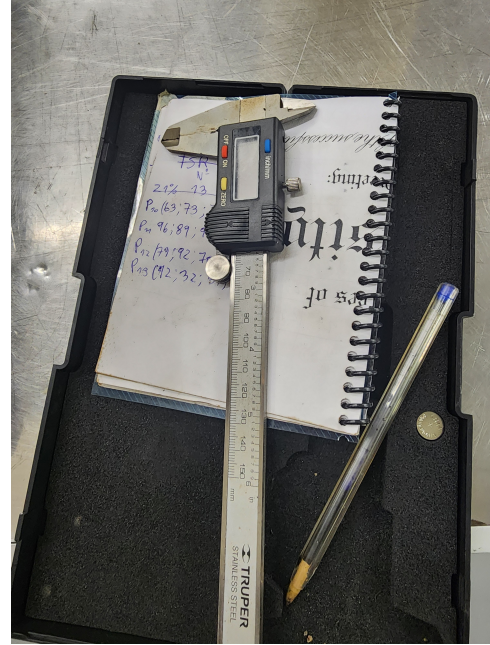


Figura 3.24: Instrumento utilizado para la medición. Fuente: Elaboración Propia.

El primer subconjunto corresponde al grupo de control (condición seca), mientras que el segundo es sometido a un acondicionamiento de humedad.

La variable que define los subconjuntos se basa en el porcentaje de vacíos de aire de cada muestra, buscando mantener una uniformidad que garantice la comparabilidad entre los resultados con dos subconjuntos cuyos vacíos promediados sean similares.

El proceso de acondicionamiento de las muestras húmedas comienza con la saturación parcial en una cámara de vacío. Las probetas son sumergidas en agua y sometidas a vacío por una cantidad de tiempo experimental (dicho tiempo es calculado con una probeta de prueba) , hasta alcanzar un grado de saturación entre 55 % y 75 %. A diferencia de la norma original que permite saturaciones de hasta 80 %, Si la muestra sobrepasa este valor, es descartada, mientras que si no alcanza el mínimo requerido, se repite el proceso de saturación.

Una vez alcanzada la saturación deseada, las probetas acondicionadas se sumergen durante 24 horas en un baño de agua a temperatura constante de $25 \pm 1^\circ\text{C}$. En paralelo, las muestras del grupo de control también se sumergen en agua a la misma temperatura por

un lapso de 20 minutos antes de ser ensayadas.

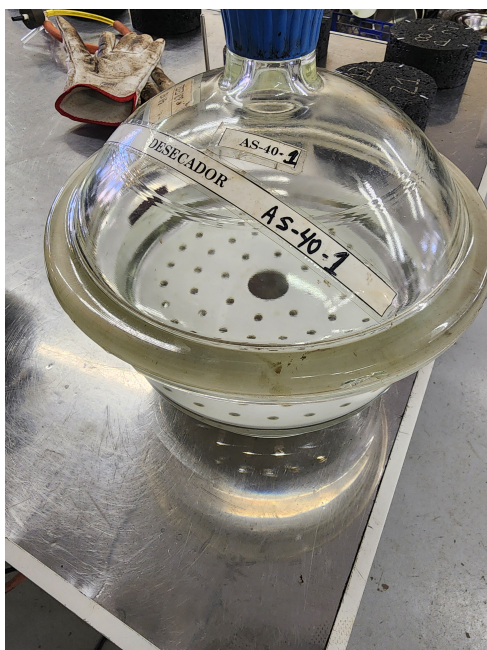


Figura 3.25: Cámara de vacío utilizada para el proceso de saturación. Fuente: Elaboración Propia.

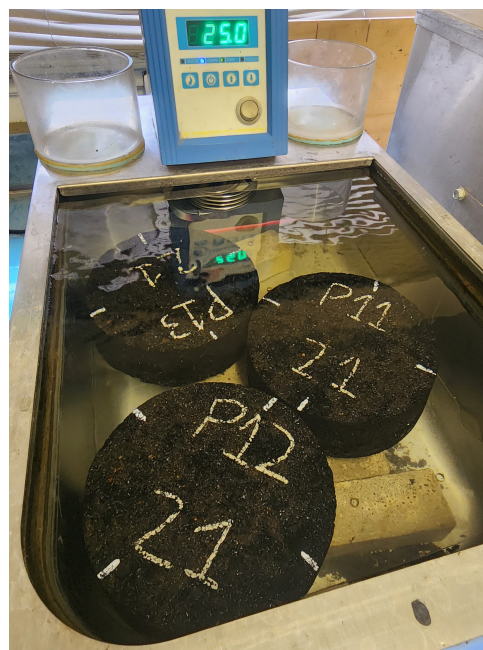


Figura 3.26: Probetas acondicionadas en baño de agua. Fuente: Elaboración Propia.

Previo a la aplicación de carga, en caso de las probetas saturadas, se miden las dimensiones y peso sumergido, contenido de vacíos y nivel de saturación. Luego, tanto las secas y saturadas se disponen horizontalmente bajo una prensa de ensaye o Máquina Marshall y se aplica una carga diametral a una velocidad constante de 50 [mm/min], hasta alcanzar la fractura de la muestra.

Finalmente se calcula el índice *Tensile Strength Ratio* (TSR), que se obtiene como la razón entre la resistencia (Ecuación 3.6) del grupo acondicionado y grupo de control, expresado como porcentaje utilizando la Ecuación 3.7.

$$ITS = \frac{2000 P}{\pi t D} \quad [\text{kPa}] \quad (3.6)$$

Donde:

- ITS : Resistencia a la tracción, [kPa].
- P : Carga máxima, [N].
- t : Altura de la probeta inmediatamente antes del ensayo de tracción, [mm].

- D : Diámetro de la probeta, [mm].

$$TSR = \frac{ITS_{\text{húmedo}}}{ITS_{\text{seco}}} \cdot 100[\%] \quad (3.7)$$

Donde,

- TSR : Razón de Tracción Indirecta.
- $ITS_{\text{húmedo}}$: Promedio de las resistencias a tracción de las probetas acondicionadas/humedas, [kPa].
- ITS_{seco} : Promedio de las resistencias a tracción de las probetas de control/seca, [kPa].

4 | Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos del análisis de la susceptibilidad a la humedad de las mezclas asfálticas mediante el ensayo de Resistencia a la Tracción Indirecta (TSR), evaluando distintos niveles de dosificación del agente rejuvenecedor. Se consideraron un total de cuatro casos de estudio: una mezcla asfáltica fría tradicional sin adición de rejuvenecedor (caso de control) y tres mezclas modificadas con dosificaciones de 9 %, 15 % y 21 % de líquido rejuvenecedor, expresadas en función del contenido de ligante envejecido presente en el material reutilizado (RAP).

Específicamente, cada subsección incluye la distribución de los materiales empleados, el cálculo de la densidad máxima teórica de la mezcla suelta, el contenido de vacíos de aire y finalmente el índice TSR.

Para la identificación de las probetas se adoptó una codificación estructurada del tipo D-X-Y-Z, donde:

- D representa que la mezcla fue utilizada para el cálculo de la densidad máxima teórica; si la mezcla no fue usada para este fin, esta letra es omitida.
- X representa el porcentaje de agregado reutilizado (RAP) utilizado.
- Y indica el porcentaje de líquido rejuvenecedor aplicado.
- Z corresponde al número identificador de la probeta.

