



**UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA**

Departamento de Obras Civiles

**Efecto de un rejuvenecedor basado en la pirólisis de
neumáticos sobre el comportamiento mecánico de mezclas
asfálticas frías recicladas con emulsión**

Memoria de Título presentada por

José Antonio Berríos Droguett

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

y al grado de

Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil

Profesor Guía
Rodrigo Delgadillo Sturla

2026



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: Efecto de un rejuvenecedor basado en la pirólisis de neumáticos sobre el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas frías recicladas con emulsión

Nombre del candidato(a): José Antonio Berríos Droguett

Carrera / Grado: Ingeniería Civil y Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil

Campus: Casa Central Valparaíso

Departamento: Departamento de 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 (marcar una opción)

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 (**marcar una opción**):

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: 20/04/2026

Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 20/04/2026

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.



UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA

TITULO DE LA TESIS:

Efecto de un rejuvenecedor basado en la pirólisis de neumáticos sobre el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas frías recicladas con emulsión

AUTOR:

José Antonio Berríos Droguett

TRABAJO DE MEMORIA, presentado como requisito parcial para optar al título de la carrera de INGENIERÍA CIVIL y al grado de MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA CIVIL de la Universidad Técnica Federico Santa María.

| | <u>Nombre</u> | <u>Firma</u> |
|--------------------|------------------------|--------------|
| Prof. Guía | PhD Rodrigo Delgadillo | |
| Miembro 1 Comisión | PhD José Norambuena | |
| Miembro 2 Comisión | PhD Manuel Chávez | |

Valparaíso, Chile, 09 de abril de 2026

Agradecimientos

Quiero comenzar agradeciendo a Dios por la oportunidad de llegar a esta instancia y por toda la fortaleza que me provee. Agradecer infinitamente a mi familia, mis padres especialmente y también mis hermanos por su apoyo incansable durante todo este proceso y por darme el valor para continuar aún cuando el camino se hacía largo y pedregoso. Gracias a mi amada Catalina por todas las conversaciones, apoyo emocional y por ayudarme a estructurar y limitar mi investigación y que si no fuera por ella, aún seguiría estudiando esta tesis. Muchas gracias a mi profesor guía Rodrigo Delgadillo por su constante empuje y por ayudarme a cuestionar y resolver muchos de los problemas que experimenté durante el desarrollo de este documento. Muchas gracias a todo el personal LEMCO, especialmente a don Christian Vásquez por sus consejos, guías y por ayudarme a sacar adelante los ensayos así como también a entregar siempre lo mejor de mí. De la misma forma muchas gracias a don Rodrigo Verdugo por sus consejos y por entregar toda su experiencia para ayudarme de forma totalmente desinteresada. De la misma forma agradecer también a mis amigos, los pera y en especial a Álvaro y Mauer quienes fueron un apoyo incondicional y donde las risas nunca faltaron desde el primero día que nos conocimos en este viaje llamado universidad. Por último agradecer al grupo de investigación por su amable y buena compañía durante todos los largos meses de ensayos en el laboratorio, y también a las empresas BITUMIX S.A., Productos Bituminosos S.A. y Kal Tire Chile Spa por proporcionar los materiales utilizados en esta investigación. A todos muchas gracias.

Resumen

La incorporación de pavimento asfáltico recuperado (RAP) en mezclas asfálticas en frío se presenta como una estrategia fundamental para lograr la sustentabilidad en la industria de la construcción, sin embargo, cuenta con numerosos desafíos técnicos dados por su inherente rigidez como consecuencia del envejecimiento del ligante asfáltico. La presente investigación evalúa la factibilidad mecánica de esta tecnología al incorporar un agente rejuvenecedor basado en la pirólisis de neumáticos fuera de uso (LP) con la capacidad de restaurar las propiedades viscoelásticas de cementos asfálticos envejecidos. Durante el estudio se evaluaron ensayos de Módulo Dinámico, Número de Flujo y Resistencia a Tracción Indirecta, los cuales son fundamentales para caracterizar el comportamiento que tiene la aplicación de diferentes dosis de RAP (0%, 50%, y 100%) y de LP (9%, 15%, y 21%).

Los resultados demostraron que la adición del agente rejuvenecedor logra modificar la reología del ligante envejecido, reduciendo la rigidez e incrementando la zona de deformación secundaria. Sin embargo, excesivas dosis de LP presentaron desempeños inadecuados producto de un excesivo reblandecimiento del material, previsiblemente debido a una sobresaturación de la matriz agregados pétreos - ligante asfáltico - agente rejuvenecedor. En adición, el comportamiento de mezclas compuestas en 100% RAP con diferentes dosis de LP presentó resultados altamente variables y poco predecibles. Mientras que mezclas asfálticas conformadas por 50% agregados vírgenes (A.V.) y 50% RAP con dosis de LP menores a 15% mostraron un adecuado comportamiento ante daño por humedad, una apropiada resistencia a deformación terciaria y un módulo dinámico similar a las mezclas confeccionadas con 100% A.V., logrando beneficios técnicos al utilizar este tipo de tecnologías.

Palabras Clave: Mezcla Asfáltica en Frío, RAP, Agente Rejuvenecedor, Módulo Dinámico, Número de Flujo, Resistencia a Tracción Indirecta.

Abstract

The incorporation of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) into Cold Mix Asphalt (CMA) represents a fundamental strategy for achieving sustainability in the construction industry; however, it faces numerous technical challenges stemming from the material's inherent stiffness caused by binder aging. This research evaluates the mechanical feasibility of this technology by incorporating a rejuvenating agent derived from the pyrolysis of End-of-Life Tires (TPO), capable of restoring the viscoelastic properties of aged asphalt binders. The study evaluates Dynamic Modulus, Flow Number, and Indirect Tensile Strength testing, which are fundamental for characterizing the performance of mixtures with varying RAP contents (0%, 50%, and 100%) and LP dosages (9%, 15%, and 21%).

Results demonstrated that the addition of the rejuvenating agent successfully modifies the rheology of the aged binder, reducing stiffness and extending the secondary deformation zone. However, excessive TPO dosages resulted in poor performance due to excessive material softening, likely caused by oversaturation of the aggregate-binder-rejuvenator matrix. Furthermore, 100% RAP mixtures exhibited highly variable and unpredictable behavior across different LP dosages. Conversely, mixtures composed of 50% Virgin Aggregates (VA) and 50% RAP with LP dosages below 15% demonstrated adequate resistance to moisture damage, appropriate resistance to tertiary deformation, and a Dynamic Modulus comparable to 100% VA mixtures, thereby validating the technical benefits of implementing these technologies.

Keywords: Cold Mix Asphalt, RAP, Rejuvenating Agent, Dynamic Modulus, Flow Number, Indirect Tensile Strength.

Índice General

| | |
|---|-----------|
| Resumen | 2 |
| Abstract | 3 |
| Índice de Tablas | 6 |
| Índice de Figuras | 7 |
| Índice de Ecuaciones | 9 |
| I Capítulo 1 | 10 |
| 1 Introducción | 10 |
| 1.1 Antecedentes Generales | 10 |
| 1.1.1 Pavimento Asfáltico Recuperado y Agente Rejuvenecedor | 11 |
| 1.2 Objetivos | 12 |
| 1.2.1 Planteamiento del Problema | 12 |
| 1.2.2 Hipótesis y Objetivos de la investigación | 13 |
| 1.3 Estructura de la Tesis | 13 |
| II Capítulo 2 | 14 |
| 2 Revisión de la literatura | 14 |
| 2.1 Sostenibilidad en Pavimentos Asfálticos | 14 |
| 2.1.1 Economía Circular y Gestión de Residuos | 14 |
| 2.1.2 RAP y su efecto en la reducción de la huella de carbono | 15 |
| 2.1.3 Agentes Rejuvenecedores y su relación con la sustentabilidad | 15 |
| 2.2 Mezclas Asfálticas | 16 |
| 2.3 Deterioros en Mezclas Asfálticas Frías | 19 |
| 2.4 Ligante Asfáltico | 19 |
| 2.4.1 Mecanismos de Envejecimiento | 21 |
| 2.4.2 Temperatura de Transición Vítreo | 23 |
| 2.5 Superposición Tiempo-Temperatura | 23 |
| 2.5.1 Modelos de Curvas Maestras | 25 |
| 2.5.2 Modelo de Número de Flujo (FN) | 27 |
| 2.6 Pavimento Asfáltico Recuperado - RAP | 28 |
| 2.7 Aditivos Mejoradores de Desempeño | 30 |
| 2.7.1 Agentes Rejuvenecedores | 30 |
| 2.8 Rejuvenecedor extraído a partir de la pirólisis de neumáticos fuera de uso mineros (NFU-M) | 33 |
| 2.9 Diseño de Mezclas Asfálticas Frías con Emulsión | 34 |
| 2.10 Resumen | 36 |

| | |
|--|-----------|
| III Capítulo 3 | 38 |
| 3 Metodología Experimental | 38 |
| 3.1 Diseño Experimental | 38 |
| 3.2 Materiales Utilizados | 39 |
| 3.3 Ensayos de Laboratorio | 42 |
| 3.3.1 Densidad de la Mezcla Asfáltica | 42 |
| 3.3.2 Ensayo de Tracción Indirecta | 42 |
| 3.3.3 Ensayo de Módulo Dinámico | 43 |
| 3.3.4 Ensayo de Número de Flujo | 43 |
| 3.4 Equipamiento | 44 |
| 3.4.1 Compactador Giratorio Superpave | 44 |
| 3.4.2 Moldes Compactador Giratorio Superpave | 44 |
| 3.4.3 Tamices | 45 |
| 3.4.4 Bomba de Vacío | 46 |
| 3.4.5 Matraz Kitasato | 46 |
| 3.4.6 Balanzas | 47 |
| 3.4.7 Hornos | 47 |
| 3.4.8 Baño de Agua | 48 |
| 3.4.9 Dispensor - Dosificador | 48 |
| 3.4.10 Testiguera, Cortadora y Refrentadora | 49 |
| 3.4.11 Prensa Marshall | 50 |
| 3.4.12 Equipo Universal | 50 |
| 3.5 Metodología Experimental | 51 |
| 3.5.1 Ensayo de Tracción Indirecta | 52 |
| 3.5.2 Ensayos de Módulo Dinámico y Número de Flujo | 53 |
| 3.6 Análisis Estadístico | 54 |
| 3.7 Resumen | 55 |
| IV Capítulo 4 | 56 |
| 4 Resultados Experimentales | 56 |
| 4.1 Verificación de Diseño de Mezclas Asfálticas Frías | 56 |
| 4.2 Resultados de Ensayo de Tracción Indirecta | 58 |
| 4.3 Resultados de Módulo Dinámico | 61 |
| 4.4 Resultados Ensayo de Número de Flujo (FN) | 68 |
| 4.5 Discusión General | 71 |
| 4.6 Resumen | 72 |
| V Capítulo 5 | 73 |
| 5 Conclusiones y Recomendaciones | 73 |
| 5.1 Conclusiones | 73 |
| 5.2 Recomendaciones | 74 |
| Referencias | 76 |
| Anexos | 84 |

Índice de Tablas

| | | |
|----|--|-----|
| 1 | Matriz de Combinación de Ensayos. | 39 |
| 2 | Características Emulsión Asfáltica CSS – 1h. | 41 |
| 3 | Propiedades Físicas y Químicas del Líquido Piroclítico. | 41 |
| 4 | Resultados de ANOVA - Ensayo de Tracción Indirecta. | 60 |
| 5 | Resultados de Prueba de Tukey* - Ensayo de Tracción Indirecta. | 60 |
| 6 | Resultados de ANOVA - Ensayo Módulo Dinámico. | 61 |
| 7 | Resultados de la Prueba de Tukey para Módulo Dinámico de Mezclas Asfálticas Sin la Presencia de LP. | 62 |
| 8 | Resultados de la Prueba de Tukey - Comparación 0 RAP vs 50 RAP con Diferentes Dosis de LP. | 64 |
| 9 | Resultados de la Prueba de Tukey - Comparación 0 RAP vs 100 RAP con Diferentes Dosis de LP. | 67 |
| 10 | Resultados de ANOVA - Ensayo de Número de Flujo. | 69 |
| 11 | Comparación de Probetas respecto al Parámetro de Control | 69 |
| 12 | Cálculo del Contenido de Ligante Asfáltico RAP por Extracción Mediante Centrifugación. | 84 |
| 13 | TSR 100 % A.V. - S.R. | 85 |
| 14 | TSR 50 % RAP - S.R. | 86 |
| 15 | TSR 50 % RAP - 9 % LP. | 87 |
| 16 | TSR 50 % RAP - 15 % LP. | 88 |
| 17 | TSR 50 % RAP - 21 % LP. | 89 |
| 18 | TSR 100 % RAP - S.R. | 90 |
| 19 | TSR 100 % RAP - 9 % LP. | 91 |
| 20 | TSR 100 % RAP - 15 % LP. | 92 |
| 21 | TSR 100 % RAP - 21 % LP. | 93 |
| 22 | Resultados de Prueba de Tukey para Temperatura -10 °C - Ensayo Módulo Dinámico | 94 |
| 23 | Resultados de Prueba de Tukey para Temperatura 4 °C - Ensayo Módulo Dinámico | 96 |
| 24 | Resultados de Prueba de Tukey para Temperatura 21 °C - Ensayo Módulo Dinámico | 98 |
| 25 | Resultados de Prueba de Tukey para Temperatura 37 °C - Ensayo Módulo Dinámico | 100 |

Índice de Figuras

| | | |
|----|---|----|
| 1 | Emisión de CO ₂ en la Construcción de Pavimentos Asfálticos. | 15 |
| 2 | Consumo Energético Para la Fabricación de 1 Tonelada de RAP Con y Sin la Presencia de Agente Rejuvenecedor (R). | 16 |
| 3 | Clasificación de Mezclas Asfálticas Según Temperatura de Fabricación. | 17 |
| 4 | Interface Doble Capa Eléctrica Entre 2 Gotas de Asfalto. | 18 |
| 5 | Etapas de Quiebre de Emulsión Asfáltica. | 18 |
| 6 | Daño por Humedad en Mezcla Asfáltica. | 19 |
| 7 | Daño por Ahuellamiento en Mezcla Asfáltica. | 19 |
| 8 | Componentes del Ligante Asfáltico Según la Fracción S.A.R.A. | 20 |
| 9 | Estructura Coloidal del Ligante Asfáltico. | 21 |
| 10 | Modelo Físico de la Fracción S.A.R.A. | 21 |
| 11 | Cambios en la Composición del Ligante Asfáltico Durante el Proceso de Mezclado, Construcción y Servicio. | 22 |
| 12 | Representación del Modelo Coloidal del Ligante Asfáltico: (a) Estructural Sol, (b) Micelas de Asfaltenos Floculadas, (c): Estructura Gel. | 22 |
| 13 | Regiones del Comportamiento Viscoelástico de Ligantes Asfálticos. | 23 |
| 14 | Aplicación del Principio de Superposición Tiempo-Temperatura en Rango Lineal Elástico. | 24 |
| 15 | Desplazamiento de Isotermas para Confección de Curva Maestra. | 25 |
| 16 | Interpretación Gráfica del Modelo Sigmoidal. | 27 |
| 17 | Estructura de Una Partícula RAP Recubierta por Ligante Asfáltico Envejecido. | 29 |
| 18 | Diagrama de Capas de Ligante Asfáltico Envejecido en Una Partícula de Agregado Pétreo. | 29 |
| 19 | Fases de Difusión de un Agente Rejuvenecedor en un Ligante Asfáltico Envejecido en Términos de su Viscosidad. | 31 |
| 20 | Interface entre Agregados Pétreos, Ligante Asfáltico y Agente Rejuvenecedor. | 32 |
| 21 | Proceso de Extracción de Líquido Pirolítico. | 34 |
| 22 | Resistencias en Condición Saturada y No Saturada para Mezclas Asfálticas Frías Compuestas por 100 % de Agregado Virgen. | 36 |
| 23 | Metodología Experimental - Materiales y Ensayos a Investigar. | 38 |
| 24 | Granulometría de Agregados Vírgenes Según Tamaño Máximo Absoluto. | 40 |
| 25 | Granulometría de RAP Según Tamaño Máximo Absoluto. | 40 |
| 26 | Agente Rejuvenecedor - Líquido Pirolítico. | 42 |
| 27 | Acondicionamiento en Condición Saturada para CMA. | 43 |
| 28 | Ensayo de Tracción Indirecta Probeta Ensayada. | 43 |
| 29 | Compactador Giratorio Superpave Utilizado en la Investigación. | 44 |
| 30 | Molde Compactador Giratorio Superpave sobre Extrusor de Probeta. | 45 |
| 31 | Tamices. | 45 |
| 32 | Bomba Operando para Ensayo de Densidad Máxima Suelta. | 46 |
| 33 | Matraz Kitasato. | 46 |
| 34 | Balanza Electrónica para Ensayos con Probeta Bajo Agua. | 47 |