Cabe señalar que algunos números de identificación podrían no encontrarse presentes, lo que se debe a que ciertas probetas fueron descartadas durante el proceso por no cumplir requerimientos del ensayo como: sobre saturación, falta o exceso de porcentaje de vacíos de aire o densidades y resistencias que variaron más que las tolerancias admitidas por la repetición del ensayo por un solo operador según el estándar de las normas.

4.1. Caso de Control: Mezcla sin Rejuvenecedor

Se presentan los resultados del ensayo TSR correspondiente a la mezcla asfáltica fría sin adición de líquido rejuvenecedor. Los valores de resistencia a la tracción indirecta en condición seca fueron tomados de estudios previos [32, 34], mientras que los valores en condición húmeda fueron obtenidos en esta investigación (debido a la diferencia del procedimiento de acondicionamiento en estado saturado).

Para la confección de probetas se utiliza la Tabla 4.1 y el valor utilizado para la densidad máxima teórica es 2341,7 [kg/m³] [32].

Tabla 4.1: Distribución de agregados para mezcla con solamente RAP. Fuente: Elaboración Propia

Componente	Masa [g]
1/2"	278,7
3/8"	232,3
4"	627,1
8"	361,6
Residuo	813,0
Agua	37,9
Emulsión	139,4
RAP Total	2322,7
Masa Total	2500

La Tabla 4.2 muestra detalle del porcentaje de vacíos de las probetas ensayadas.

Tabla 4.2: Cálculo de densidad real y vacíos de aire para mezcla sin rejuvenecedor. Fuente: Elaboración Propia

Prob.	A [g]	C [g]	B [g]	Abs. [%]	Dens.	ρ_{mm}	% Vacíos
100-0-1	2387,6	1300,4	2398,8	1,0	2174	2342	7,17
100-0-2	2391,5	1301,7	2401,3	0,9	2175	2342	7,12
100-0-3	2391,5	1305,4	2402,1	1,0	2181	2342	6,88
100-0-4	2388,9	1301,1	2399,8	1,0	2175	2342	7,13

4.1.1. Índice TSR

La Tabla 4.3 presenta el cálculo del índice TSR para la mezcla sin rejuvenecedor. En este ensayo se utilizaron las probetas identificadas como 100-0-1, 100-0-2, 100-0-3 y 100-0-4. No obstante, la primera fue descartada del análisis debido a una saturación inicial que supera el 75 % (criterio que considera la probeta como dañada). El valor promedio de resistencia en condición seca es de 483,12[kPa], mientras que en condición saturada fue de 380,12 [kPa], lo que se traduce en un índice TSR del 79 %.

Tabla 4.3: Resumen de resultados del ensayo TSR para mezcla con 0% de rejuvenecedor
Fuente: Elaboración Propia

Probeta	031	032	033	100-0-1	100-0-2	100-0-3	100-0-4
Diámetro [mm] D	149	149,6	149,9	150	150	150	150
Espesor [mm] t	63,9	64,0	64,0	63,5	63,9	63,8	63,7
Masa seca [g] A	2398,2	2401,7	2400,0	2387,6	2391,5	2391,5	2388,9
Masa SSD [g] B	2407,2	2414,0	2409,6	2398,8	2401,3	2402,1	2399,8
Masa sumergida [g] C	1311	1316,2	1313,3	1300,4	1301,7	1305,4	1301,3
Volumen ($B - C$) E	1096,2	1097,8	1096,6	1098,4	1099,7	1096,7	1098,5
Grav.Esp. Bruta (A/E) F	2,188	2,188	2,189	2,174	2,175	2,181	2,175
Max. Grav. Esp. G	2,342	2,342	2,342	2,342	2,342	2,342	2,342
% Vacíos ($100(G-F)/G$) H	6,6	6,6	6,5	7,17	7,12	6,88	7,13
Volumen vacíos I ($HE/100$)	72,1	72,2	71,4	78,8	78,3	75,4	78,3
Lectura Dial L	159	157	155	-	-	-	-
Carga [N] P	7345	7257	7169	-	-	-	-
Saturada inicialmente entre 55% y 75%							
Masa SSD [g] B'	-	-	-	2449,4	2448,1	2445,7	2445,4
Masa sumergida [g] C'	-	-	-	1353,0	1348,4	1349,7	1348,4
Volumen ($B' - C'$) E'	-	-	-	1096,4	1099,6	1096,0	1097,0
Vol. Abs. Agua ($B' - A$) J'	-	-	-	61,80	56,60	54,20	56,50
% Saturación ($100 J'/I$)	-	-	-	78,43	72,26	71,85	72,12
% Expansión ($100(E' - E)/E$)	-	-	-	-0,18	0,01	-0,06	-0,14
Acondicionada 24 [h] a 25°C							
Espesor [mm] t_9	-	-	-	63,66	63,91	63,70	63,54
Masa seca [g] B_9	-	-	-	2460,70	2459,00	2456,80	2456,50
Masa SSD [g] C_9	-	-	-	1359,10	1353,80	1354,40	1356,10
Volumen ($B_9 - C_9$) E_9	-	-	-	1101,60	1105,20	1102,40	1100,40
Vol. Abs. Agua ($B_9 - A$) J_9	-	-	-	73,10	67,50	65,30	67,60
% Saturación, ($100.J_9/I$)	-	-	-	92,77	86,17	86,57	86,29
% Expansión, $100(E_9 - E)/E$	-	-	-	0,29	0,51	0,52	0,17
Lectura Dial	159	157	155	109	129	127	112
Carga [N]	7345,00	7257,00	7169,00	5089,65	5911,86	5903,60	5226,95
Resistencia Seca [kPa]	491,12	482,53	475,73	-	-	-	-
Resistencia Húmeda [kPa]	-	-	-	339,35	397,89	393,35	349,12
TSR	79%						

4.2. Mezcla con 9% de Líquido Rejuvenecedor

Esta dosificación corresponde a la menor cantidad evaluada y su objetivo es observar el comportamiento inicial del material frente a la humedad bajo condiciones moderadas de rejuvenecimiento. En la Tabla 4.4 se presentan dos distribuciones de agregados utilizados,

donde la masa de RAP es 2295,5 [g] y corresponde a la cantidad calibrada para obtener una probeta con 7 % de vacíos, mientras que la masa de 2136,9 [g] es aquella utilizada para la determinación de la densidad máxima teórica suelta. La cantidad de líquido rejuvenecedor es denominada como RC (Rejuvenecedor Comercial) con 8 [g] y 8,61 [g] para los ensayos indicados.

Tabla 4.4: Distribución de agregados para mezcla con 9 % de líquido rejuvenecedor Fuente: Elaboración Propia.

Densidad Máxima Teórica		Confección de Probetas	
Componente	Masa [g]	Componente	Masa [g]
1/2"	256,4	1/2"	275,9
3/8"	213,7	3/8"	230,0
4"	576,9	4"	620,8
8"	341,9	8"	367,9
Residuo	748,0	Residuo	804,9
RC	8,0	RC	8,61
Agua	26,9	Agua	28,9
Emulsión	128,2	Emulsión	138,0
RAP Total	2136,9	RAP Total	2295,5
Masa Total	2300	Masa Total	2475

4.2.1. Densidad Máxima teórica

La mezcla con el menor porcentaje de líquido rejuvenecedor muestra una diferencia respecto al caso comparativo sin líquido, evidenciando que de cierta manera este último tiene influencia en la densidad de la mezcla. Con una densidad máxima suelta de 2332.1 [kg/m³] como se muestra en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5: Densidad máxima teórica de mezcla suelta Fuente: Elaboración Propia.

Mezcla	A [g]	D [g]	E [g]	ρ_{mm} [kg/m ³]	Prom- ρ_{mm} [kg/m ³]
D-100-9-1	2213,8	5837,3	7107,4	2339,1	
D-100-9-2	2214,3	5837,3	7103,5	2328,7	
D-100-9-3	2215,1	5837,3	7103,9	2328,6	2332.1

4.2.2. Densidad real compactada

Para proceder a medir la susceptibilidad a la humedad, se debe verificar el cumplimiento de 7% de vacíos de aire y por lo tanto se determina la densidad real de cada probeta compactada.

En la Tabla 4.6 se presentan los valores obtenidos para seis probetas con 9% de líquido rejuvenecedor, indicando la masa al aire (A), masa saturada con superficie seca (B), masa sumergida (C), la absorción de agua, la densidad real y el porcentaje de vacíos de aire resultante.

Tabla 4.6: Cálculo de densidad real y vacíos de aire para mezcla con 9% de rejuvenecedor.

Fuente: Elaboración Propia.

Prob.	A [g]	C [g]	B [g]	Abs. [%]	Dens.	ρ_{mm}	% Vacíos
100-9-8	2375,9	1300,6	2390,8	1,4	2179	2332	6,6
100-9-9	2386,4	1308,4	2400,8	1,3	2185	2332	6,3
100-9-13	2386,8	1303,4	2398,4	1,1	2180	2332	6,5
100-9-14	2378,8	1301,4	2395,4	1,5	2174	2332	6,8
100-9-15	2376,2	1293,0	2393,3	1,3	2165	2332	7,1
100-9-16	2375,5	1294,1	2389,4	1,3	2169	2332	7,0

4.2.3. Índice TSR

Una vez verificado que todas las probetas cumplen con el rango requerido de vacíos de aire, se procede al cálculo del índice TSR. En la Tabla 4.7 se presentan los resultados obtenidos para los dos subconjuntos evaluados, cada uno compuesto por tres probetas. Las probetas identificadas como 100-9-14, 100-9-9 y 100-9-8 corresponden a la condición seca, mientras que las probetas 100-9-15, 100-9-16 y 100-9-13 fueron sometidas a acondicionamiento húmedo.

En ambos grupos, para la condición seca se tiene un promedio de 255,25 [kPa] y 175,66 [kPa] para la condición saturada. Se observa una disminución en la resistencia respecto al caso de control sin rejuvenecedor, lo que indica que la incorporación del aditivo tiende a reblandecer el ligante envejecido presente en el RAP. No obstante, el índice de TSR resultante se incrementa levemente, alcanzando un valor del 69%, lo cual sugiere una mejora en la resistencia al daño por humedad en comparación con la mezcla tradicional.

Tabla 4.7: Resumen de resultados del ensayo TSR para mezcla con 9% de rejuvenecedor.

Fuente: Elaboración Propia

Probeta	100-9-14	100-9-9	100-9-8	100-9-15	100-9-16	100-9-13
Diámetro [mm] D	150	150	150	150	150	150
Espesor [mm] t	63,5	63,4	63,3	63,9	63,2	63,3
Masa seca [g] A	2378,8	2386,4	2375,9	2376,2	2375,5	2386,8
Masa SSD [g] B	2395,4	2400,8	2389,8	2390,3	2389,4	2398,4
Masa sumergida [g] C	1301,4	1308,4	1300,6	1293,0	1294,1	1303,4
Volumen (B-C) E	1094,0	1092,4	1089,2	1097,3	1095,3	1095,0
Grav.Esp. Bruta (A/E) F	2,174	2,185	2,179	2,165	2,168	2,180
Max. Grav. Esp. G	2,332	2,332	2,332	2,332	2,332	2,332
% Vacíos $(100(G-F)/G)$ H	6,8	6,3	6,6	7,15	7,00	6,54
Volumen vacíos I $(HE/100)$	74,0	69,1	71,4	78,4	76,7	71,6
Lectura Dial	86	81	76	51	53	60
Carga [N] P	4050	3825	3599	-	-	-
Saturada inicialmente entre 55% y 75%						
Masa SSD [g] B'	-	-	-	2431,7	2431,2	2436,2
Masa sumergida [g] C'	-	-	-	1337,0	1333,6	1339,2
Volumen $(B' - C')$ E'	-	-	-	1094,7	1097,6	1097,0
Vol. Abs. Agua $(B' - A)$ J'	-	-	-	55,50	57,05	49,40
% Saturación $(100 J'/I)$	-	-	-	70,79	72,61	69,03
% Expansión $(100(E' - E)/E)$	-	-	-	-0,24	0,21	0,18
Acondicionada 24 [h] a 25 °C						
Espesor [mm] t_9	-	-	-	63,78	63,62	63,59
Masa seca [g] B_9	-	-	-	2440,10	2438,40	2444,60
Masa SSD [g] C_9	-	-	-	1342,60	1340,90	1345,90
Volumen $(B_9 - C_9)$ E_9	-	-	-	1097,50	1097,50	1098,70
Vol. Abs. Agua $(B_9 - A)$ J_9	-	-	-	63,90	62,90	57,80
% Saturación, $(100.J_9/I)$	-	-	-	81,50	82,00	80,77
% Expansión, $100(E_9 - E)/E$	-	-	-	0,02	0,20	0,34
Lectura Dial	86	81	76	51	53	60
Carga [N]	4050,15	3824,59	3599,04	2471,28	2559,54	2873,35
Resistencia Seca [kPa]	270,91	255,90	238,93	-	-	-
Resistencia Húmeda [kPa]	-	-	-	164,44	170,75	191,78
TSR	69%					

4.3. Mezcla con 15% de Líquido Rejuvenecedor

Esta sección contiene los resultados correspondientes a la mezcla modificada con un 15% de líquido rejuvenecedor. Se considera una dosificación intermedia que busca descubrir si

existe una optimización o punto medio entre rejuvenecimiento del ligante envejecido y la susceptibilidad a la humedad. La Tabla 4.4 se presentan dos distribuciones de agregados utilizados, donde la masa de rap 2295,5 [g] corresponde a la cantidad calibrada para obtener una probeta con 7% de vacíos, mientras que la masa de 2136,9 [g] es aquella utilizadas para la determinación de la densidad máxima teórica suelta. Ambas cantidades son las mismas respecto a lo utilizado en el caso de 9%, lo que significa que con la misma cantidad de agregado los vacíos de aire de la probeta siguen dentro del rango. La única diferencia es la cantidad de liquido, que en este caso es de 13,3 [g] y 14,35 [g] para densidad y probetas respectivamente.