| | | |
|----|---|----|
| 35 | Balanza Electrónica para Condiciones Regulares. | 47 |
| 36 | Hornos. | 47 |
| 37 | Baño de Agua para Acondicionamiento de Probetas. | 48 |
| 38 | Dosificador Utilizado para la Aplicación del Líquido Pírolítico. | 48 |
| 39 | Máquina Testiguera. | 49 |
| 40 | Máquina Cortadora. | 49 |
| 41 | Máquina Refrentadora. | 49 |
| 42 | Probeta Completa para Ensayos de Módulo Dinámico y Número de Flujo. | 49 |
| 43 | Núcleo de Probeta para Ensayos de Módulo Dinámico y Número de Flujo. | 49 |
| 44 | Prensa Marshall | 50 |
| 45 | Equipo Universal Utilizado en la Investigación. | 51 |
| 46 | Probeta para Ensayo de Tracción Indirecta. | 52 |
| 47 | Probeta Ensayo de Tracción Indirecta en Condición No Saturada. | 53 |
| 48 | Probeta Ensayo de Tracción Indirecta en Condición Saturada. | 53 |
| 49 | Probeta Posterior a Ensayo de Módulo Dinámico. | 54 |
| 50 | Probeta Posterior a Ensayo de Número de Flujo. | 54 |
| 51 | Diseño de Mezclas CMA 100 % A.V. según AI-MS 14. | 56 |
| 52 | Contenido de Agua de Premezclado para Mezclas CMA 100 % A.V. Verificación de Diseño. | 56 |
| 53 | Contenido de Emulsión Asfáltica para Mezclas CMA 100 % A.V. Verificación de Diseño. | 57 |
| 54 | Diseño de Mezclas CMA con contenidos de RAP de 0 %, 50 % y 100 % Sin Presencia de Agente Rejuvenecedor. | 58 |
| 55 | Resultados de Ensayo de Tracción Indirecta para Diferentes Dosis de RAP y/o LP. | 58 |
| 56 | Curva Maestra de Módulo Dinámico para Diferentes Dosis de RAP Sin Presencia de LP. | 61 |
| 57 | Curva Maestra de Módulo Dinámico para 50 % RAP con Diferentes Dosis de LP. | 63 |
| 58 | Curva Maestra de Módulo Dinámico para 100 % RAP con Diferentes Dosis de LP. | 65 |
| 59 | Curva Maestra de Módulo Dinámico para Todas las Dosis de RAP y/o LP Investigadas. | 68 |
| 60 | Curva de Comportamiento FN Mezcla 100 % RAP S.R. | 70 |
| 61 | Curva de Comportamiento FN Mezcla 100 % RAP con 9 % LP. | 70 |
| 62 | Resultados Ensayo de Número de Flujo para Todas las Dosis de RAP y/o LP Investigadas. | 70 |

Índice de Ecuaciones

| | | |
|----|--|----|
| 1 | Ecuación Frecuencia Reducida | 24 |
| 2 | Ecuación Logarítmica de Frecuencia Reducida | 24 |
| 3 | Ecuación de Módulo Dinámico | 25 |
| 4 | Ecuación de Williams-Landel-Ferry (WLF) | 25 |
| 5 | Ecuación de Arrhenius | 26 |
| 6 | Ecuación Modelo Sigmoidal | 26 |
| 7 | Ecuación de Francken | 27 |
| 8 | Ecuación de Francken Primera Derivada | 28 |
| 9 | Ecuación de Francken Segunda Derivada | 28 |
| 10 | Segunda Ley de Fick | 31 |
| 11 | Ecuación de Stokes - Einstein - Sutherland | 32 |
| 12 | Ecuación Contenido Inicial de Asfalto | 34 |
| 13 | Ecuación Contenido Inicial de Emulsión Asfáltica | 35 |

I | Capítulo 1

1. Introducción

1.1. Antecedentes Generales

El sector de la construcción es uno de los más relevantes en la economía a nivel mundial, y también uno de los que más consumo de materiales realiza (Comisión Europea, 2012). Dado el alto requerimiento de recursos, es que la industria de la construcción es una de las que genera mayores impactos ambientales sobre el planeta Tierra, y en donde los daños provocados se deben principalmente a la emisión de gases contaminantes a la atmósfera, el consumo de energía y la explotación de recursos naturales (Landi, Marconi, Bocci, y Germani, 2020).

Dada esta importante relación entre la construcción y el medioambiente es que se hace necesario incorporar los principios de sustentabilidad para lograr que esta industria se torne amigable con el medioambiente, y permita acercar la carbono-neutralidad a la sociedad, reduciendo los impactos del cambio climático. En este sentido, ya que la industria vial forma parte importante del sector de la construcción, es necesario desarrollar nuevas tecnologías y técnicas de producción y constructivas que permitan alcanzar el objetivo de cero emisiones netas para materiales que forman parte de mezclas asfálticas (Park, Hwang, Seo, y Seo, 2003).

Pero no sólo los impactos medioambientales son relevantes para la industria de la construcción. Los costos económicos que presentan los materiales que forman parte de las obras viales tienen una relevancia preponderante. En el año 2017, el Reino Unido estimó el costo de construcción de 1 kilómetro de una nueva vía en más de USD5.5 billones por año, y en donde más de 30.000 toneladas de agregados pétreos son necesarias para la construcción de un tramo de la misma longitud; lo que convierte a este material en el tercero más consumido a nivel mundial, solo por detrás del agua y del aire (Lizasoain-Arteaga, Indacoechea-Vega, Pascual-Muñoz, y Castro-Fresno, 2019).

Chile, al igual que la mayoría del resto de países del mundo, presenta una gran demanda de caminos producto del crecimiento poblacional, la alta urbanización y los avances industriales, todos los cuales provocan un aumento en la calidad y cantidad de exigencias hacia la infraestructura vial sin precedentes. A diciembre de 2022, la red vial nacional presentaba una extensión de más de 88.000 [km], de los cuales alrededor del 52 % correspondían a caminos no pavimentados (Dirección de Vialidad, 2024b), mientras que el 21 % correspondía a caminos pavimentados con material asfáltico. Esta falta de pavimentación ciertamente presenta un desafío tanto en el presente como a futuro dadas las condiciones sociales cada vez más dinámicas en nuestra sociedad.

Actualmente, la mayor parte de las políticas sociales y económicas, tanto a nivel mundial como a nivel nacional se rigen principalmente por los principios de la sustentabilidad, así como por los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas. La industria vial no es ajena a estos lineamientos, por lo cual, de forma de subsanar los problemas económicos y medioambientales es que se ha comenzado a reutilizar vías de asfalto que ya concluyeron su vida útil, para poder ser utilizadas como parte o como la totalidad de nuevas vías. Estos materiales

que ya concluyeron su ciclo de vida se denominan “Reclaimed Asphalt Pavement” (RAP, por sus siglas en inglés), y tienen un gran impacto en la reducción de costos y en la huella de carbono al ser utilizados en mezclas asfálticas en caliente (HMA, por sus siglas en inglés), pudiendo reducir hasta en un 50 % los costos totales cuando se utiliza una mezcla asfáltica en caliente con 100 % de RAP, y hasta en un 35 % la emisión de CO₂ por tonelada de pavimento construido cuando se produce una mezcla HMA compuesta en su totalidad por RAP (Zaumanis, Mallick, y Frank, 2016). Aún así, es importante destacar que estos materiales deben cumplir estrictos protocolos y normativas antes de ser construidos de modo que puedan desempeñarse estructuralmente de forma adecuada frente a la gran cantidad de sollicitaciones a las que se ven expuestos. Además, para asegurar que efectivamente se cumplan los requerimientos económicos pero también se obtengan los beneficios ambientales es necesario considerar en todo momento tanto a parámetros relacionados con el proyecto, como son: tamaño, ubicación o impacto ambiental; así como también es necesario considerar parámetros relacionados con la estructura del pavimento, como son: técnicas constructivas, ubicación relativa al proyecto, disponibilidad y tipo de materiales o espesor de capa.

1.1.1. Pavimento Asfáltico Recuperado y Agente Rejuvenecedor

Los pavimentos asfálticos son materiales viscoelásticos complejos (Di Benedetto, Olard, Sauzéat, y Delaporte, 2004), es decir, son materiales que, producto de interacciones con sollicitaciones climáticas y de cargas, degradan su rigidez compleja en el tiempo. Esta disminución en el desempeño del pavimento asfáltico se expresa en un aumento del comportamiento viscoso en desmedro del componente elástico, fenómeno denominado envejecimiento, lo que a su vez provoca que el material no presente una adecuada capacidad de relajar esfuerzos, resultando así en un material con un módulo más rígido respecto a su estado inicial.

Ciertamente, el aumento de la rigidez producto del envejecimiento tiende a volver más quebradizo al material, favoreciendo la aparición de grietas, y deteriorando en general el desempeño mecánico del pavimento. Dado lo anterior, los pavimentos asfálticos tal y como se encuentran en el final de su vida útil, también denominados RAP, no presentan las mejores propiedades para ser nuevamente incorporados dentro de la matriz constructiva vial, por lo que es necesario incorporar otros materiales que permitan mejorar las propiedades viscoelásticas del asfalto rigidizado. Estos materiales se denominan Agentes Rejuvenecedores, y tienen la capacidad de alterar propiedades reológicas de asfaltos envejecidos, permitiéndoles retornar a un estado de menor envejecimiento (Karlsson y Isacsson, 2003); sin embargo, su composición química juega un rol fundamental en una buena difusión y dispersión, en donde una composición con alto contenido de maltenos se presenta como la alternativa más deseable para restaurar las propiedades reológicas del asfalto (Karlsson y Isacsson, 2003), y así mismo, un bajo contenido de asfaltos muestra también tener una buena efectividad como agente rejuvenecedor (Carpenter y Wolosick, 1980). De esta manera, la aplicación de agentes rejuvenecedores sobre RAP permite mejorar las propiedades reológicas del material (Pasetto, Baliello, Giacomello, y Pasquini, 2021), lo que convierte al uso de este material en una opción técnico-económica atractiva comparada con respecto a la fabricación de mezclas asfálticas en caliente tradicionales.

Los beneficios otorgados por la aplicación de RAP y rejuvenecedores sobre mezclas asfálticas en caliente no constituyen la última frontera en reducción y optimización de costos y daños medioambientales. El uso de Mezclas Asfálticas Frías (CMA, por sus siglas en inglés) ha demostrado potenciar aún más el beneficio que otorga el uso de estos materiales. Por ejemplo,

la producción de 1 tonelada de mezcla CMA reduce hasta en un 33 % la emanación de CO₂ respecto a una mezcla fabricada en caliente (HMA), mientras que el consumo de energía puede ser reducido hasta en un 60 % al comprar ambos tipos de mezclas (Jain y Singh, 2021).

Aún cuando existen suficientes motivos para emplear mezclas asfálticas frías como solución para algunos proyectos viales, existe todavía falta de conocimiento, consenso y aplicación respecto a aspectos que van desde el método de diseño de este tipo de mezclas así como del comportamiento y mecanismo de falla o el efecto que tienen los aditivos y rejuvenecedores sobre este tipo de tecnología. De hecho, el uso de agentes rejuvenecedores en mezclas asfálticas en caliente se encuentra estudiado y sus efectos comprobados, resultando en efectos positivos y facilitando así la incorporación de altas dosis de RAP en pavimentos asfálticos (Baghaee Moghaddam y Baaj, 2016). Sin embargo, aún no existe un entendimiento profundo del efecto que tienen estos agentes rejuvenecedores en mezclas asfálticas frías, de que forma modifican su comportamiento mecánico y como interactúan con el ligante RAP envejecido dadas las menores temperaturas de mezclado y compactación (Arimilli, Jain, y Nagabhushana, 2016; Liu, Sun, Zhai, y Huang, 2022).

1.2. Objetivos

1.2.1. Planteamiento del Problema

Debido al potencial económico y medioambiental que proporciona por una parte el uso de RAP y rejuvenecedores, y por otra el uso de mezclas CMA, es que se plantea evaluar el comportamiento mecánico y reológico de mezclas asfálticas frías con altas dosis de RAP, incorporando un agente rejuvenecedor (LP) extraído a partir de la pirólisis de neumáticos mineros fuera de uso (NFU-M), los cuales tienen un alto contenido de maltenos por lo que permiten tanto reducir la viscosidad como reparar microgrietas y disminuir la rigidez hasta en un 100 % en ligantes asfálticos envejecidos (Norambuena-Contreras, Arteaga-Pérez, Concha, y Gonzalez-Torre, 2021), y en donde además el uso de este material permite mejorar las propiedades de ductilidad del asfalto envejecido (Sun, Zou, Wang, y Weng, 2011).

A pesar de los beneficios mencionados que proporciona el uso de RAP en mezclas asfálticas, la realidad de la industria vial chilena se encuentra en una etapa bastante preliminar respecto a los porcentajes de asfalto reciclado que se reutilizan en países desarrollados, donde por ejemplo en los Estados Unidos la reutilización corresponde al 99 % en peso de este material (Tarsi, Tataranni, y Sangiorgi, 2020), mientras que en Europa dicho porcentaje llega al 70 % (Planas Willis, Xavier, 2016). En Chile por su parte, no se tiene una estimación precisa de la cantidad de material RAP que se reutiliza, sin embargo el Ministerio de Obras Públicas sólo permite que la adición de este material sea como máximo un 15 % respecto al peso total de los agregados para mezclas de tipo HMA.

Los desafíos por tanto son varios, desde definir apropiadamente un método de mezclado que permita asegurar una buena difusión y dispersión del rejuvenecedor en el RAP, y que sea aplicable en mezclas asfálticas frías con su posterior uso en procesos industriales; hasta determinar las limitaciones del comportamiento mecánico de estas mezclas con diferentes contenidos de RAP, comparando apropiadamente las propiedades mecánicas entre las distintas combinaciones posibles.

1.2.2. Hipótesis y Objetivos de la investigación

La hipótesis a considerar en este estudio se establece como: "La incorporación de rejuvenecedores basados en líquidos pirolíticos (LP) de neumáticos fuera de uso mineros (NFU-M) en la fabricación de mezclas asfálticas frías con altas dosis de RAP permite incrementar la resistencia a tracción indirecta en condición saturada como no saturada, así como también disminuir su módulo dinámico y mejorar su desempeño ante daño por ahuellamiento"

Esta investigación tiene como objetivo general evaluar mecánicamente el desempeño de mezclas asfálticas frías con emulsión al aplicar un tipo de rejuvenecedor basado en líquido pirolítico extraídos a partir de neumáticos fuera de uso mineros (NFU-M) mediante los ensayos de tracción indirecta, módulo dinámico y número de flujo. Para alcanzar dicho objetivo se desarrollan los siguientes objetivos específicos:

- Verificar el diseño de mezclas asfálticas frías con emulsión con contenidos de RAP de 0, 50 y 100 % respecto al peso total de los agregados secos.
- Medir el efecto que tienen diferentes dosis de rejuvenecedor sobre el daño por humedad en mezclas frías con diferentes contenidos de RAP.
- Medir la variación del módulo dinámico en mezclas frías con diferentes contenidos de rejuvenecedor y RAP.
- Evaluar la resistencia ante deformación terciaria de mezclas asfálticas frías con diferentes dosis de RAP y rejuvenecedor, y su susceptibilidad ante deformación terciaria o permanente.
- Analizar el efecto que tienen las diferentes dosis de RAP y agente rejuvenecedor sobre la rigidez, la deformación permanente y el daño por humedad en mezclas asfálticas frías con emulsión.

1.3. Estructura de la Tesis

La presente tesis está organizada en 7 capítulos, siendo el primero de ellos relativo a la introducción, para luego desarrollar el planteamiento del problema, a partir de lo cual se describirá una hipótesis, así como también el objetivo general y los objetivos específicos que permitirán validar o rechazar dicha hipótesis. El capítulo 2 describe detalladamente el estado del arte a partir de una revisión literaria en la que se detallan los fundamentos teóricos y experimentales sobre el uso y comportamiento de mezclas asfálticas frías, RAP y rejuvenecedores. El tercer capítulo se estructura en base a la metodología utilizada durante este estudio, señalando los materiales utilizados, las técnicas aplicadas, y los procedimientos y normativas empleadas. Respecto al cuarto capítulo, en este se presentan los resultados de cada uno de los ensayos realizados, describiendo apropiadamente cada combinación, para luego desarrollar un análisis exhaustivo de los resultados observados, comparándolos e interpretándolos en función de la hipótesis investigativa así como respecto a los valores esperados de acuerdo a la literatura. Por último, el capítulo 5 concluirá la investigación, describiendo los aspectos fundamentales encontrados durante este estudio, las implicancias de los resultados sobre el uso de mezclas asfálticas frías con RAP, y propuestas sobre futuros lineamientos que permitan ampliar la línea investigativa. Finalmente, el capítulo 6 incluye referencias bibliográficas y el capítulo 7 los anexos correspondientes, a modo de complementar lo expuesto durante este estudio.

II | Capítulo 2

2. Revisión de la literatura

2.1. Sostenibilidad en Pavimentos Asfálticos

En la actualidad, la mayoría de los esfuerzos a nivel mundial se encuentran centrados en la mitigación y reducción de los efectos producidos por el cambio climático; muchas de las políticas económicas, sociales y ambientales se encuentran dirigidas a optimizar los recursos disponibles, disminuir la huella de carbono, y en general a alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas. En este sentido, la industria vial cuenta con un potencial enorme para encaminarse hacia la sostenibilidad; dadas las condiciones de construcción, operación y ciclo de vida de la infraestructura vial, la necesidad de mantención y la consecuente disponibilidad de recursos para su reutilización puede ser un gran aliciente para incrementar la inversión en tecnologías que reduzcan la necesidad de extracción de nuevos materiales, generando de esta forma una retroalimentación positiva entre estos 2 factores.

Se espera que la demanda de infraestructura vial aumente significativamente durante los próximos años dadas las tendencias globales de crecimiento económico y demográfico, esperando para el año 2050 un incremento de hasta un 23 % respecto a la cantidad de caminos mundiales estimados para el año 2018, esto es, la construcción de nuevos caminos se estima en alrededor de 4.7 millones de kilómetros (Meijer, Huijbregts, Schotten, y Schipper, 2018). De esta forma, los requerimientos de materiales para satisfacer la demanda serán cada vez más difíciles de cumplir con las técnicas constructivas tradicionales; por ello, el entendimiento y la posterior verificación fehaciente de tecnologías que incorporen materiales que ya terminaron su ciclo de vida se presenta como una alternativa vital para facilitar el cumplimiento de las altas exigencias que se esperan sobre el sector vial durante los próximos años.

2.1.1. Economía Circular y Gestión de Residuos

Una adecuada planificación, basada en los principios de la economía circular, constituye el primer paso para una gestión eficiente de los residuos de construcción y demolición (RCD), permitiendo su correcta valorización y la evaluación de su potencial reutilización en nuevas infraestructuras viales. A través de la valoración, se puede identificar además la magnitud de las ventajas que pueden otorgar los materiales viales reutilizados como son, por ejemplo: la reducción en el uso de materiales vírgenes, la reducción en el consumo de combustible y de emisiones de gases nocivos al medioambiente, el potencial mejoramiento en el desempeño de pavimentos frente a daños como ahuellamiento o agrietamiento, y la disminución o eliminación del transporte y tratamiento requeridos para enviar estos materiales a botaderos (Xiao, Yao, Wang, Li, y Amirkhanian, 2018). En este sentido, el RAP se presenta como uno de los que mejor puede valorizarse por su capacidad de reutilización así como por su potencial en restauración de sus propiedades reológicas, las cuales son fundamentales para un buen desempeño de los pavimentos asfálticos. Así, el uso de pavimento asfáltico recuperado RAP se presenta como una alternativa bastante atractiva en la mantención y rehabilitación de caminos (Zhao, Goulias, y Peterson, 2021).

2.1.2. RAP y su efecto en la reducción de la huella de carbono

Los beneficios por la incorporación de RAP en las mezclas asfálticas han sido ampliamente estudiados, observando una significativa reducción en consumo energético así como en la emisión de gases de efecto invernadero. La incorporación de contenidos de RAP de 30, 40 y 50 %, permitieron reducir la materia prima requerida para generar energía en un 26, 33 y 40 % respectivamente. Asimismo, los ahorros energéticos producto de la incorporación de RAP van desde 522 495 [MJ] a 870 825 [MJ] cuando se consideran dosis de 30 % a 50 % de este material, mientras que la reducción de CO₂ para las mismas dosis va desde los 38 114 hasta los 63 524 [kg], por kilómetro de pavimento construido (Aurangzeb, Al-Qadi, Ozer, y Yang, 2014). Un aspecto relevante a destacar es que las fases de mezclado y producción de materiales representan casi la totalidad de las emisiones de CO₂ en la construcción de pavimentos asfálticos (Ver Figura 1), por lo que la aplicación de RAP reduce significativamente la necesidad de producir nuevos materiales competentes, disminuyendo notablemente la emisión de dichos gases nocivos al medioambiente (Milad y cols., 2022).

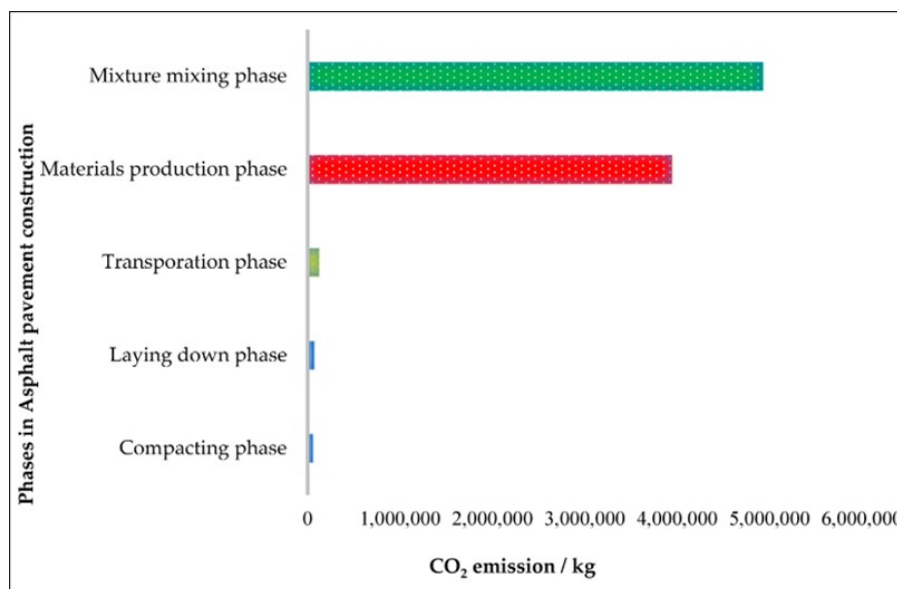


Figura 1: Emisión de CO₂ en la Construcción de Pavimentos Asfálticos.

Fuente: Milad y cols. (2022).

2.1.3. Agentes Rejuvenecedores y su relación con la sustentabilidad

Los agentes rejuvenecedores son materiales capaces de restaurar las propiedades reológicas de asfaltos envejecidos, reduciendo la rigidez del ligante hacia estados previos, idealmente cercanos al original. Existen diferentes clases de rejuvenecedores, pudiendo ser tan variados como aceites de motor, materiales extraídos de la refinación del petróleo, diferentes clases de polímeros, aceites vegetales o líquidos pirolíticos extraídos a partir de NFU. Cada uno requiere dosis específicas para optimizar su efecto sobre el ligante envejecido y evitar el sobreablandamiento, asociándose sus beneficios a una mayor resistencia a la fatiga y a la reducción de la viscosidad y la rigidez del material. (Al-Saffar y cols., 2021).

Ahora bien, la incorporación de rejuvenecedor no solamente mejora las propiedades técnicas sino que también tiene la capacidad de reducir el consumo energético del RAP producto de los requerimientos derivados de menores temperaturas para su uso. En la Figura 2) se aprecia

como el efecto de estos materiales disminuye de forma importante el consumo total de energía, pudiendo reducir hasta en alrededor de 300.000 [MJ] al comparar la producción de una tonelada de RAP con y sin agente rejuvenecedor (Ahmad y cols., 2018).

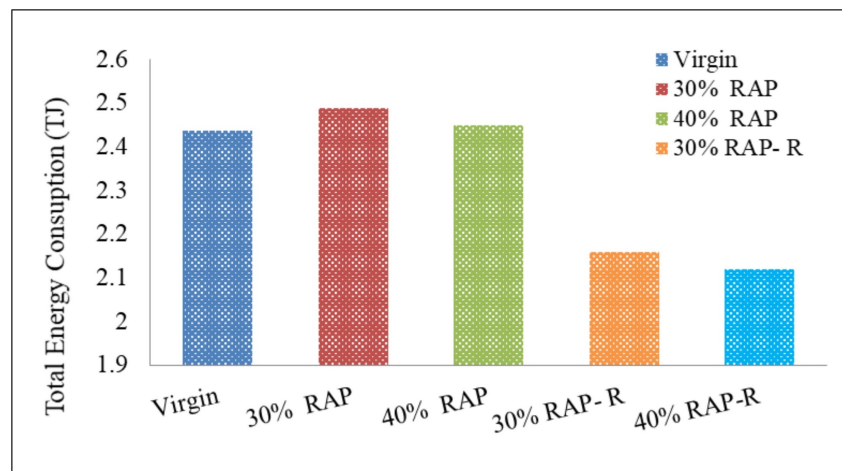


Figura 2: Consumo Energético Para la Fabricación de 1 Tonelada de RAP Con y Sin la Presencia de Agente Rejuvenecedor (R).

Fuente: Ahmad y cols. (2018).

2.2. Mezclas Asfálticas

Las mezclas asfálticas son uno de los materiales más utilizados en la construcción de pavimentos a nivel mundial, y pueden ser definidas como un material compuesto por agregados pétreos unidos a través de un material bituminoso comúnmente llamado ligante o cemento asfáltico. Este ligante proporciona cohesión así como también la respuesta viscoelástica característica de este tipo de materiales; mientras que los agregados le proveen resistencia mecánica y rigidez a la mezcla. Ahora bien, debido a las solicitaciones climáticas y a los esfuerzos inducidos producto de cargas de tránsito es que estos materiales reducen su resistencia mecánica y durabilidad en el tiempo (Norambuena-Contreras, Serpell, Valdés Vidal, González, y Schlangen, 2016).

Existen diferentes clases de mezclas asfálticas, tal como se aprecia en la Figura 3, las que se encuentran comúnmente definidas según sus temperaturas de mezclado y compactación: las mezclas asfálticas frías (CMA) fabricadas a temperaturas menores a 60 °C, mezclas asfálticas semitibias (HWMA) fabricadas a temperaturas menores a 100 °C, usualmente a 70 - 90 °C, mezclas asfálticas tibias (WMA) fabricadas a temperaturas de 110 - 140 °C, y mezclas asfálticas en caliente (HMA) fabricadas a temperaturas entre 150 - 175 °C, con un valor típico en torno a los 160 °C (Rubio, Moreno, Martínez-Echevarría, Martínez, y Vázquez, 2013).

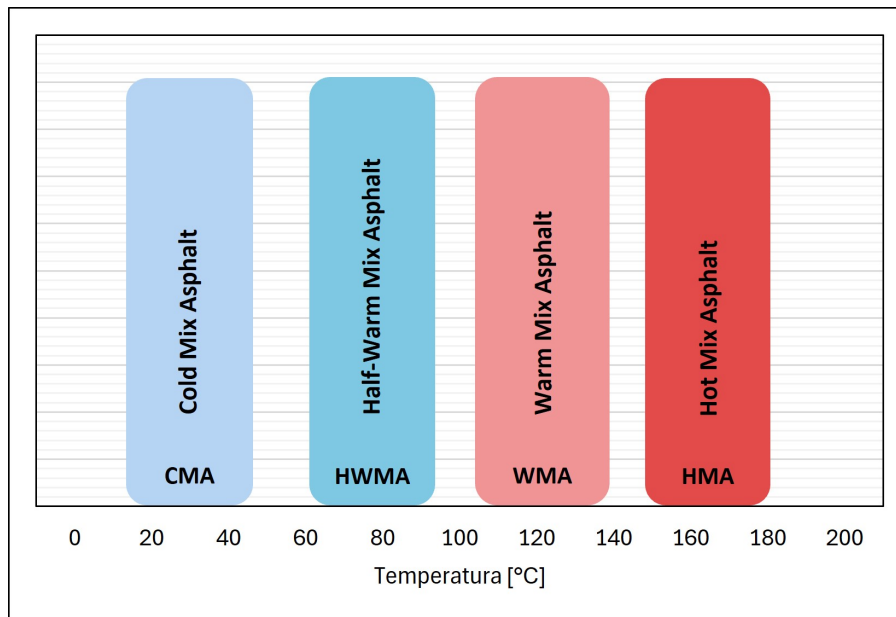


Figura 3: Clasificación de Mezclas Asfálticas Según Temperatura de Fabricación.

Fuente: Modificado de Rubio y cols. (2013).

Las mezclas asfálticas frías son materiales compuestos por la mezcla de, o bien emulsión asfáltica, o bien asfalto espumado, en conjunto con agregados pétreos no calentados, lo que los convierte en materiales más económicos y menos contaminantes en comparación a mezclas asfálticas de tipo HMA (Jain y Singh, 2021). Usualmente, a este material se le añaden agentes estabilizantes así como también cemento para mejorar sus propiedades mecánicas y de durabilidad, proporcionando así una estructura más resistente en comparación (Bocci, Grilli, Cardone, y Graziani, 2011).

Ahora bien, dado que los agregados pétreos proporcionan el esqueleto mineral de las mezclas asfálticas es que deben cumplir estrictos estándares mecánicos y de durabilidad así como también resistencia ante efectos climáticos, principalmente ciclos hielo/deshielo. En conjunto con lo anterior, la granulometría de los agregados debe permitir una alta densidad a la mezcla asfáltica de modo de evitar vacíos de aire demasiado grandes pero también debe conceder suficiente espacio para que la interacción entre el ligante y todas las partículas sea total, esto es, que cada partícula quede efectivamente recubierta en su totalidad por cemento asfáltico.

A diferencia de las mezclas asfálticas en caliente donde el ligante asfáltico es calentado a altas temperaturas, las mezclas asfálticas frías utilizan emulsiones asfálticas que son dispersiones líquidas en el que se suspende el cemento asfáltico dentro de un medio acuoso; lo que permite mejorar la trabajabilidad y dispersión del ligante producto de una menor viscosidad a temperatura ambiente que la que tendría en condición habitual. Así, una emulsión es un sistema de 2 fases inmiscibles: la primera fase se denomina “fase dispersa” y corresponde a gotas de asfalto de entre 5 a 50 [μm] que se encuentran dentro de la segunda fase, que corresponde al “medio acuoso” en el cual estas gotas se encuentran suspendidas. Sin embargo, debido a la incompatibilidad química entre ambos materiales, es requerido el uso de agentes emulsionantes, de forma de evitar la separación de fases. Estos agente emulsionantes tienen por lo general carga eléctrica, lo que permite clasificar a la emulsión en 3 categorías: aniónicas, catiónicas o no-iónicas. Por lo general, las proporciones de cada componente dentro de la emulsión se encuentran entre:

40 - 75 % de asfalto, 0.1 - 2.5 % de agente emulsionante, y 25 - 60 % de agua (Jain y Singh, 2021).

Los agentes emulsionantes, un tipo de tensioactivo, son fundamentales para reducir la gran tensión interfacial existente entre el agua y el asfalto. La Figura 4 muestra como el agente emulsionante favorece la formación de una doble capa eléctrica alrededor de las gotas de asfalto, lo que produce repulsión entre las fases dispersas, favoreciendo así la producción de un sistema altamente estable (Mercado y Fuentes Pumarejo, 2016).