Tabla 4.8: Distribución de agregados para mezcla con 15% de líquido rejuvenecedor. Fuente: Elaboración Propia

Densidad Máxima Teórica

Componente	Masa [g]
1/2"	256,4
3/8"	213,7
4"	576,9
8"	341,9
Residuo	748,0
RC	13,3
Agua	21,5
Emulsión	128,2
RAP Total	2136,9
Masa Total	2300

Confección de Probetas

Componente	Masa [g]
1/2"	275,9
3/8"	230,0
4"	620,8
8"	367,9
Residuo	804,9
RC	14,35
Agua	23,2
Emulsión	138,0
RAP Total	2299,5
Masa Total	2475

4.3.1. Densidad Maxima teorica

En el caso de la mezcla con 15% de líquido rejuvenecedor, se observa un leve incremento en la densidad máxima teórica de la mezcla suelta en comparación con la mezcla que contiene 9% de rejuvenecedor. Tal como se detalla en la Tabla 4.9, el valor promedio alcanzado fue de 2338,6 [kg/m³], lo que representa una variación mínima respecto al caso anterior (2332,1 [kg/m³]).

Tabla 4.9: Densidad máxima teórica de mezcla suelta para mezcla con 15 % de líquido rejuvenecedor. Fuente: Elaboración Propia.

Mezcla	A [g]	D [g]	E [g]	ρ_{mm} [kg/m ³]	Prom- ρ_{mm} [kg/m ³]
D-100-15-1	2219,6	5837,3	7110,7	2339,0	2338,6
D-100-15-2	2220,0	5837,3	7110,1	2337,0	
D-100-15-3	2219,1	5837,3	7110,7	2339,7	

4.3.2. Densidad real compactada

Al igual que en el caso con 9 % de líquido rejuvenecedor, se calculan las densidades reales y el porcentaje de vacíos de aire para cada probeta con 15 % de rejuvenecedor. En la Tabla 4.10 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 4.10: Cálculo de densidad real y vacíos de aire para mezcla con 15 % de rejuvenecedor. Fuente: Elaboración Propia

Prob.	A [g]	C [g]	B [g]	Abs. [%]	Dens.	ρ_{mm}	% Vacíos
100-15-1	2393,3	1309,2	2404,9	1,1	2184	2339	6,60
100-15-2	2402,6	1321,1	2417,8	1,4	2191	2339	6,32
100-15-3	2388,4	1304,6	2401,5	1,2	2177	2339	6,89
100-15-4	2397,7	1314,9	2412,3	1,3	2185	2339	6,55
100-15-5	2394,1	1311,2	2407,2	1,2	2181	2339	6,59
100-15-6	2390,6	1310,7	2406,8	1,2	2181	2339	6,74
100-15-7	2379,7	1298,3	2396,5	1,5	2167	2339	7,34

4.3.3. Índice TSR

En la Tabla 4.11, se muestra los resultados asociados al cálculo del índice TSR, donde las probetas identificadas como 100-15-1, 100-15-3 y 100-15-6 corresponden a la condición seca, mientras que las probetas 100-15-2, 100-15-4 100-15-5 y 100-15-7 fueron sometidas a acondicionamiento húmedo. Se consideran 4 probetas en el subconjunto húmedo debido a que la probeta de prueba (100-15-7) cumple con el porcentaje de saturación y vacíos de aire, por lo que se considera en el cálculo del promedio de resistencia saturada. Por otro lado es importante notar que la probeta 100-15-2 presenta una saturación final de 74,9 % no llegando a alcanzar el 75 % deseable, sin embargo debido a su valor aproximado y que el valor de resistencia es similar a sus pares, se decide por aceptar el resultado de dicha

probeta y que su saturación puede considerarse aproximadamente 75 %.

Los valores promediados de resistencia seca es 143,92 [kPa] y 124,8 [kPa] para la condición saturada, representando un índice TSR de 87 %, lo cual significa un aumento en un 18 %. Esto reafirma el efecto del rejuvenecedor como agente reductor de rigidez..

Tabla 4.11: Resumen de resultados del ensayo TSR para mezcla con 15 % de rejuvenecedor.

Fuente: Elaboración Propia

Probeta	100-15-1	100-15-3	100-15-6	100-15-2	100-15-4	100-15-5	100-15-7
Diámetro [mm] D	150	150	150	150	150	150	150
Espesor [mm] t	63,56	63,60	63,40	63,59	63,55	63,65	63,85
Masa seca [g] A	2393,3	2388,4	2390,6	2402,6	2397,7	2394,1	2379,7
Masa SSD [g] B	2404,9	2401,5	2406,8	2417,8	2412,1	2407,2	2396,5
Masa sumergida [g] C	1309,2	1304,6	1310,7	1321,1	1314,9	1311,2	1298,3
Volumen (B-C) E	1095,7	1096,9	1096,1	1096,7	1097,2	1096,0	1098,2
Grav.Esp. Bruta (A/E) F	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
Max. Grav. Esp. G	2,34	22,34	2,34	2,34	2,34	2,34	2,34
% Vacíos (100(G-F)/G) H	6,6	6,9	6,7	6,3	6,6	6,6	7,3
Volumen vacíos I (HE/100)	72,3	75,6	73,8	69,3	71,9	72,2	80,6
Lectura Dial	46	47	39	40	40	38	33
Carga [N] P	2246	2285	1932	-	-	-	-
Saturada inicialmente entre 55 % y 75 %							
Masa SSD [g] B'	-	-	-	2449,5	2447,8	2447,9	2438,3
Masa sumergida [g] C'	-	-	-	1351,3	1351,6	1352,2	1338,0
Volumen ($B' - C'$) E'	-	-	-	1098,2	1096,2	1095,7	1100,3
Vol. Abs. Agua ($B' - A$) J'	-	-	-	46,9	50,1	53,8	58,6
% Saturación (100 J'/I)	-	-	-	67,66	69,67	74,47	72,70
% Expansión (100($E' - E$)/ E)	-	-	-	0,14	-0,09	-0,03	0,19
Acondicionada 24 [h] a 25 °C							
Espesor [mm] t_9	-	-	-	63,60	63,58	63,55	63,75
Masa seca [g] B_9	-	-	-	2454,5	2454,2	2453,2	2442,0
Masa SSD [g] C_9	-	-	-	1356,3	1358,0	1357,3	1341,7
Volumen ($B_9 - C_9$) E_9	-	-	-	1098,2	1096,2	1095,9	1100,3
Vol. Abs. Agua ($B_9 - A$) J_9	-	-	-	51,9	56,5	59,1	62,3
% Saturación, (100 J_9/I)	-	-	-	74,88	78,57	81,80	77,29
% Expansión, 100($E_9 - E$)/ E	-	-	-	0,14	-0,09	-0,01	0,19
Lectura Dial	46	47	39	40	40	38	33
Carga [N]	2245,72	2284,95	1931,91	1971,14	1971,14	1883	1657,32
Resistencia Seca [kPa]	149,97	152,48	129,33	-	-	-	-
Resistencia Húmeda [kPa]	-	-	-	131,54	131,58	125,75	110,33
TSR	87 %						

4.4. Mezcla con 21 % de Líquido Rejuvenecedor

Finalmente, se presentan los resultados correspondientes a la mayor dosificación de líquido rejuvenecedor considerada en esta investigación. Esta proporción tiene como objetivo evaluar un efecto rejuvenecedor mas intenso, para evidenciar posibles ventajas o desventajas de altos porcentajes.