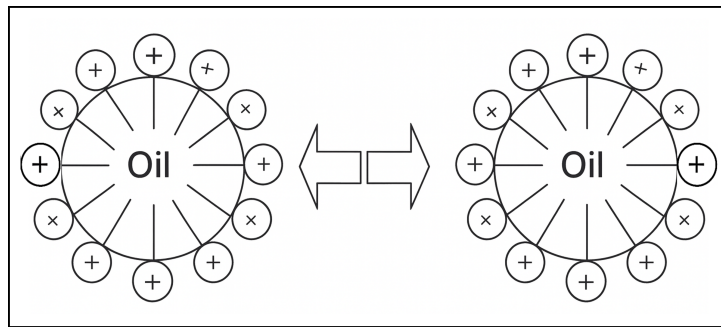


Figura 4: Interface Doble Capa Eléctrica Entre 2 Gotas de Asfalto.

Fuente: Mercado y Fuentes Pumarejo (2016).

Sin embargo, para que el ligante asfáltico pueda comenzar a adquirir resistencia y rigidez es necesario que ocurra un quiebre en el sistema de 2 fases, el cuál es un proceso que ocurre en 4 etapas, tal y como se aprecia en la Figura 5: durante la primera etapa se tiene un equilibrio estable que mantiene las gotas de asfalto separadas entre sí; durante la segunda etapa las gotas de asfalto adquieren suficiente energía para superar la repulsión que produce el agente emulsionante, adhiriéndose una a otra en un proceso denominado floculación; una vez comienza a ocurrir el proceso de floculación, el agua presente en la emulsión puede quedar atrapada dentro de la adhesión de las gotas de asfalto, lo que lleva a la última etapa en donde la energía inducida sobre la partícula de agua produce su evaporación y la posterior unión en cadena de todas las gotas de asfalto, generando una matriz completa y uniforme de este material en un proceso denominado coalescencia (Technical Activities Division, Transportation Research Board, y National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2006).

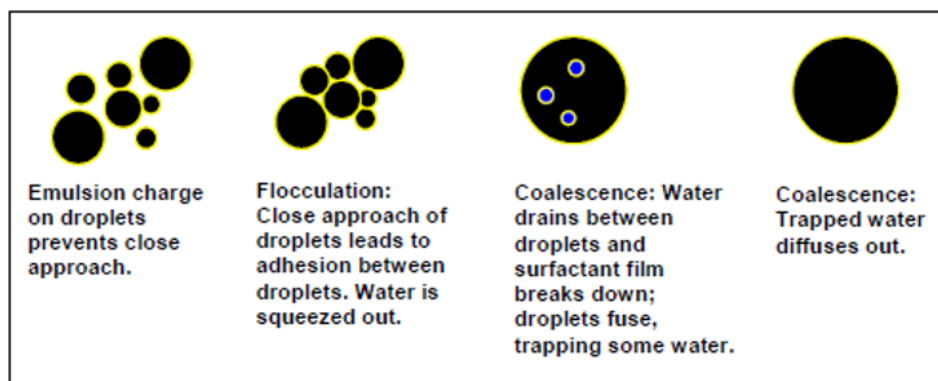


Figura 5: Etapas de Quiebre de Emulsión Asfáltica.

Fuente: James, A. (2006).

Con lo anterior, es posible entonces clasificar a las emulsiones en función del tipo de carga (la ausencia de la letra “C” denota una emulsión aniónica), así como en el tiempo de quiebre: “RS”, “MS”, “SS”, y “QS” para quiebre rápido, medio, lento y controlado respectivamente. Por último, es posible añadir un número que denota la viscosidad relativa (1 presenta menor viscosidad que 2) y una letra “h” o “s” para indicar si el asfalto base es duro o blando respectivamente. Así, por ejemplo CSS-1h es una emulsión catiónica de quiebre lento con baja viscosidad relativa fabricada con asfalto base duro.

2.3. Deterioros en Mezclas Asfálticas Frías

En cuanto a los deterioros, las mezclas asfálticas frías presentan algunas deficiencias en comparación con mezclas asfálticas tradicionales en caliente, incluyendo menor resistencia relativa, mayor tiempo de curado, menor durabilidad y mayor susceptibilidad ante solicitaciones ambientales (Dong y cols., 2021); evidenciándose 2 tipos de deterioros principales: daño por humedad y ahuellamiento. El daño por humedad se define como la pérdida progresiva de las propiedades mecánicas debido a la exposición ante esta sustancia debido al debilitamiento en la unión interfaz ligante-agregado pétreo por la incompatibilidad química del primero con el agua. A su vez, el ahuellamiento corresponde a la acumulación de deformación permanente causada por la repetición de esfuerzos sobre una misma área a altas temperaturas, afectando ciertamente la calidad en la conducción y la regularidad del pavimento (Rezaei, Hashemian, Bayat, y Huculak, 2017); los tipos de deterioros mencionados pueden ser visualizados en la Figura 6 y en la Figura 7.



Figura 6: Daño por Humedad en Mezcla Asfáltica.

Fuente: Larrain (2015).



Figura 7: Daño por Ahuellamiento en Mezcla Asfáltica.

Fuente: Shatnawi, Obaidat, y Al-Mistarehi (2021).

2.4. Ligante Asfáltico

El ligante asfáltico es un material orgánico, fluido, viscoso, complejo y heterogéneo, extraído generalmente de la refinación del petróleo y compuesto por moléculas polares denominadas asfaltenos, dispersos en una fase continua apolar de parafinas saturadas, aceites aromáticos y resinas denominadas maltenos; la separación de estos materiales se aprecia en la Figura 8 y corresponde a lo que comúnmente se conoce como fracción “S.A.R.A.” por sus siglas para: saturados, aromáticos, resinas y asfaltenos (Loise y cols., 2019).

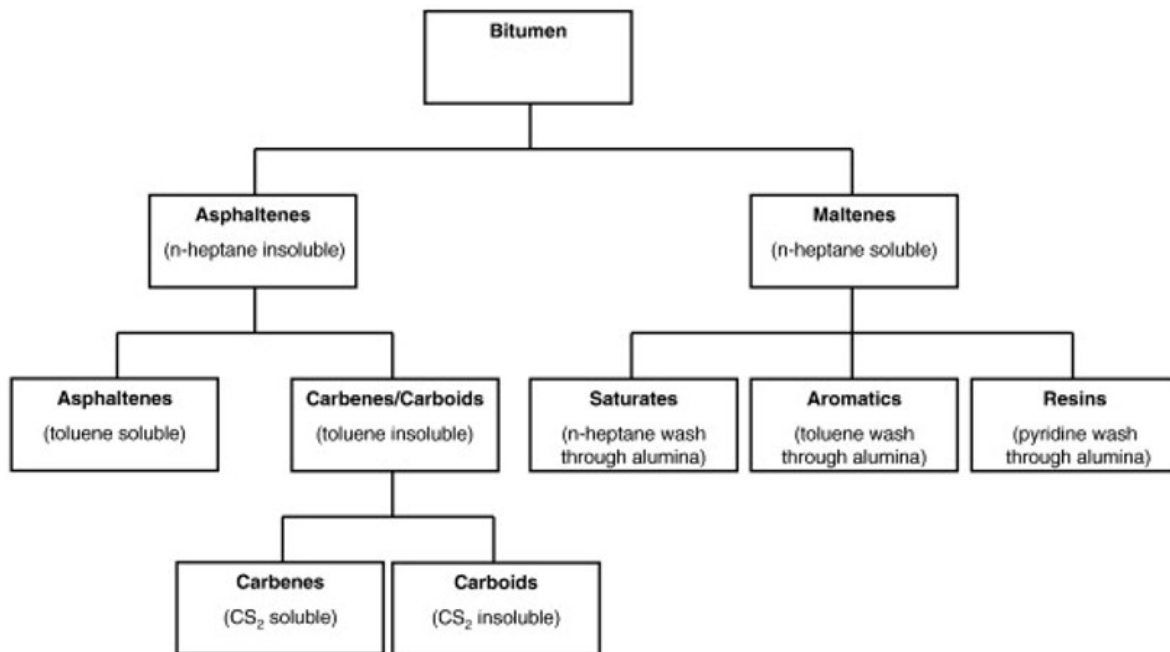


Figura 8: Componentes del Ligante Asfáltico Según la Fracción S.A.R.A.

Fuente: Lesueur (2009).

Cada una de las componentes presentes en la fracción S.A.R.A. exhiben diferentes proporciones en peso, ya que su composición depende estrechamente del origen del crudo del que fue refinado el asfalto. Aún así, hay algunos parámetros que permanecen relativamente estables y se encuentran dentro de determinados rangos. Los saturados, por ejemplo, se presentan en proporciones de entre 5 a 15 % en peso del ligante y se encuentran en estado líquido a temperatura ambiente. Los aromáticos por su parte corresponden a una de las dos componentes más abundantes con porcentajes en peso del ligante en torno al 30 - 45 %, y se encuentran como un líquido de color amarillento a rojizo a temperatura ambiente, además poseen ligeramente mayor viscosidad que los saturados a la misma temperatura. En cuanto a las resinas, estas corresponden a la otra componente más abundante del asfalto con porcentajes en peso del ligante en torno al 30 - 45 %, y donde, a diferencia de las componentes anteriores se encuentra en estado sólido a temperatura ambiente; su importancia radica en que provee estabilidad al cemento asfáltico, actuando como tensioactivos y generando una capa de solvatación alrededor de los asfaltenos, ayudando a mantenerlos en suspensión en el medio disperso de maltenos. Respecto a los asfaltenos, representan entre el 5 - 20 % en peso del ligante, se encuentran como un sólido café o negro a temperatura ambiente y son quienes otorgan la viscosidad intrínseca al material; a diferencia de los maltenos, son insolubles en n-heptano pero son solubles en tolueno y son además los mayores responsables por el color negro del cemento asfáltico (Lesueur, 2009).

De forma simplificada, la estructura coloidal del ligante asfáltico (ver Figura 9 y Figura 10) se puede describir como un conjunto de micelas de asfaltenos rodeadas por resinas, las que se encuentran inmersas en una matriz de saturados y aromáticos.

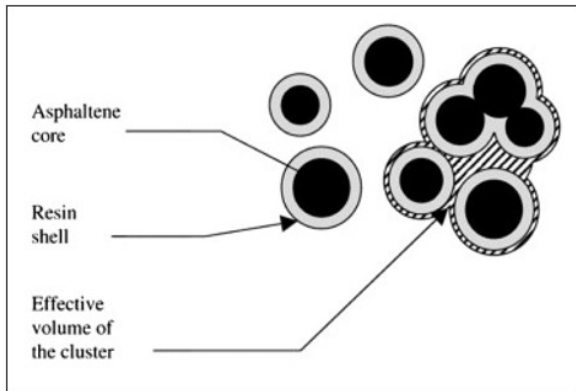


Figura 9: Estructura Coloidal del Ligante Asfáltico.

Fuente: Lesueur (2009).

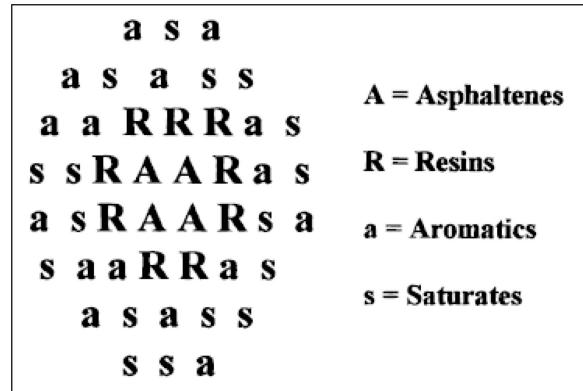


Figura 10: Modelo Físico de la Fracción S.A.R.A.

Fuente: Porto y cols. (2022).

2.4.1. Mecanismos de Envejecimiento

De forma general, el mecanismo de envejecimiento del ligante asfáltico está dado por una transformación de la fracción S.A.R.A. desde la fase de maltenos hacia la fase de asfaltenos, lo que resulta en un contenido relativo mayor de asfaltenos que de maltenos (Ver Figura 11) y el posterior aumento en la viscosidad, así como también una reducción en la ductilidad producto de un aumento en la fuerza de interacción entre las fases polares de asfaltenos. Dicho de otra forma, cuando las micelas de asfaltenos no presentan suficiente movilidad, no puede ocurrir un traspaso adecuado de esfuerzos entre estas componentes, lo que lleva a una menor resistencia ante agrietamiento (Petersen, J. Claine, 1984).

Sin embargo, el proceso de envejecimiento es más complejo que lo anteriormente señalado puesto ocurren diferentes sub-mecanismos que se desarrollan en diferentes escalas temporales. Estos sub-mecanismos comienzan a desarrollarse apenas iniciada la construcción del pavimento flexible o incluso antes a través de la volatilización de los aromáticos en la matriz de maltenos. De esta manera, el envejecimiento puede ser explicado como la suma de procesos como:

1. Oxidación, en donde el oxígeno de la atmósfera interactúa químicamente con los componentes del ligante asfáltico, alterando su composición.
2. Evaporación, debido al bajo peso molecular de componentes presentes en los maltenos, principalmente de los saturados, y donde dichos compuestos tienen alta presión de vapor, lo que produce cambios en la composición matricial interna del ligante así como también una reducción en la cantidad de maltenos del cemento asfáltico.
3. Envejecimiento estructural, dado por reacciones químicas entre las mismas componentes moleculares, lo que genera polimerización, deshidrogenación y la consecuente formación de moléculas livianas en pesadas, aumentando el peso molecular promedio y formando una estructura tridimensional conocida como "gel" que inmoviliza la micro-estructura del ligante asfáltico (Ver Figura 12) (Loise y cols., 2019).

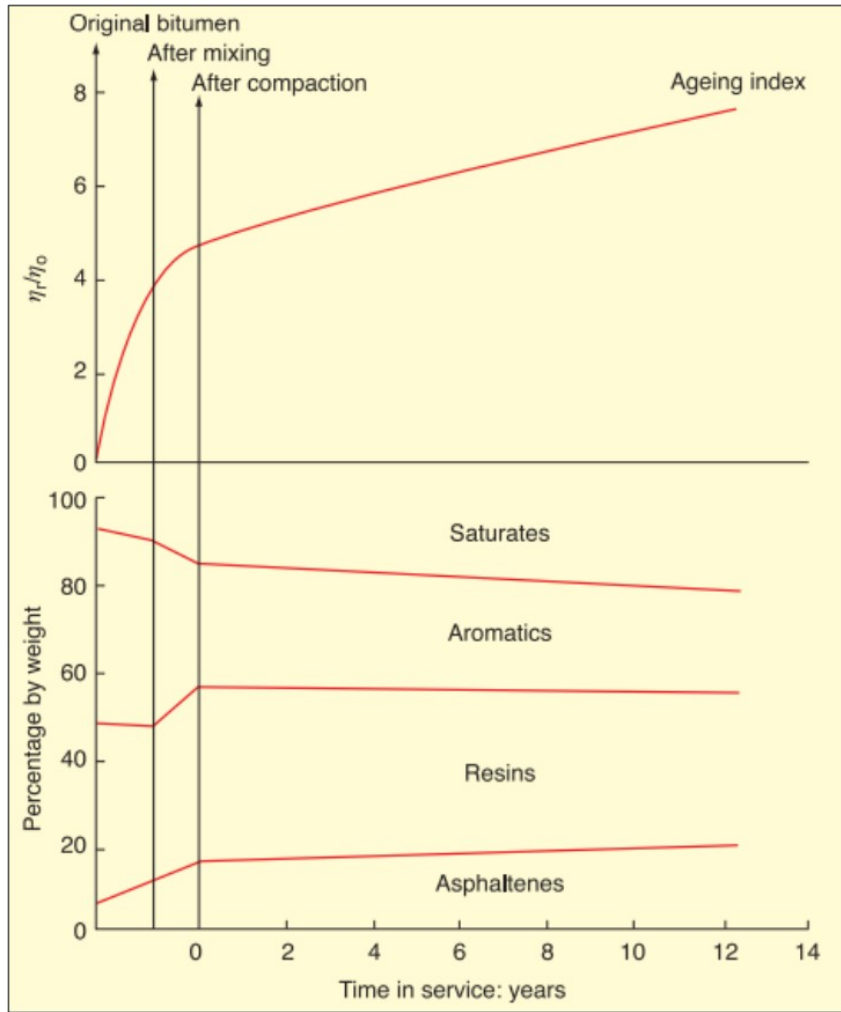


Figura 11: Cambios en la Composición del Ligante Asfáltico Durante el Proceso de Mezclado, Construcción y Servicio.

Fuente: Modificado de Read, John y Whiteoak, David (2003).

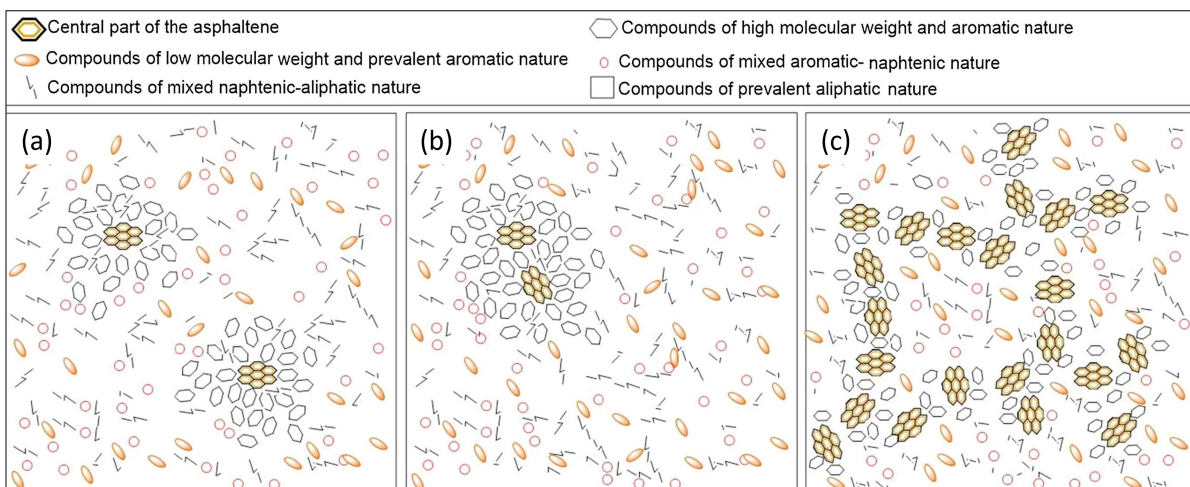


Figura 12: Representación del Modelo Coloidal del Ligante Asfáltico: (a) Estructural Sol, (b) Micelas de Asfaltenos Floculadas, (c): Estructura Gel.

Fuente: Modificado de Behnood y Modiri Gharehveran (2019).

Cada uno de los procesos previamente señalados afecta la composición a macro-escala del ligante asfáltico, aumentando su rigidez, su viscosidad y reduciendo su ductilidad, lo que ciertamente lo convierte en un material más susceptible ante daños por agrietamiento, así como también en un material más frágil respecto a su condición inicial.

2.4.2. Temperatura de Transición Vítrea

La temperatura de transición vítrea (T_g) se define como la temperatura a la cual un material reológico pasa de un estado viscoelástico a un estado sólido, duro y frágil (Behnood y Modiri Gharehveran, 2019). Por lo general, esta temperatura en asfaltos vírgenes no modificados se encuentra en un rango entre -17.0 a -33.0 °C (Kandhal, Prithvi S., 1988). El comportamiento viscoelástico de los cementos asfálticos exhibe 3 regiones principales: la región vítrea, la temperatura de transición vítrea y la región fluida, tal como es posible apreciar en la Figura 13. A pesar de lo anterior, es importante destacar que el envejecimiento del ligante asfáltico no produce prácticamente cambios en la temperatura de transición vítrea (Lesueur, 2009).

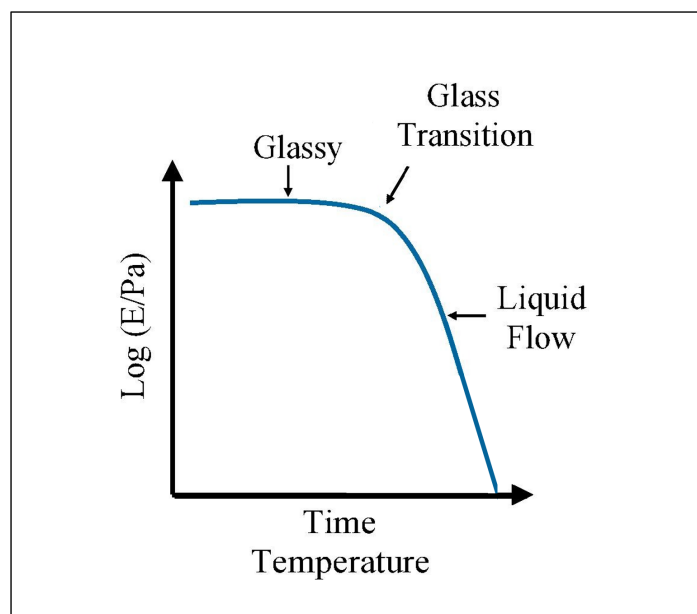


Figura 13: Regiones del Comportamiento Viscoelástico de Ligantes Asfálticos.

Fuente: Modificado de Behnood y Modiri Gharehveran (2019).

2.5. Superposición Tiempo-Temperatura

Los ligantes asfálticos cumplen el Principio de Superposición Tiempo-Temperatura (TTSP) cuando se encuentran en el rango elástico, esto es, corresponde a un material termoreológicamente simple (Nguyen, Pouget, Di Benedetto, y Sauzéat, 2009), en donde esfuerzos aplicados a altas temperaturas tienen la misma respuesta sobre el cemento asfáltico que esfuerzos aplicados a bajas frecuencias y viceversa, tal como se puede visualizar en la Figura 14.

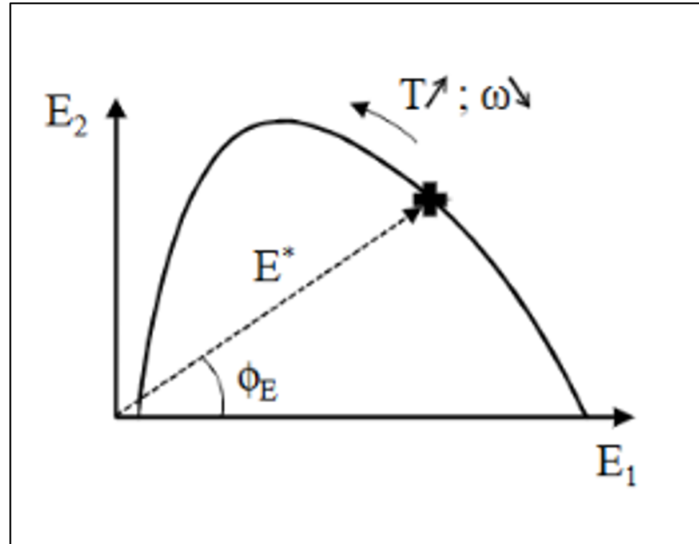


Figura 14: Aplicación del Principio de Superposición Tiempo-Temperatura en Rango Lineal Elástico.

Fuente: Modificado de Nguyen y cols. (2009).

Como consecuencia directa del Principio de Superposición Tiempo-Temperatura, es posible describir tanto el comportamiento viscoelástico como el módulo de Young a partir de una única curva que describe los efectos sobre el material ante un amplio rango de temperaturas y frecuencias de forma simultánea, usando para ello una temperatura de referencia (T_r) como punto base. Esta curva se denomina “Curva Maestra”, y se construye a partir de la medición de varias isothermas, en donde esta representa como el material resiste las deformaciones ante un mismo esfuerzo aplicado a diferentes frecuencias. A partir de estas mediciones es que es posible emplear un parámetro denominado “Factor de Corrimiento” (a_T) que permite trasladar las curvas hacia una isoterma de referencia, tal y como es posible apreciar en la Figura 15. Matemáticamente es posible expresar el factor de corrimiento respecto a una frecuencia de referencia (isoterma de referencia) como:

$$\omega_{\text{ref}} = \omega \cdot a_T \quad (1)$$

$$\log(\omega_{\text{ref}}) = \log(\omega) + \log(a_T) \quad (2)$$

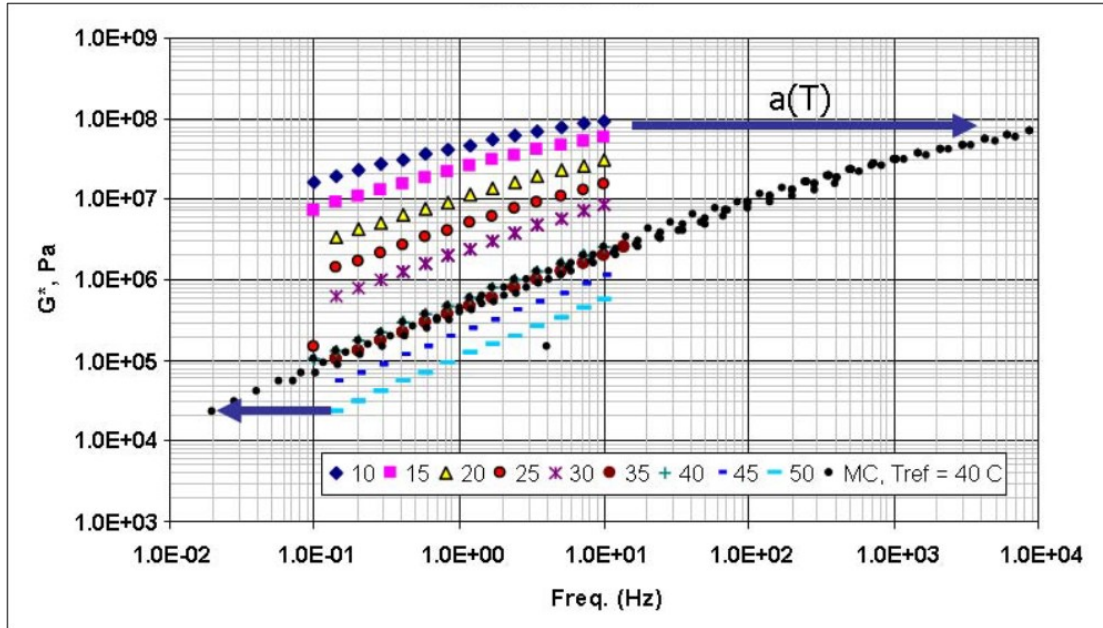


Figura 15: Desplazamiento de Isotermas para Confección de Curva Maestra.

Fuente: Rowe y Sharrock (2011).

Es usual caracterizar los ligantes asfálticos mediante Curvas Maestras en función de su módulo dinámico y ángulo de fase, puesto que a partir de ellos es posible representar cuán rígido es este material y que tan viscoso o elástico es el comportamiento del mismo ante un amplio rango de frecuencias (o temperaturas). Es posible describir el módulo dinámico, que no es otra cosa que la magnitud del módulo complejo ($|G^*|$), a partir de relaciones matemáticas entre el módulo de almacenamiento (G') y el módulo de pérdida (G''). Dada una carga sinusoidal aplicada sobre el material en rango lineal, se tiene:

$$|G^*| = \sqrt{(G')^2 + (G'')^2} \quad (3)$$

2.5.1. Modelos de Curvas Maestras

Como se mencionó anteriormente, una Curva Maestra no es otra cosa que la representación de la rigidez ($|G^*|$) o del comportamiento visco-elástico (δ) ante un amplio rango de frecuencias. Para esto sin embargo, existen variadas herramientas matemáticas que permiten aproximar la traslación de las curvas respecto a la temperatura de referencia y obtener de esta forma un modelo fiable del comportamiento del cemento asfáltico. Uno de estos modelos corresponde al propuesto por Williams, Landel y Ferry (Williams, Landel, y Ferry, 1955), el que ha sido ampliamente utilizado para describir la relación entre el factor de corrimiento y la temperatura de ligantes asfálticos, y esta dado por:

$$\log(a_T) = \frac{-C_1(T - T_r)}{C_2 + (T - T_r)} \quad (4)$$

donde:

- a_T : Factor de corrimiento.
- T : Temperatura de ensayo.
- T_r : Temperatura de referencia.
- C_1, C_2 : Constantes empíricas del material.

De la misma forma, otro modelo ampliamente utilizado en la ciencia de materiales corresponde a la Ecuación de Arrhenius (Arrhenius, Svante, 1889), la cual puede ser expresada como:

$$\ln(a_T) = \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right) \quad (5)$$

Donde:

- a_T : Factor de corrimiento.
- T : Temperatura de ensayo (K).
- T_r : Temperatura de referencia (K).
- E_a : Energía de activación (J/mol).
- R : Constante ideal de los gases ($8.314 J/mol \cdot K$).

Ahora bien, dados los supuestos realizados para la obtención de estas ecuaciones, se debe señalar que la Ecuación de Williams-Landel-Ferry (Ecuación WLF) tiene un rango de aplicabilidad de T_g hasta $T_g + 100$ °C (Lomellini, Paolo, 1992); mientras que para el caso de la Ecuación de Arrhenius, el rango de aplicabilidad dado el supuesto de entropía constante permite utilizar este modelo en temperaturas cercanas e inferiores al valor de la temperatura de transición vítrea (T_g) (Alegria, Guerrica-Echevarria, Goitiandia, Telleria, y Colmenero, 1995). Así, es importante verificar en todo momento los supuestos de cada una de las ecuaciones descritas antes de emplearlas, puesto que el comportamiento de los materiales asfálticos presenta una alta complejidad reológica, lo que puede llevar a errores en su caracterización.

Una vez desplazadas las isothermas respecto a la temperatura de referencia, es posible describir la curva matemática que compone todos los puntos mediante una gran cantidad de modelos continuos; y en donde uno de los más utilizados corresponde al denominado modelo sigmoidal, el que puede ser visualizado en la Figura 16. Este modelo es utilizado por la Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (MEPDG) y está dado como:

$$\log(|G^*|) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \log(\omega_r)}} \quad (6)$$

Donde:

- $|G^*|$: Módulo dinámico.
- ω_r : Frecuencia reducida.
- $\delta, \alpha, \beta, \gamma$: Parámetros de ajuste.

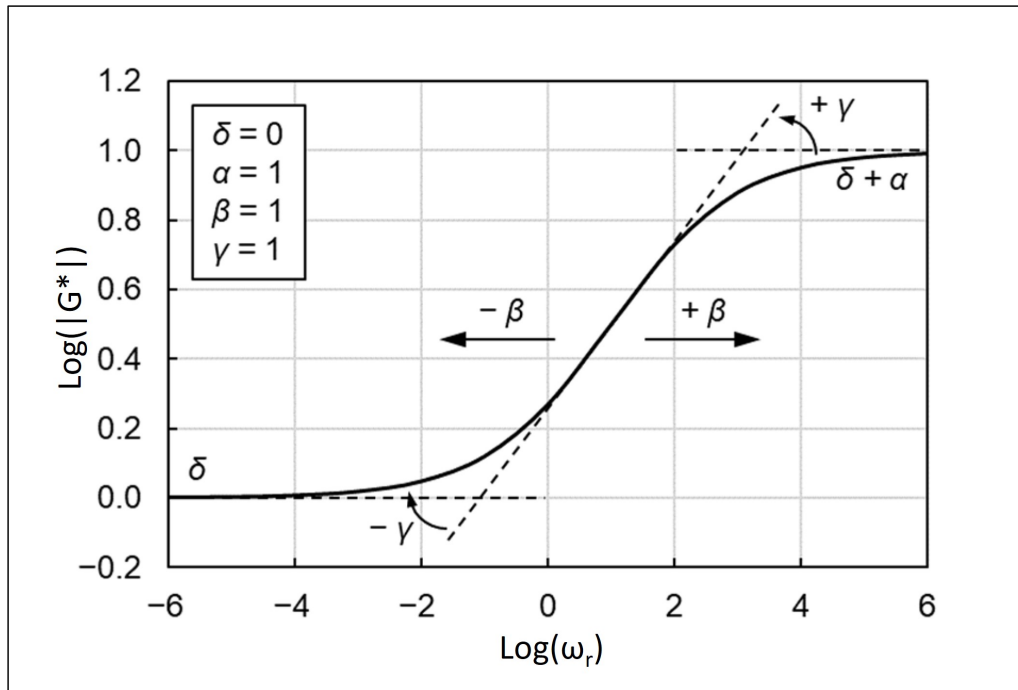


Figura 16: Interpretación Gráfica del Modelo Sigmoideal.

Fuente: Chen, Barbieri, Zhang, y Hoff (2022).