Para la determinación de la densidad máxima teórica, se mantiene constante la masa total de la mezcla (considerando agua, rejuvenecedor, emulsión y agregados), ya que este ensayo es independiente de la cantidad material empleada. En cambio, en la confección de probetas se reduce la masa total de agregados con respecto a las dosificaciones anteriores. En probetas de pruebas se observaron valores de vacíos de aire inferiores al rango aceptable de $7\% \pm 1\%$. Por lo tanto, se disminuyó la masa de mezcla y se mantuvo constante la altura de compactación en 63 [mm], generando una probeta que tuviera menos material en un mismo volumen y por lo tanto generando un incremento de vacíos.

En cuanto al rejuvenecedor, se utilizaron 18,67 [g] para el ensayo de densidad y 19,89 [g] para la confección de probetas. En ambos casos, la cantidad de agua de premezcla se ajustó restando el peso de rejuvenecedor añadido, resultando en los valores mostrados en la Tabla 4.12.

Tabla 4.12: Distribución de agregados para mezcla con 21 % de líquido rejuvenecedor. Fuente: Elaboración Propia

Densidad Máxima Teórica

Componente	Masa [g]
1/2"	256,4
3/8"	213,7
4"	576,9
8"	341,9
Residuo	748,0
RC	18,67
Agua	16,2
Emulsión	128,2
RAP Total	2136,9
Masa Total	2300

Confección de Probetas

Componente	Masa [g]
1/2"	273,1
3/8"	227,7
4"	614,6
8"	364,2
Residuo	796,7
RC	19,89
Agua	17,3
Emulsión	136,6
RAP Total	2276,2
Masa Total	2450

4.4.1. Densidad Máxima teórica

Para la mezcla con 21 % de líquido rejuvenecedor, se obtuvo una densidad máxima teórica de 2323,4 [kg/m³], como se muestra en la Tabla 4.13. Este valor resulta ligeramente inferior a los obtenidos en las mezclas con 9 % y 15 % de líquido. Esta leve diferencia podría deberse a que el procedimiento experimental no logra capturar con precisión el efecto del aumento de rejuvenecedor sobre la densidad, especialmente al no contar con equipos que aseguren una extracción completa del aire durante la agitación mecánica. Además, es posible que la variabilidad experimental sea mucha a pesar de cumplir con la tolerancias en los estándares normativos. Sería necesaria una mayor cantidad de ensayos para determinar si el incremento en la dosificación de rejuvenecedor genera un aumento proporcional en la densidad, o si existe un punto de saturación a partir del cual este valor disminuye. A pesar de ello, puede interpretarse que las densidades máximas teóricas obtenidas en las tres dosificaciones evaluadas son similares, lo que sugiere que la influencia del rejuvenecedor sobre este parámetro leve.

A modo de aclaración las mezclas con prefijo D2 corresponden a una segunda serie de muestras, realizada específicamente para cumplir con la reproducibilidad de los resultados, ya que las primeras mezclas no cumplían adecuadamente.

Tabla 4.13: Densidad máxima teórica de mezcla suelta para mezcla con 21 % de líquido rejuvenecedor. Fuente: Elaboración Propia

Mezcla	A [g]	D [g]	E [g]	ρ_{mm} [kg/m ³]	Prom- ρ_{mm} [kg/m ³]
D2-100-21-1	2222,9	5837,3	7104,6	2319,4	2323,4
D2-100-21-2	2223,4	5837,3	7108,2	2327,5	
D-100-21-2	2226,9	5837,3	7108,5	2323,4	

4.4.2. Densidad real compactada

En la Tabla 4.14 se presentan los resultados de densidad real y porcentaje de vacíos de aire para las probetas confeccionadas con 21 % de líquido rejuvenecedor.

Tabla 4.14: Cálculo de densidad real y vacíos de aire para mezcla con 21 % de rejuvenecedor. Fuente: Elaboración Propia

Probeta	A [g]	C [g]	B [g]	Abs. [%]	Dens.	ρ_{mm}	% Vacíos
100-21-15	2387,1	1297,4	2392,0	0,4	2181	2323	6,14
100-21-16	2377,3	1291,3	2385,8	0,8	2172	2323	6,52
100-21-18	2385,7	1298,8	2393,1	0,7	2180	2323	6,17
100-21-19	2380,5	1294,4	2387,8	0,7	2177	2323	6,30
100-21-20	2379,6	1294,1	2386,4	0,6	2179	2323	6,24
100-21-21	2385,3	1299,4	2392,4	0,6	2182	2323	6,07

4.4.3. Índice TSR

En la Tabla 4.15 se presentan los resultados del ensayo TSR para la mezcla con 21 % de líquido rejuvenecedor. El valor promedio de resistencia en condición seca fue de 68,48 [kPa], mientras que para la condición saturada fue de 77,57 [kPa], resultando en un índice TSR de 113 %. Este valor sugiere que la condición húmeda es incluso más favorable que la seca, o bien que ambas condiciones presentan resistencias similares, indicando que la susceptibilidad a la humedad no representa un factor determinante en este caso. También se evidencia un efecto de reblandecimiento excesivo del ligante, ya que el líquido no sólo actúa sobre el RAP envejecido, sino que también podría estar afectando el asfalto presente en la emulsión, reduciendo las resistencias mecánicas tanto en estado seco como saturado.

Tabla 4.15: Resumen de resultados del ensayo TSR para mezcla con 21 % de rejuvenecedor.

Fuente: Elaboración Propia

Probeta	100-21-15	100-21-16	100-21-18	100-21-19	100-21-20	100-21-21
Diámetro [mm] D	150	150	150	150	150	150
Espesor [mm] t	63,4	63,5	63,4	63,7	63,5	63,5
Masa seca [g] A	2387,1	2377,3	2385,7	2380,5	2379,6	2385,3
Masa SSD [g] B	2392,0	2385,8	2393,1	2387,8	2386,4	2392,4
Masa sumergida [g] C	1297,4	1291,3	1298,8	1294,4	1294,1	1299,4
Volumen (B-C) E	1094,6	1092,5	1094,3	1093,4	1092,3	1093,0
Grav.Esp. Bruta (A/E) F	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
Max. Grav. Esp. G	2,323	2,323	2,323	2,323	2,323	2,323
% Vacíos (100(G-F)/G) H	6,1	6,5	6,2	6,3	6,2	6,1
Volumen vacíos I (HE/100)	67,2	71,3	67,5	68,8	68,1	66,4
Lectura Dial	17	19	21	-	-	-
Carga [N] P	931,63	1019,89	1117,96	-	-	-
Saturada inicialmente entre 55 % y 75 %						
Masa SSD [g] B'	-	-	-	2430,0	2427,7	2434,5
Masa sumergida [g] C'	-	-	-	1337,3	1336,6	1343,6
Volumen ($B' - C'$) E'	-	-	-	1092,7	1091,1	1090,9
Vol. Abs. Agua ($B' - A$) J'	-	-	-	49,5	48,1	49,2
% Saturación (100 J'/I)	-	-	-	71,91	70,60	74,12
% Expansión (100($E' - E$)/ E)	-	-	-	-0,06	-0,11	-0,19
Acondicionada 24 [h] a 25 °C						
Espesor [mm] t_9	-	-	-	63,53	63,43	63,51
Masa seca [g] B_9	-	-	-	2435,6	2434,0	2441,5
Masa SSD [g] C_9	-	-	-	1342,9	1342,8	1349,5
Volumen ($B_9 - C_9$) E_9	-	-	-	1092,7	1091,2	1092,0
Vol. Abs. Agua ($B_9 - A$) J_9	-	-	-	55,1	54,4	56,2
% Saturación, (100. J_9/I)	-	-	-	80,04	79,85	84,67
% Expansión, 100($E_9 - E$)/ E	-	-	-	-0,06	-0,10	-0,09
Lectura Dial	17	19	21	23	23	20
Carga [N]	931,63	1019,89	1117,96	1206,22	1206,22	1068,93
Resistencia Seca [kPa]	62,41	68,16	74,87	-	-	-
Resistencia Húmeda [kPa]	-	-	-	80,59	80,71	71,43
TSR	113 %					