Sin embargo, es importante destacar que este modelo es principalmente útil cuando los datos experimentales se comportan de forma simétrica, no ajustándose de buena forma ante datos sin simetría, y por tanto requiriendo de otro tipo de modelos cuando esta es significativa (Chen y cols., 2022).

2.5.2. Modelo de Número de Flujo (FN)

Para la representación matemática de la curva ciclos – deformación axial, se utiliza el modelo de Francken según lo expuesto en AASHTO T378-22 (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2022), ajustando las mediciones realizadas en el equipo universal, para luego mediante el cálculo de segunda derivada igual a cero, lograr identificar el número de flujo correspondiente al inicio de la zona de deformación terciaria. Las ecuaciones que describen el comportamiento de las mezclas asfálticas y determinan el FN se indican a continuación, con el modelo de Francken dado por:

$$\varepsilon_p(N) = AN^B + C(e^{DN} - 1) \quad (7)$$

Luego, la primera derivada es:

$$\frac{d\varepsilon_p}{dN} = ABN^{(B-1)} + CD e^{DN} \quad (8)$$

Y la segunda derivada queda definida como:

$$\frac{d^2\varepsilon_p}{dN^2} = AB(B-1)N^{(B-2)} + CD^2 e^{DN} \quad (9)$$

Donde:

- $\varepsilon_p(N)$: Deformación axial permanente (%).
- N : Número de ciclos de carga.
- A, B, C, D : Coeficientes de ajuste.

2.6. Pavimento Asfáltico Recuperado - RAP

El pavimento asfáltico recuperado, denominado RAP por sus siglas en inglés, es un material proveniente del fresado y triturado de caminos asfálticos existentes que ya han finalizado su ciclo de vida, y que cuentan con la capacidad de ser completamente reciclados (Tarsi y cols., 2020). Dado que este material es no-renovable, su reutilización constituye un activo tangible con alto valor con la capacidad de reducir la demanda de agregados pétreos vírgenes así como también con la posibilidad de ser utilizado como agregados reciclados para producir pavimentos no ligados (Sabita, 2019).

Aún así, debido a las condiciones a las que se encuentran expuestos los pavimentos asfálticos, el envejecimiento y posterior rigidización de este material no ocurre de manera homogénea, lo que se traduce en una necesidad imperiosa de realizar estrictos controles de calidad para asegurar un correcto desempeño del RAP. En adición a las condiciones reológicas, la granulometría obtenida a partir del fresado y triturado también juega un papel fundamental que limita la cantidad máxima de RAP que admite una nueva mezcla asfáltica (Copeland, Audrey, 2011). Por lo general, luego del proceso de extracción y tratamiento del RAP, el contenido de partículas finas excede ampliamente al contenido de agregados gruesos, lo que restringe el uso del mismo material para la construcción de nuevos caminos debido a las restricciones de granulometría que se imponen para un correcto esqueleto mineral del pavimento. Además, tal como se señaló en el apartado anterior, el envejecimiento del ligante asfáltico incrementa la susceptibilidad al agrietamiento así como también disminuye el desempeño ante daño por humedad, lo que también constituye un aspecto relevante a considerar y que puede limitar aún más la cantidad máxima de RAP que puede ser agregada a un nuevo pavimento asfáltico.

Una partícula de RAP presenta una estructura de capas compuesta por el agregado RAP recubierto por una película de espesor variable de ligante RAP, tal y como puede ser visualizado en la Figura 17, y a partir de la cuál se aprecian zonas delgadas y de gran acumulación de ligante RAP propios de la forma del agregado pétreo (Cavalli, Partl, y Poulidakos, 2017), lo

que ciertamente tiene un efecto en la capacidad de adherencia que existe entre los agregados RAP con otras partículas de RAP pero también con agregados pétreos vírgenes. Aún así, la distribución de la película de ligante RAP no es el único efecto a considerar en la capacidad de adherencia sino también el nivel de envejecimiento que presentan las diferentes capas (Ver Figura 18) y en donde el asfalto que rodea al agregado RAP tiende a ser más rígido mientras más cerca se encuentra de la superficie debido a la interacción directa que existe entre la capa más externa con los factores ambientales y de cargas (Wang, Wang, Guo, Wang, y Li, 2020).

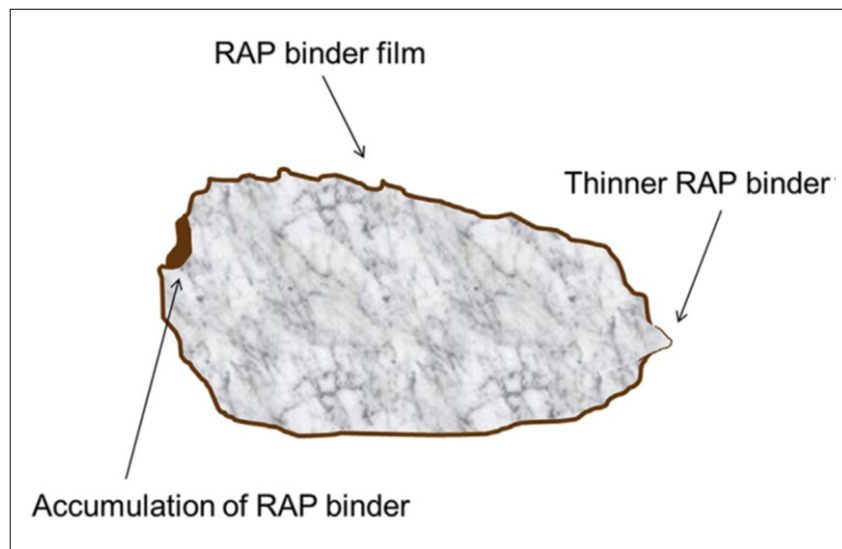


Figura 17: Estructura de Una Partícula RAP Recubierta por Ligante Asfáltico Envejecido.

Fuente: Cavalli y cols. (2017).

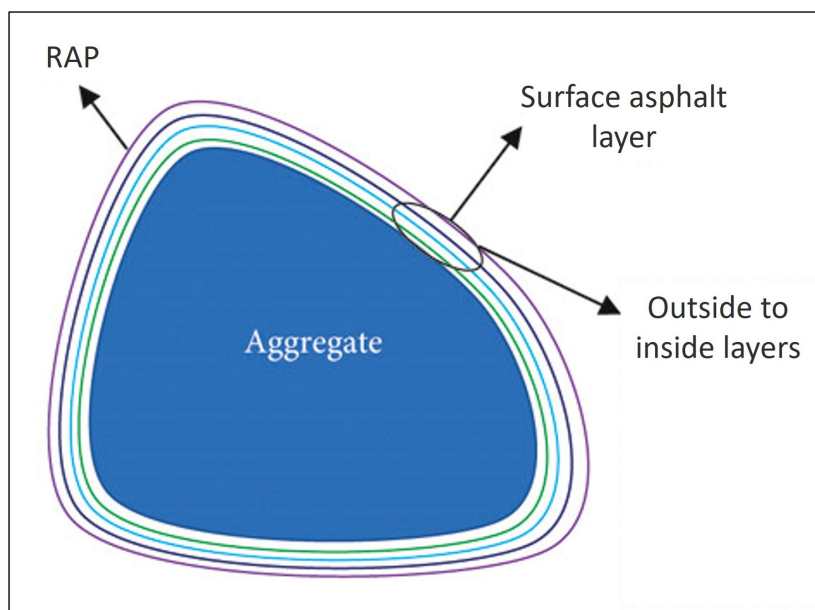


Figura 18: Diagrama de Capas de Ligante Asfáltico Envejecido en Una Partícula de Agregado Pétreo.

Fuente: Modificado de Wang y cols. (2020).

De esta manera, aún cuando existe una alta complejidad en la distribución y en el gradiente de envejecimiento del ligante alrededor de una partícula de RAP, se ha demostrado que la incorporación de altas dosis de RAP (mayor a 40 % en peso total de los agregados pétreos) si constituye una alternativa técnico-económica viable en la construcción de nuevos pavimentos asfálticos (Tarsi y cols., 2020; Zaumanis, Mallick, y Frank, 2014).

2.7. Aditivos Mejoradores de Desempeño

El uso de aditivos mejoradores de desempeño constituye una alternativa atractiva para incrementar la resistencia ante daños comunes en pavimentos asfálticos, como son los mencionados: daño por humedad, fatiga y ahuellamiento. Existe una gran variedad de materiales que permiten mejorar en diferente medida el comportamiento de mezclas asfálticas frías, entre las que se cuentan: emulsiones asfálticas modificadas con polímeros (James, A., 2006), fibras, fillers como cemento o escoria; todas las cuales demostraron mejorar el desempeño ante fatiga, daño por humedad, reducir la deformación permanente, e incrementar la velocidad en que la mezcla gana resistencia temprana (Deb y Lakshman Singh, 2022).

La incorporación de cemento a mezclas asfálticas frías por ejemplo, logró aumentar en un 250 - 300 % la estabilidad Marshall comparado con mezclas sin aditivos; y de la misma forma, la resistencia ante daño por humedad, la resistencia en creep y la rigidez también experimentaron un notable aumento (Jain y Singh, 2021). De la misma forma, el uso de cal hidratada permitió mejorar el desempeño ante daño por humedad de mezclas asfálticas frías (Niazi y Jalili, 2009), mientras que la incorporación de polímeros a la emulsión asfáltica demostró mejorar la susceptibilidad ante daño por ahuellamiento (Chen, Xuang, 2015).

2.7.1. Agentes Rejuvenecedores

Aún cuando los materiales previamente mencionados mejoran sustancialmente el desempeño de las mezclas asfálticas frías, su aplicación en pavimentos que contienen RAP no permite desarrollar una participación activa del ligante RAP envejecido, en otras palabras, para poder obtener el máximo potencial que otorga el RAP es requerido el uso de otros materiales que proporcionen un reblandecimiento o rejuvenecimiento del ligante envejecido para que restituya algunas de sus propiedades y pueda volver a participar en la unión de los agregados pétreos con un alto desempeño mecánico y reológico. Estos materiales se denominan agentes rejuvenecedores (AR) y son materiales capaces de restaurar en diferente medida las propiedades reológicas de cementos asfálticos envejecidos; donde su acción primaria es provocar una disminución en la rigidez del ligante asfáltico, así como también generar una disminución en la viscosidad y un aumento en la ductilidad del material (Loise y cols., 2019). En este sentido, un rejuvenecedor debe cumplir 2 requisitos:

1. Debe tener una alta proporción de aromáticos, que son necesarios para mantener a los asfaltenos en un medio disperso.
2. Debe tener un bajo contenido de saturados, los que son altamente incompatibles con los asfaltenos.

Como es de esperar, la efectividad del rejuvenecedor depende de la dispersión que puede tener este material en el ligante asfáltico envejecido, el cual es un mecanismo complejo y

multietapa consistente en 4 fases, tal y como se aprecia en la Figura 19: el agente rejuvenecedor forma una película de baja viscosidad alrededor del cemento asfáltico envejecido (tiempo 0); la segunda etapa consiste en el rejuvenecedor penetrando dentro del ligante RAP y disminuyendo por tanto la cantidad de rejuvenecedor que se encuentra en la superficie del cemento asfáltico (tiempo 1); para luego pasar a la tercera etapa consistente en una disminución de la viscosidad dentro del ligante y un aumento de la viscosidad en la capa exterior (tiempo 2); para finalmente alcanzar un equilibrio de fases en el interior y exterior del ligante asfáltico envejecido (tiempos 3 y 4) (Carpenter y Wolosick, 1980).

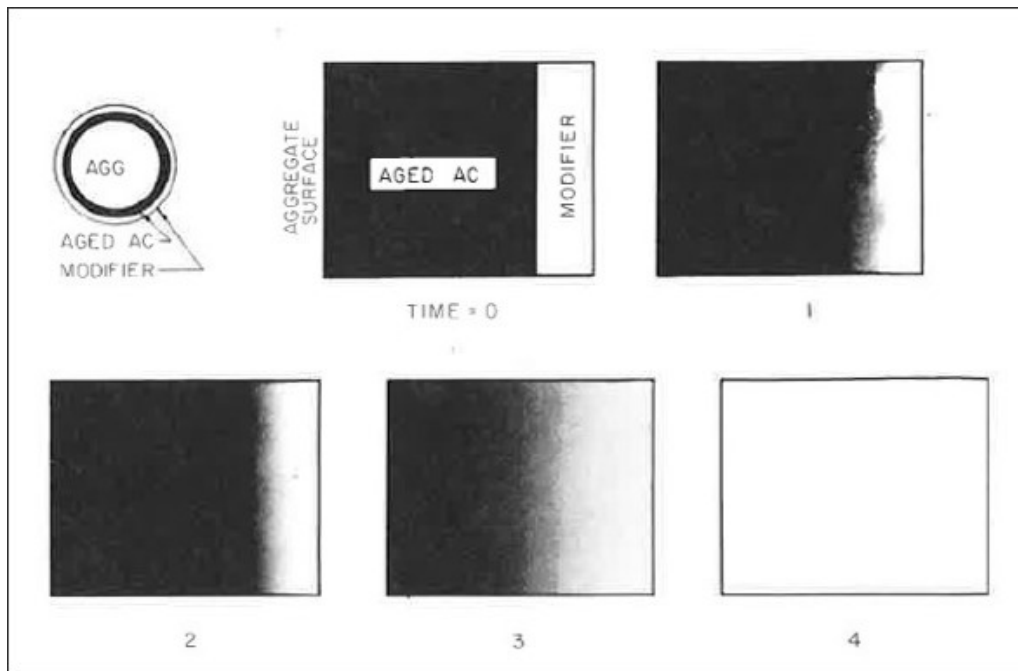


Figura 19: Fases de Difusión de un Agente Rejuvenecedor en un Ligante Asfáltico Envejecido en Términos de su Viscosidad.

Fuente: Carpenter y Wolosick (1980).

De esta manera, la aplicación del agente rejuvenecedor genera dispersión de los asfaltenos, otorgándole a las micelas, las que son asfaltenos rodeadas de resinas, un mayor grado de movilidad dentro de la matriz de maltenos; disminuyendo en consecuencia la rigidez y viscosidad del betún asfáltico. Sin embargo, si la cantidad de rejuvenecedor es excesiva las componentes del ligante asfáltico quedan muy dispersas, lo que afecta al grado de rigidez (reblandeciendo en exceso el cemento asfáltico) requerido para desempeñarse adecuadamente ante solicitaciones climáticas y de esfuerzos.

Como se mencionó, la difusión de los agentes rejuvenecedores en el ligante asfáltico envejecido consta principalmente de 4 fases, pero su grado de efectividad depende directamente de la concentración y del coeficiente de difusión (Karlsson y Isacson, 2003; Ren y cols., 2023) tal como señala la Segunda Ley de Fick:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (10)$$

Donde:

- c : Concentración de masa.
- t : Tiempo de difusión.
- x : Posición.
- D : Coeficiente de difusión interfacial.

De la misma forma, el coeficiente de difusión puede ser descrito según la ecuación de Stokes - Einstein - Sutherland como sigue:

$$D = \frac{k_B T}{6\pi\eta r} \quad (11)$$

Donde:

- k_B : Constante de Boltzmann.
- T : Temperatura absoluta.
- η : Viscosidad dinámica del medio.
- r : Radio de difusión efectivo hidrodinámico.

Así, a partir de las ecuaciones que gobiernan la difusión del rejuvenecedor, se establece la importancia que tienen tanto la temperatura como la viscosidad y la concentración en una efectiva interacción ligante envejecido – agente rejuvenecedor (Ver Figura 20). Por lo mismo, temperaturas bajas requerirán de un mayor tiempo de difusión para lograr un rejuvenecimiento significativo, mientras que una interacción directa, sin la presencia de otros compuestos que puedan interferir negativamente en la reacción, se presenta como el camino ideal a seguir para una activación del cemento asfáltico envejecido.