4.5. Análisis de Resultados

En la Figura 4.1 se presenta el resumen de los resultados del ensayo TSR, donde se observa una disminución progresiva en las resistencias secas y saturadas a medida que se incrementa la dosificación de líquido rejuvenecedor. Paralelamente, se aprecia un aumento progresivo en el índice TSR con el incremento del rejuvenecedor, salvo en el caso de la mezcla sin líquido respecto al caso con 9 %, el cual presenta un valor de TSR aproxima-

damente 10% superior. Este comportamiento sugiere la posible existencia de un rango de dosificación del rejuvenecedor en el cual tanto la susceptibilidad y resistencia se ve perjudicada.

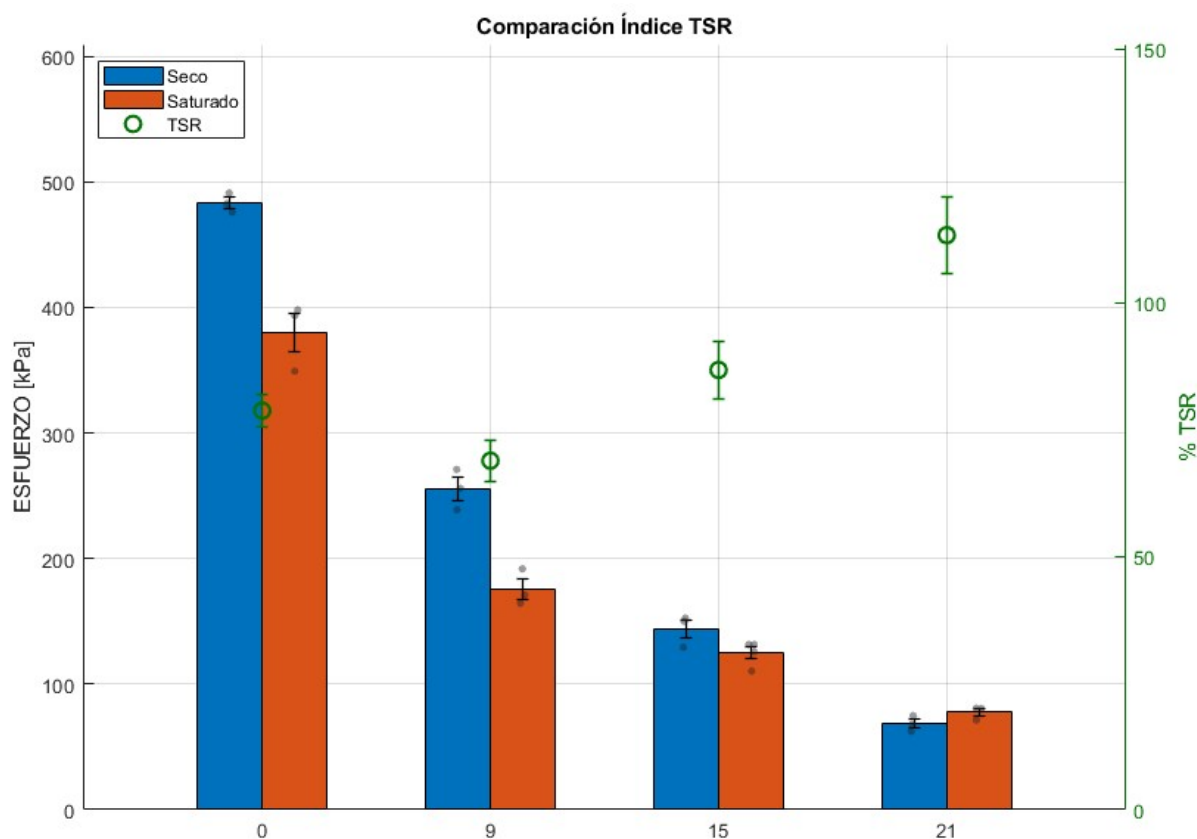


Figura 4.1: Gráfica resumen de los resultados de TSR con error estándar. Fuente: Propia

El aumento del índice TSR podría atribuirse a la composición química del líquido rejuvenecedor, perteneciente a la familia de los poliaminos [25]. Púes, en condiciones de humedad, los hidróxidos presentes en la superficie de los agregados silíceos tienden a reaccionar con las moléculas de agua, lo que debilita el enlace químico entre el ligante asfáltico y el árido. Sin embargo, los componentes alcalinos del tipo amina presentes en el rejuvenecedor pueden intervenir en esta interacción, formando enlaces polares entre la sílice del árido y el asfalto, lo que bloquea la reacción con el agua y mejora la adhesión en condiciones húmedas [14, 23].

Por otro lado, la disminución de la resistencia podría explicarse por una activación excesiva del ligante envejecido presente en el RAP, lo cual genera una pérdida de rigidez originalmente aportada por dicho material. Esta activación, sumada al contenido adicional de ligante aportado por la emulsión, podría provocar un exceso de ligante efectivo en la

mezcla, comportándose como si se tratara de una dosificación superior a la óptima. Esto es coherente con los resultados obtenidos en la etapa de diseño [32, 34], donde se observó que, al superar cierto porcentaje de emulsión, tanto el índice de TSR y las resistencias comienzan a decrecer, dejando de representar una condición óptima.

Otra posible explicación es que la dosis óptima del líquido rejuvenecedor sea inferior al 9%, y que los resultados obtenidos en esta investigación reflejen condiciones de reblandecimiento excesivo. Esto es coherente con lo reportado en estudios previos, donde se ha observado que, al utilizar dosis óptimas de rejuvenecedor, puede producirse un incremento en la resistencia a la tracción indirecta. Sin embargo, al superar dicho umbral, las propiedades mecánicas comienzan a deteriorarse [17].