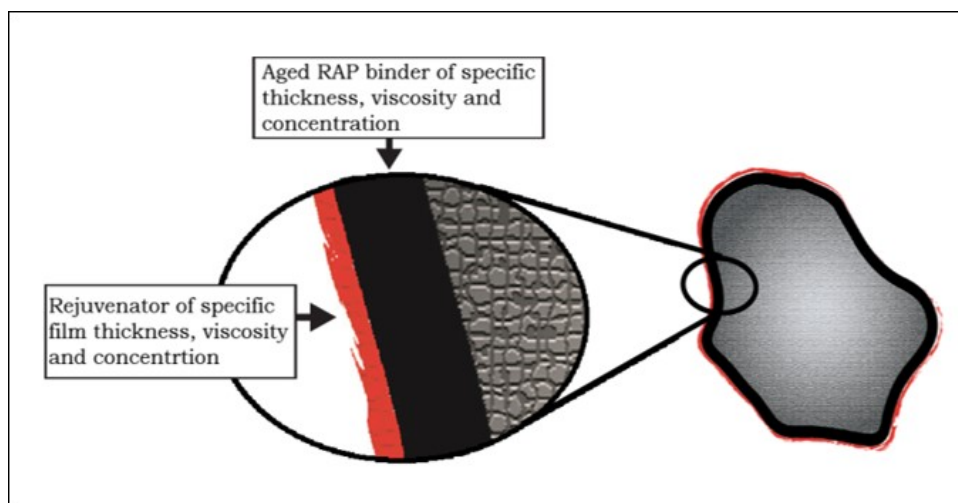


Figura 20: Interface entre Agregados Pétreos, Ligante Asfáltico y Agente Rejuvenecedor.

Fuente: Zaumanis y Mallick (2015).

En adición a lo anterior, existen consideraciones relevantes a tener en cuenta durante el proceso de rejuvenecimiento: en primer lugar, debido a la gran variabilidad química inherente del RAP, no se puede afirmar que existirá una activación completa del ligante envejecido, esto es, asumir una completa difusión del rejuvenecedor en el cemento asfáltico puede llevar a suposiciones erróneas en la cantidad de ligante efectivo que participa en la unión entre agregados pétreos, lo que se traduce en una disminución en el desempeño del pavimento asfáltico (Zaumanis y Mallick, 2015). De la misma forma, la segunda consideración tiene relación con el grado de rejuvenecedor que permanece presente en la mezcla luego del proceso de mezclado y compactación, puesto que temperaturas muy altas pueden inducir un alto nivel de evaporación de este material, impactando directamente en el grado de recuperación reológica que obtendrá el ligante envejecido. En casos extremos, es posible que el agente rejuvenecedor experimente un cambio de fase, volatilizándose completamente, no interactuando ni afectando de forma apreciable al comportamiento reológico del ligante asfáltico.

2.8. Rejuvenecedor extraído a partir de la pirólisis de neumáticos fuera de uso mineros (NFU-M)

En Chile, los neumáticos fuera de uso (NFU) son un problema medioambiental que ha ido creciendo significativamente durante los últimos años (Arteaga-Pérez y cols., 2025). De la mano de la industria minera, los neumáticos desechados por camiones de alto tonelaje se estiman en 45.000 toneladas cada año, acumulando un total de 180.000 toneladas anuales al incluir además los neumáticos de vehículos livianos (Cámara del Neumático de Chile, 2024). Sin embargo, se estima que solo alrededor del 13 % de estos son tratados mediante tecnologías ambientales racionales, mientras el resto es desechado de forma ilegal en botaderos y vertederos clandestinos (Biblioteca del Congreso Nacional, 2016). A modo de hacer cargo a las empresas por la producción de materiales contaminantes, el Estado de Chile promulgó la Ley de Responsabilidad Extendida del Productor (Ley REP) que obliga a que las empresas se hagan cargo de sus residuos, recolectando y valorizando los neumáticos, y en donde la exigencia tanto para los neumáticos livianos como mineros se realizará de forma progresiva hasta el año 2030, donde se espera que la ley obligue a que la valorización y el procesamiento de estos sea del 100 % (Ministerio del Medio Ambiente, 2021).

Como una forma de cumplir con las regulaciones ambientales, el reciclaje de los NFU mediante pirólisis se ha alzado como un método efectivo para convertir la fracción polimérica de los neumáticos en sub-productos gaseosos, sólidos y líquidos. Entre estos sub-productos se cuentan: acero, negro de carbón, gas de síntesis y aceite o líquido pirolítico (LP) (Ver Figura 21); y en donde este último ha emergido como un candidato a ser considerado como agente rejuvenecedor (AR) pues cuenta con un alto contenido de maltenos y también con una baja viscosidad (Norambuena-Contreras y cols., 2021).

Diversos estudios han confirmado su utilidad como agente rejuvenecedor, reduciendo el punto de ablandamiento e incrementando la penetración de un ligante asfáltico envejecido, mejorando al mismo tiempo la susceptibilidad ante el agrietamiento térmico (Ržek, Ravnikar Turk, y Tušar, 2022). En la misma línea, la aplicación del LP como agente rejuvenecedor permitió aumentar la ductilidad de asfaltos envejecidos (Sun y cols., 2011), reducir su viscosidad (Norambuena-Contreras y cols., 2021), disminuir su módulo de rigidez complejo (Kumar, Abhinay y Choudhary, Rajan, 2020), aumentar su resistencia ante daño por fatiga y mejorar la

trabajabilidad del ligante asfáltico envejecido (El-Ashwah y Abdelrahman, 2024).

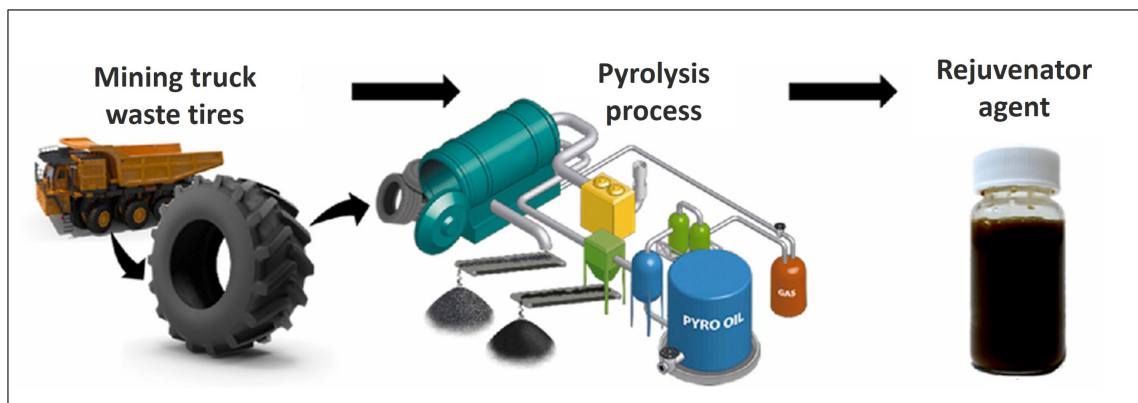


Figura 21: Proceso de Extracción de Líquido Pirolítico.

Fuente: Modificado de Arteaga-Pérez y cols. (2025).

2.9. Diseño de Mezclas Asfálticas Frías con Emulsión

Existen muchos factores que pueden influir en el desempeño de las mezclas asfálticas frías con emulsión, afectando sus propiedades mecánicas y de durabilidad, entre los que se puede mencionar: granulometría, tipo y contenido de ligante asfáltico, contenido de agua, contenido de vacíos, temperatura y tiempo de curado (Dash, Chandrappa, y Sahoo, 2022). Aún cuando se conocen los principales parámetros que influyen en el desempeño de este tipo de mezclas, no existe una metodología de diseño estándar universalmente aceptada (Dash y cols., 2022; Deb y Lakshman Singh, 2022). Por lo general, la metodología Marshall es comúnmente utilizada en países Europeos y Asiáticos, mientras que la metodología Superpave es empleada en Estados Unidos; de todas formas, las temperaturas de diseño varían entre los 0 °C y los 40 °C para ambos métodos (Deb y Lakshman Singh, 2022).

Muchos de los estudios recientes utilizan la metodología desarrollada por el Asphalt Institute en el Manual Series No.14 (AI MS-14) (Asphalt Institute, 1989). Este método recomienda usar una granulometría de agregados pétreos del tipo densa o discontinua, y su ejecución consiste en primer lugar en determinar el contenido inicial de asfalto residual (IRAC) y el contenido inicial de emulsión (IEC) y según lo descrito en las ecuaciones (12) y (13):

$$P = (0.05A + 0.1B + 0.5C) \cdot 0.7 \quad (12)$$

Donde:

- P : Contenido inicial de asfalto residual (% en peso de agregado seco).
- A : Porcentaje de agregado retenido en el tamiz de abertura $N^{\circ}8$ (2.36 mm).
- B : Porcentaje de agregado que pasa el tamiz $N^{\circ}8$ y es retenido en el $N^{\circ}200$.
- C : Porcentaje de agregado que pasa el tamiz de abertura $N^{\circ}200$ (0.075 mm).

$$\text{IEC} = \frac{P}{X} \quad (13)$$

Donde:

- IEC: Cantidad de emulsión inicial (%).
- P : Porcentaje de IRAC en masa total de la mezcla.
- X : Contenido de asfalto presente en la emulsión (%).

Determinado lo anterior, se establece el contenido óptimo de agua de pre-mezclado para el cual se alcanza la densidad máxima compactada de la mezcla como porcentaje en peso de los agregados pétreos secos (PMWC), mientras que el contenido óptimo de agua total se establece como la suma del agua de pre-mezclado y el agua contenida en la emulsión asfáltica (OTLC).

Por último, se varía el contenido de asfalto residual (RAC), esto es, se varía el contenido de emulsión manteniendo constante “OTLC” para todos los casos; y se establece el contenido óptimo de asfalto residual (ORAC) como el valor que otorga mejor estabilidad y fluencia Marshall.

Otro aspecto fundamental dentro del diseño de mezclas asfálticas frías tiene relación con el quiebre de la emulsión asfáltica, también denominado “curado”. En AI MS-14 se señala un procedimiento consistente en mantener las probetas dentro del molde de compactación a temperatura ambiente durante 24 horas; para luego extraerlas del molde y posicionar estas en un horno a temperatura controlada de 38 °C durante 24 horas más.

Ahora bien, aunque no se señala el procedimiento a utilizar para incorporar RAP a la mezcla investigaciones han demostrado que, si bien este material puede ser tratado como una roca negra, es importante verificar en todo momento una buena compatibilidad entre la emulsión asfáltica y el ligante envejecido RAP, dado que esta interacción puede resultar deficiente a temperatura ambiente, empeorando aún más su desempeño producto de que el agua presente en la emulsión es desfavorable para un adecuado proceso de fusión o unión (He y cols., 2024).

En adición a lo anterior, diversos investigadores han propuesto diferentes metodologías de compactación y curado que han demostrado otorgar mejores resultados en resistencia y desempeño mecánico; se ha establecido que por ejemplo un número fijo de golpes mediante compactador Marshall por cada cara o el uso del compactador giratorio Superpave (SGC) otorgan mejor comportamiento a la mezcla y simulan en laboratorio lo esperado en terreno (Dash y cols., 2022; Du, 2024; Liu y cols., 2022). De la misma forma, Providel Briceño, Ignacio Alejandro (2025) estudió diferentes métodos de curado para mezclas asfálticas frías compuestas por diferentes dosis de RAP y demostró que el procedimiento descrito en AI MS-14 no correspondía al mejor de los casos investigados, siendo el curado realizado a 60 °C durante 72 horas el que mejor respuesta obtuvo ante daño por humedad mediante el Ensayo de Tracción Indirecta (ITS, por sus siglas en inglés), tal y como puede ser apreciado en la Figura 22.

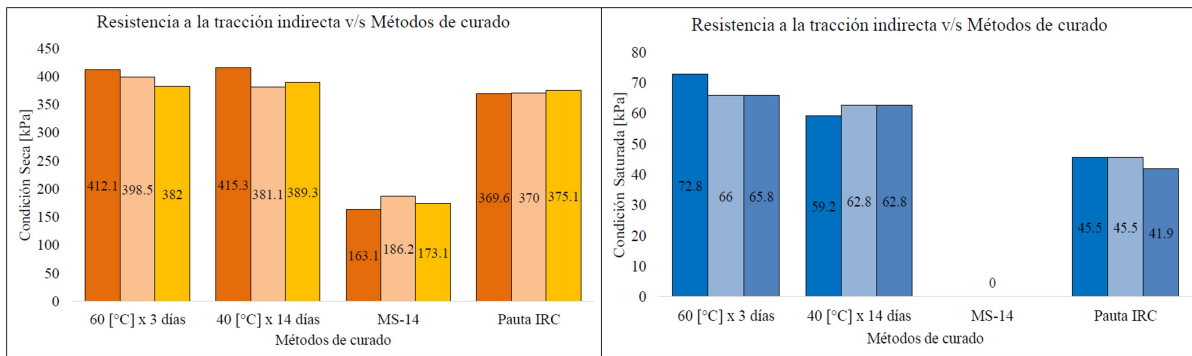


Figura 22: Resistencias en Condición Saturada y No Saturada para Mezclas Asfálticas Frías Compuestas por 100 % de Agregado Virgen.

Fuente: Providel Briceño, Ignacio Alejandro (2025).

2.10. Resumen

En este capítulo se describieron los principales aspectos ambientales y técnicos de las mezclas asfálticas frías con emulsión con alto contenido de pavimento asfáltico recuperado (RAP). En primer lugar, se expusieron lineamientos básicos de economía circular, así como también se destacó la importancia de alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas, y en donde la gestión adecuada de residuos se alza como una de las principales alternativas que tiene la industria vial para reducir la emisión de gases contaminantes al medio ambiente. Se señalaron los principales tipos de mezcla asfáltica clasificados según sus temperaturas de mezclado y compactación; y se observó el potencial que tienen las mezclas asfálticas frías como una alternativa sustentable frente a las mezclas de tipo HMA, y se señalaron los principales deterioros a los que se ven sometidos los primeros, siendo los más críticos: daño por humedad y susceptibilidad ante daño por ahuellamiento.

Durante este capítulo también se abordaron los principales componentes de las mezclas asfálticas frías con emulsión; estableciendo la importancia del ligante asfáltico y detallando los mecanismos de envejecimiento que provocan el consecuente aumento en la rigidez, la reducción de la ductilidad y el aumento de la viscosidad, entre otros, y a partir de los cuales el material deja de comportarse de forma adecuada ante solicitaciones de clima y cargas, alcanzando el final de su vida útil. Sin embargo, dadas las características reológicas del cemento asfáltico, es posible volver a incorporar este material envejecido (denominado RAP) en la confección de nuevos pavimentos asfálticos; reduciendo el impacto económico y ambiental en comparación con mezclas fabricadas únicamente con agregados pétreos vírgenes. Para obtener estos beneficios, es necesario superar desafíos técnicos relacionados con la capacidad de resistencia y deformación y con la susceptibilidad ante daño por humedad, para lo cual se ha investigado el uso de aditivos que pueden mejorar parcial o completamente estos problemas; siendo los más comunes: fillers, fibras y rejuvenecedores.

Los agentes rejuvenecedores son materiales con la capacidad de restaurar las propiedades reológicas de los ligantes asfálticos envejecidos, dispersando la matriz de asfaltenos y obteniendo de esta forma una reducción en la rigidez, un aumento de la ductilidad y una reducción de la viscosidad del cemento asfáltico RAP. Para lograr esto sin embargo, se requiere de una adecuada difusión que se obtiene o bien con temperaturas elevadas o bien con tiempos de exposición e interacción grandes. En este sentido, el líquido pirolítico obtenido a partir de la pirólisis de

neumáticos mineros fuera de uso se presenta como una atractiva alternativa para actuar tanto como agente rejuvenecedor al mismo tiempo que incentiva el cumplimiento de la Ley REP en Chile.

Finalmente, se exhibieron aspectos relacionados con el diseño de mezclas asfálticas frías con emulsión, señalando que aún no existe una metodología ampliamente aceptada y que usualmente se han adoptado los lineamientos y métodos descritos en el Manual Series N°14 del Asphalt Institute (AI MS-14). Aún así, diversos investigadores han demostrado falencias y oportunidades de mejora en el procedimiento de diseño de este tipo de mezclas, entre las que se puede señalar: baja representatividad de probetas fabricadas en laboratorio respecto a testigos obtenidos en terreno, inadecuado método de curado o ausencia de un método que facilite la incorporación de RAP en mezclas asfálticas frías con emulsión. De cualquier manera, es importante destacar que el diseño debe poder facilitar el cumplimiento de propiedades fundamentales para el buen comportamiento de un pavimento asfáltico como: compatibilidad agregados pétreos - ligante asfáltico, estabilidad de la mezcla, propiedades mecánicas y trabajabilidad, entre otras.