Es importante destacar que, en el diseño de mezclas asfálticas en caliente con RAP, el ligante envejecido contenido en el material reutilizado sí se considera parcialmente, ya que es reactivado a altas temperaturas, modificando su comportamiento y afectando directamente las proporciones de diseño. En contraste, en mezclas asfálticas frías, el diseño se realiza bajo la premisa de que el ligante envejecido no participa activamente, debido a que no se reblandece a las bajas temperaturas utilizadas en su preparación. Sin embargo, cuando se incorpora un rejuvenecedor, la situación cambia: el ligante del RAP es reactivado, permitiendo una redistribución más efectiva entre los agregados. Esto genera una condición similar a la de las mezclas calientes, donde el contenido de ligante efectivo debe ser cuidadosamente considerado para evitar una sobresaturación que afecte negativamente la resistencia mecánica de la mezcla.

5 | Conclusión

En la presente investigación se evaluaron tres dosificaciones de líquido rejuvenecedor (9 %, 15 % y 21 %) en una mezcla asfáltica fría compuesta por 100 % de RAP (Reclaimed Asphalt Pavement), además de un caso base sin adición de rejuvenecedor, con el objetivo de analizar el efecto de dicho aditivo en la susceptibilidad a la humedad de la mezcla. El diseño y proceso de curado se basaron en investigaciones previas, sin embargo, se introdujeron modificaciones en el acondicionamiento de las probetas y se adoptaron ciertas suposiciones relevantes. Entre estas, se consideró al RAP como roca negra (es decir, como agregado sin ligante activo) y se asumió que el líquido rejuvenecedor podría cumplir la función de lubricante reemplazando en cierta cantidad al agua de premezclado.

El análisis de los resultados mostró que la incorporación del líquido rejuvenecedor produce un efecto dual. Por un lado, se evidenció una mejora significativa en la resistencia a la humedad, medida a través del índice TSR, especialmente en las dosificaciones más altas. Este comportamiento se atribuye a la naturaleza química del rejuvenecedor, basado en compuestos poliamínicos con propiedades anti-stripping, que podrían mejorar la adhesión entre el ligante y los agregados en presencia de agua. Y por otro lado, se observó una disminución progresiva en las resistencias mecánicas (resistencia a tracción indirecta en estado seco y saturado) a medida que aumentó la dosificación, indicando un posible exceso de reblandecimiento del ligante envejecido contenido en el RAP.

En particular, la comparación entre el caso con 9 % de líquido rejuvenecedor y el caso de control revela una posible incongruencia, ya que la resistencia indirecta e índice TSR se ven desfavorecidas. Este comportamiento sugiere la existencia de dos dosis óptimas distintas: una dosis mínima en la que el rejuvenecedor cumple eficazmente su función como mejorador de la adherencia, aumentando la resistencia a la humedad, y otra dosis crítica a partir de la cual las resistencias comienzan a disminuir de forma significativa debido al exceso de reblandecimiento. Esta dualidad podría encontrar un punto de equilibrio si se incorpora un porcentaje de agregado virgen en la mezcla, lo que permitiría

modificar tanto la respuesta mecánica como la sensibilidad a la humedad, y así converger hacia una única dosis óptima que equilibre ambas propiedades de manera satisfactoria.

- Se recomienda evaluar futuras mezclas con dosificaciones de líquido rejuvenecedor inferiores al 9%, a fin de averiguar la existencia de un punto donde se logre un incremento en la resistencia sin comprometer la durabilidad frente a la humedad.
- Al trabajar con altos porcentajes de RAP y rejuvenecedor, especialmente en mezclas 100% recicladas, no se debe asumir que este material se comporta como roca negra. La presencia de rejuvenecedor puede activar el ligante envejecido, influyendo significativamente en la cantidad de ligante efectivo de la mezcla.
- Si bien el uso de líquido rejuvenecedor ha demostrado ser efectivo en la mejora de la resistencia a la humedad, su utilización en grandes cantidades no es recomendable, ya que puede reducir considerablemente la resistencia de la mezcla, lo que podría elevar el riesgo de deterioros como el ahuellamiento.
- Según los resultados obtenidos en esta investigación, el uso de rejuvenecedor no parece ser recomendable para mezclas compuestas en su totalidad por RAP. Sin embargo, para llegar a esta conclusión definitiva, es necesario evaluar condiciones adicionales a las aquí estudiadas. Entre ellas, considerar un porcentaje de ligante activado que permita descontar su aporte del ligante proveniente de la emulsión; realizar un estudio reológico con el ligante extraído del RAP para determinar dosis óptimas; o analizar dichas dosis en mezclas que incorporen un cierto porcentaje de agregado virgen, de manera que el efecto positivo en la resistencia a la humedad no se vea contrarrestado por un exceso de reblandecimiento.

Bibliografía

- [1] M. Al-Jumaili, M. Abbas, and O. Issmael. Sustainability of cold recycled mixture with high reclaimed asphalt pavement percentages. Master's thesis, 08 2016.
- [2] S. Arimilli, P. K. Jain, and M. N. Nagabhushana. Optimization of recycled asphalt pavement in cold emulsified mixtures by mechanistic characterization. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(2):04015132, 2016. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001412. URL <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0001412>.
- [3] Asphalt Institute. *Asphalt Cold Mix Manual*. Asphalt Institute, Lexington, KY, 1989. Manual Series No. 14 (MS-14).
- [4] ASTM D2041. Standard test method for theoretical maximum specific gravity and density of asphalt mixtures, 2019. URL https://astm.org/d2041_d2041m-19.html.
- [5] ASTM D2726. Standard test method for bulk specific gravity and density of non-absorptive compacted bituminous mixtures, 2021. URL https://astm.org/d2726_d2726m-21.html.
- [6] ASTM D2872. Standard test method for effect of heat and air on a moving film of asphalt (rolling thin-film oven test), 2022. URL <https://www.astm.org/d2872-22.html>.
- [7] ASTM D3203. Standard test method for percent air voids in compacted asphalt mixtures, 2022. URL <https://www.astm.org/d3203-22.html>.
- [8] ASTM D6521. Standard practice for accelerated aging of asphalt binder using a pressurized aging vessel (pav), 2022. URL <https://www.astm.org/d6521-22.html>.
- [9] ASTM International. Standard test method for effect of moisture on asphalt mixtures. https://doi.org/10.1520/D4867_D4867M-22, 2022. ASTM D4867/D4867M-22, Book of Standards Volume: 04.03.
- [10] A. Behnood. Application of rejuvenators to improve the rheological and mechanical properties of asphalt binders and mixtures: A review. *Journal of Cleaner*

- Production*, 231:171–182, 2019. ISSN 0959-6526. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.209>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619317433>.
- [11] F. J. Benson. Effects of aggregate size, shape, and surface texture on the properties of bituminous mixtures – a literature survey. *Highway Research Record*, 109:12–22, 1970.
- [12] S. A. Cross. Cold in-place recycling (cir) study. Final Report FHWA-CFL/TD-0x-00x, Federal Highway Administration, Central Federal Lands Highway Division, Lakewood, CO, Sept. 2012. URL <http://www.cflhd.gov>. Report No. FHWA-CFL/TD-0x-00x. Contract No. DTFH68-07-D-00001/T-10-036. Sponsored by the FHWA Coordinated Technology Implementation Program (CTIP).
- [13] S. S. Dash, A. K. Chandrappa, and U. C. Sahoo. Design and performance of cold mix asphalt – a review. *Construction and Building Materials*, 315:125687, 2022. ISSN 0950-0618. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125687. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821034218>.
- [14] A. Diab, D. Singh, and J. C. Pais. Moisture susceptibility of asphalt mixtures: A literature review. In *4th Conference of Transportation Research Group of India (CTRG)*, Mumbai, India, Dec. 2017. <https://hdl.handle.net/1822/49215>.
- [15] Dirección de Vialidad - Ministerio de Obras Públicas. *Manual de Carreteras: Volumen N° 5, Especificaciones Técnicas Generales de Construcción*. Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile, Santiago, Chile, 2024. Disponible en línea en el sitio web oficial del MOP.
- [16] Dirección de Vialidad - Ministerio de Obras Públicas. *Manual de Carreteras: Volumen N° 8, Especificaciones y Métodos de Muestreo, Ensaye y Control*. Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile, Santiago, Chile, 2024. Disponible en línea en el sitio web oficial del MOP.
- [17] B. Emamgholi. Investigation of the rejuvenator content effect on the mechanical characteristics of cold recycled asphalt mixes. Master’s thesis, École de technologie supérieure, Université du Québec, Montreal, Dec. 2022. Presented in partial fulfillment for a Master’s degree in Construction Engineering (M.A.Sc.).
- [18] J. Grönniger, M. Wistuba, and P. Renken. Adhesion in bitumen-aggregate-systems. *Road Materials and Pavement Design*, 11:881–898, 01 2010. doi: 10.1080/14680629.2010.9690311.

- [19] Y. He, Y. Li, J. Zhang, K. Xiong, G. Huang, Q. Hu, and X. Zhao. Performance evolution mechanism and affecting factors of emulsified asphalt cold recycled mixture performance: A state-of art review. *Construction and Building Materials*, 411:134545, 2024. ISSN 0950-0618. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134545>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061823042642>.
- [20] R. G. Hicks. *Moisture damage in asphalt concrete*. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1991.
- [21] M. Hugener, M. N. Partl, and M. Morant. Cold asphalt recycling with 100 % reclaimed asphalt pavement and vegetable oil-based rejuvenators. *Road Materials and Pavement Design*, 15(2):239–258, 2013. doi: 10.1080/14680629.2013.860910. URL <https://doi.org/10.1080/14680629.2013.860910>.
- [22] E. R. Hunter and K. Ksaibati. Evaluating moisture susceptibility of asphalt mixes. Technical report, Department of Civil and Architectural Engineering, University of Wyoming, Laramie, WY 82071-3295, USA, 2002. P.O. Box 3295.
- [23] R. Imaninasab and S. Joodaki. Performance evaluation of polyamine anti-stripping additives. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials*, 172(3):155–163, 05 2016. ISSN 1747-650X. doi: 10.1680/jcoma.15.00066. URL <https://doi.org/10.1680/jcoma.15.00066>.
- [24] S. Jain and B. Singh. Cold mix asphalt: An overview. *Journal of Cleaner Production*, 280:124378, 2021. ISSN 0959-6526. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124378>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620344231>.
- [25] Kao Chemicals Europe. Danox® a-rj: Rejuvenating additive for asphalt mixes. <https://www.kaochemicals-eu.com/uploads/docs/v/1/i/uv5-kao-danox-a-rj-bx.pdf>, 2020.
- [26] Y. R. Kim. *Modeling of Asphalt Concrete*. American Society of Civil Engineers, 1st edition, 2009. ISBN 9780071464628.
- [27] C. Li, J. Ouyang, P. Cao, J. Shi, W. Yang, and Y. Sha. Effect of rejuvenating agent on the pavement properties of cold recycled mixture with bitumen emulsion. *Coatings*, 11(5):520, 2021. doi: 10.3390/coatings11050520. URL <https://doi.org/10.3390/coatings11050520>.
- [28] N. Liu, L. Liu, M. Li, and L. Sun. A comprehensive review of warm-mix asphalt

- mixtures: Mix design, construction temperatures determination, performance and life-cycle assessment. *Road Materials and Pavement Design*, 25(7):1381–1425, 2023. doi: 10.1080/14680629.2023.2268194. URL <https://doi.org/10.1080/14680629.2023.2268194>.
- [29] R. B. McGennis, R. M. Anderson, T. W. Kennedy, and M. Solaimanian. Background of superpave asphalt mixture design and analysis. Final Report FHWA-SA-95-003, Asphalt Institute, Lexington, KY, November 1994. URL <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/pubs/013177.pdf>. Prepared for the Federal Highway Administration under contract DTFH61-92-C-00108.
- [30] MTT. Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones: Observatorio Logístico. <https://www.observatoriologistico.cl/infraestructura/red-vial/?id=5d719224d2c6f20029110412>, 2022.
- [31] P. G. Palma Contreras. Estudio del comportamiento de mezclas asfálticas, con Áridos procedentes de valdivia y la serena, sometidas a distintas condiciones de humedad, utilizando el método de resistencia a tracción indirecta. Memoria de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María, 2019. Acceso abierto, disponible en el Repositorio Digital USM.
- [32] S. A. Parraguez Cruz. Comparación de diseño con compactador giratorio de mezclas asfálticas en frío para material reciclado y material virgen mediante ensayo tsr. Memoria de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María, 2025. Acceso abierto, disponible en el Repositorio Digital USM.
- [33] E. Prospero and E. Bocci. A review on bitumen aging and rejuvenation chemistry: Processes, materials and analyses. *Sustainability*, 13(12), 2021. ISSN 2071-1050. doi: 10.3390/su13126523. URL <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/12/6523>.
- [34] I. A. Providel Briceño. Comparación entre métodos de curados para mezclas asfálticas en frío compuestas por distintas proporciones de pavimento asfáltico recuperado (rap), mediante el valor entregado por el ensayo de resistencia a la tensión indirecta (tsr). Memoria de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María, 2025. Acceso abierto, disponible en el Repositorio Digital USM.
- [35] F. Roberts, P. Kandhal, E. Brown, D. Lee, and T. Kennedy. *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction*. NCAT - Auburn University, Auburn, 2nd edition, 1996.
- [36] D. R. Salomon. *Asphalt emulsion technology*. Transportation research board, 2006.

- [37] H. K. Shanbara, A. Dulaimi, T. Al-Mansoori, S. Al-Busaltan, M. Herez, M. Sadique, and T. Abdel-Wahed. The future of eco-friendly cold mix asphalt. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 149:111318, 2021. ISSN 1364-0321. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111318>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032121006055>.
- [38] Shell. *The Shell Bitumen Handbook*. Thomas Telford Publishing, London, UK, 5th edition, 2003.
- [39] I. N. Thanaya. Evaluating and improving the performance of cold asphalt emulsion mixes. *Civil Engineering Dimension*, 9, 01 2007.
- [40] J. Yan, H. Zhu, Z. Zhang, L. Gao, and S. Charmot. The theoretical analysis of the rap aged asphalt influence on the performance of asphalt emulsion cold recycled mixes. *Construction and Building Materials*, 71:444–450, 2014. ISSN 0950-0618. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.002>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814010071>.