III | Capítulo 3

3. Metodología Experimental

En este capítulo se expone la metodología experimental llevada a cabo, describiendo las características de los materiales utilizados, así como también los equipos, ensayos y modificaciones realizadas, justificando adecuadamente la razón de estos.

3.1. Diseño Experimental

Los materiales y ensayos realizados en esta investigación permiten determinar el comportamiento de diferentes dosis de RAP y agente rejuvenecedor ante algunos de los daños más frecuentes en mezclas asfálticas frías (Ver Figura 23). Para evaluar los efectos de cada uno de los materiales ensayados se realiza un diseño factorial completo, esto es, se estudian todas las combinaciones posibles para diferentes dosis de RAP y líquido pirolítico, comparándolas respecto a una mezcla asfáltica fría compuesta en su totalidad por agregados pétreos vírgenes sin la presencia de agente rejuvenecedor, la cuál será denominada "Mezcla de Control". La matriz experimental de ensayos se presenta en la Tabla 1.

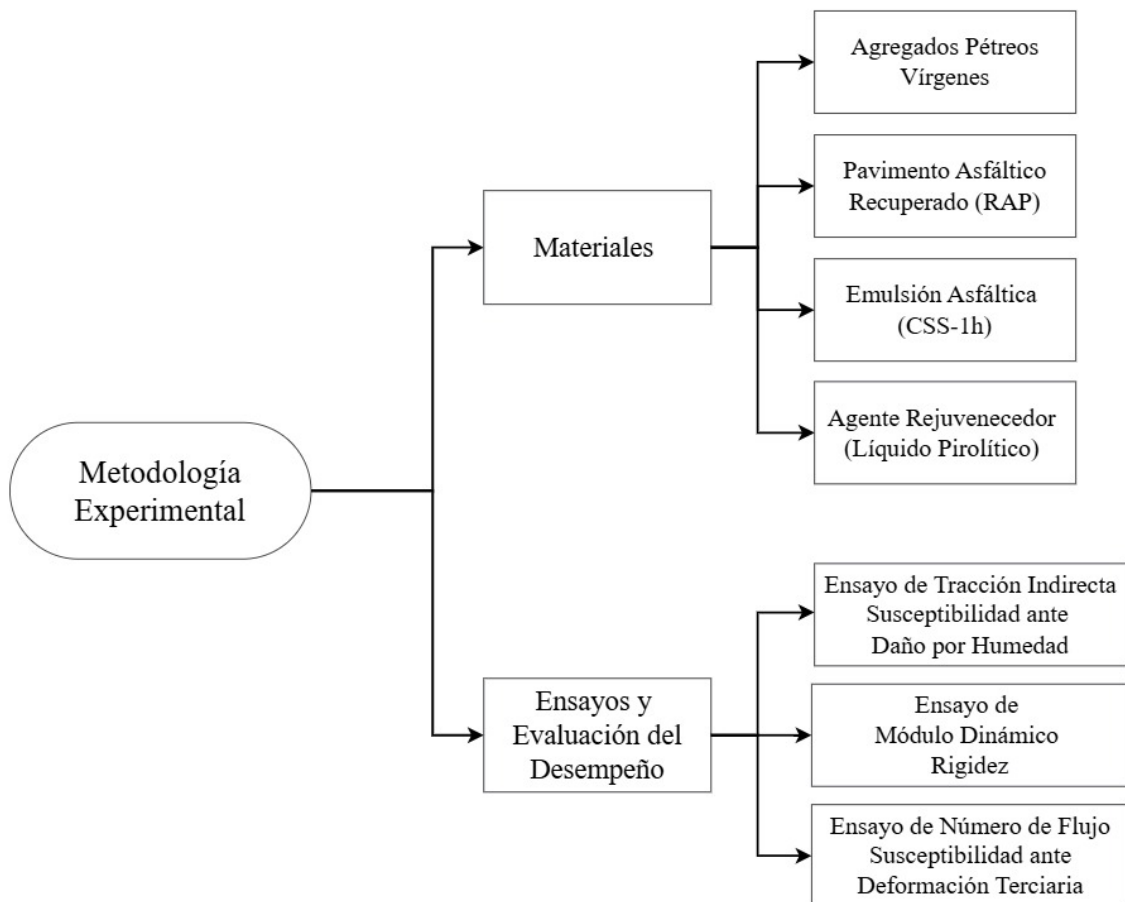


Figura 23: Metodología Experimental - Materiales y Ensayos a Investigar.

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 1: Matriz de Combinación de Ensayos.

| Número de Caso | Dosis RAP [%] | Dosis Rejuvenecedor [%] |
|----------------|----------------|--------------------------|
| 1 | 0 | 0 |
| 2 | 50 | 0 |
| 3 | 100 | 0 |
| 4 | 50 | 9 |
| 5 | 50 | 15 |
| 6 | 50 | 21 |
| 7 | 100 | 9 |
| 8 | 100 | 15 |
| 9 | 100 | 21 |

Fuente: Elaboración Propia

Como se expone en la matriz de combinación de variables, las dosis a evaluar de contenido de RAP son: 0, 50 y 100 % respecto al peso total de los agregados pétreos secos; mientras que las dosis de rejuvenecedor a aplicar se establecen en función del contenido de ligante RAP presente en la mezcla asfáltica, y en donde dichos porcentajes se fundamentan en la investigación realizada por (Cruz Torres, Catalina Fernanda Margarita, 2025), en donde se establece un contenido de agente rejuvenecedor óptimo entorno al 18 %, de forma de obtener el mismo comportamiento que un ligante asfáltico CA-24 en estado original, según el parámetro Superpave de Ahuellamiento. Todas las muestras a estudiar se distribuyen según la banda granulométrica IV-A-12 de acuerdo con lo indicado en el Volumen N°5 del Manual de Carreteras (Dirección de Vialidad, 2024a).

3.2. Materiales Utilizados

Los materiales utilizados en este estudio son agregados pétreos vírgenes, agregados pétreos RAP, emulsión asfáltica, agua potable y un agente rejuvenecedor denominado líquido pirolítico. El primero de los mencionados fue trasladado desde Santiago de Chile a Valparaíso en tambores sellados con tamaño máximo absoluto de 3/4", 1/2" y 3/8", denominados en adelante gravilla 3/4", gravilla 1/2" y polvo roca respectivamente, y donde sus granulometrías se describen en la Figura 24; además, dado su origen industrial, los agregados pétreos ya presentaban desempeño adecuado para ser utilizados en un pavimento asfáltico, esto es, se cumplen los requisitos para agregados pétreos enumerados en el Volumen N°8 del Manual de Carreteras Dirección de Vialidad (2003)

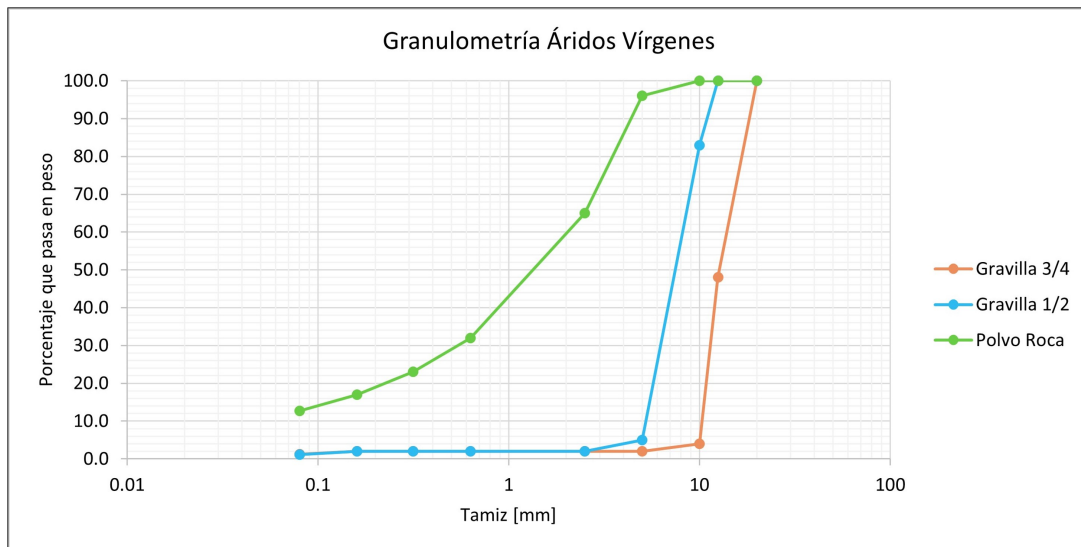


Figura 24: Granulometría de Agregados Vírgenes Según Tamaño Máximo Absoluto.

Fuente: Elaboración Propia.

Los agregados pétreos RAP, por su parte, también fueron trasladados desde Santiago de Chile a la ciudad de Valparaíso en tambores sellados, pero esta vez con una única granulometría no fraccionada, que se señala en la Figura 25, y cuya fuente de origen del material es desconocida.

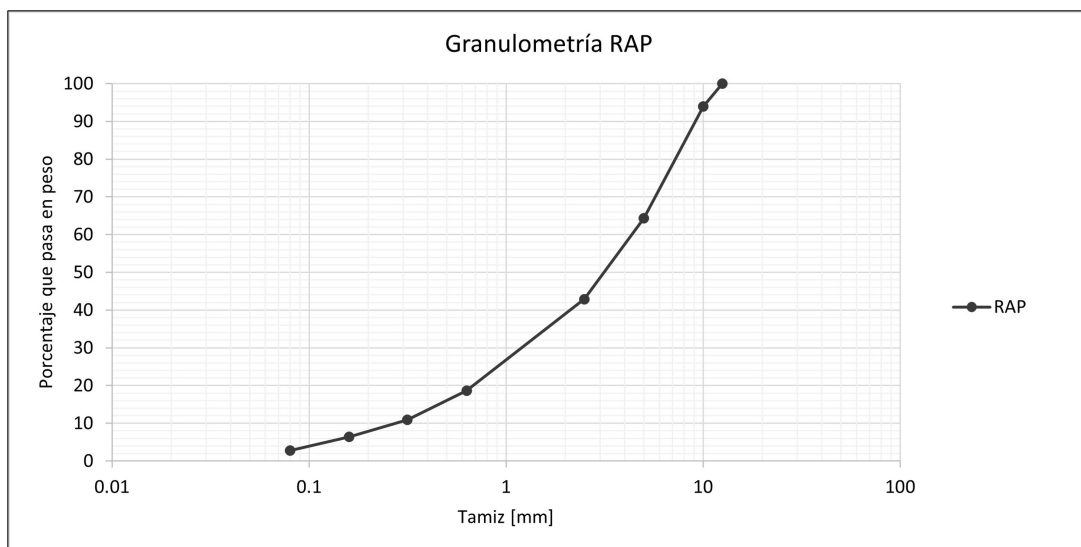


Figura 25: Granulometría de RAP Según Tamaño Máximo Absoluto.

Fuente: Elaboración Propia.

Para la determinación del contenido de ligante RAP se confeccionan muestras representativas y reconstituidas en una granulometría de tipo semidensa IV-A-12 de acuerdo con lo indicado en el Volumen N°5 del Manual de Carreteras (Dirección de Vialidad, 2024a), para luego extraer y determinar por centrifugación dicho cemento asfáltico envejecido RAP, según lo dispuesto en el Volumen N°8 del Manual de Carreteras (Dirección de Vialidad, 2003), obteniendo un contenido de ligante RAP de 4.16 %.

La emulsión asfáltica utilizada en este estudio correspondió a una del tipo CSS - 1h dadas las características silíceas de los agregados pétreos con que se contaba, otorgando así una adecuada compatibilidad entre los áridos con carga negativa y la emulsión catiónica; a su vez, se empleó una emulsión de quiebre lento para facilitar la trabajabilidad de la mezcla. Las características de la emulsión asfáltica utilizada se indican en la Tabla 2 a continuación:

Tabla 2: Características Emulsión Asfáltica CSS – 1h.

| Parámetro | Unidad | Valor | Especificación | Método |
|---|-------------------|--------------|-----------------------|---------------|
| Viscosidad Saybolt Furol a 25 °C | sSF | 29 | Mín.20-Máx.100 | MC 8.302.12 |
| Ensaye de estabilidad alm., 24hrs. | % | < 1 | Máx. 1 | MC 8.302.5 |
| Tamizado | % | 0.03 | Máx. 0.10 | MC 8.302.5 |
| Mezcla con cemento | % | < 2 | Máx. 2.0 | MC 8.302.5 |
| Ensayo de carga de partícula | - | Positiva | Positiva | MC 8.302.5 |
| <i>Destilación</i> | | | | |
| Aceite destilado por vol. emulsión | % | 0 | Informar | MC 8.302.5 |
| Residuo | % | 60.7 | Mín. 57 | MC 8.302.5 |
| <i>Ensayo residuo de destilación</i> | | | | |
| Penetración a 25 °C, 100gr, 5seg | 0.1 mm | 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 |
| Ensaye de la mancha (30% Xilol) | % Xilol | Negativo | Negativo | MC 8.302.7 |
| Densidad a 25°C | kg/m ³ | 1.009 | Informar | AASHTO T59 |

Fuente: Productos Bituminosos S.A. (2024).

En cuanto al agente rejuvenecedor, se utiliza líquido pirolítico extraído a partir de neumáticos fuera de uso mineros, el que puede ser apreciado en la Figura 26; este material se encuentra en condición no optimizada, esto es, no existe un fraccionamiento ni una separación entre compuestos livianos y pesados. Las características fisicoquímicas proporcionadas por el fabricante se detallan en la hoja de datos de seguridad y se indican a continuación:

Tabla 3: Propiedades Físicas y Químicas del Líquido Pirolítico.

| Parámetro | Unidad | Valor |
|-------------------------------|--------------------|--------------|
| Densidad a 15 °C | kg/L | 0.8911 |
| Viscosidad Cinemática a 50 °C | mm ² /s | 2.938 |
| Punto de Inflamación | °C | < 40 |
| Punto Inicial de Ebullición | °C | 62.6 |
| Solubilidad en Agua | - | Insoluble |
| Punto de Escurrimiento | °C | -33 |

Fuente: Kal Tire Recycling Chile Spa (2024).

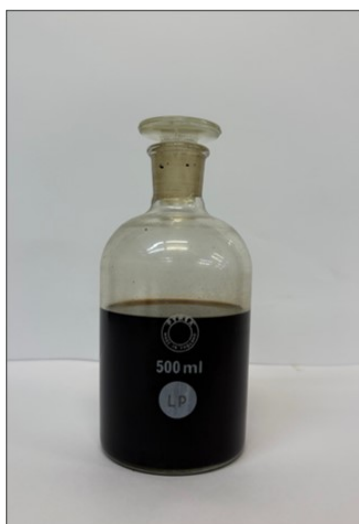


Figura 26: Agente Rejuvenecedor - Líquido Piroclítico.

Fuente: Elaboración Propia.

3.3. Ensayos de Laboratorio

3.3.1. Densidad de la Mezcla Asfáltica

La densidad máxima de la mezcla suelta (DMM) y la densidad máxima de la mezcla compactada (DMC) son dos ensayos fundamentales para determinar propiedades físicas de las mezclas asfálticas, a partir de las cuales se determina el contenido de vacíos; parámetro que es esencial para una adecuada comparación en la respuesta que presentan las combinaciones de estudio ante los ensayos a realizar. La densidad máxima de la mezcla suelta se determina según la normativa internacional ASTM D2041-19 (ASTM International, 2019), mientras que la densidad de la mezcla compactada se establece según lo expuesto en la normativa ASTM D2726-21 (ASTM International, 2021).

3.3.2. Ensayo de Tracción Indirecta

La susceptibilidad ante daño por humedad se determina según el ensayo de tracción indirecta (ITS, por sus siglas en inglés) utilizando para ello lo especificado en ASTM D4687-22 (ASTM International, 2022b), a partir de lo cuál se determina la resistencia en condición no saturada (ITS No Saturado), en condición saturada (ITS Saturado) y la razón de estas como valor en porcentaje, usualmente denominado “TSR”; sin embargo, dado que la normativa se establece para mezclas asfálticas en caliente, se realizan modificaciones en la temperatura de acondicionamiento saturado según lo expuesto en el estudio de la Federal Highway Administration (Cross, Stephen A., 2012), de modo de disminuir las exigencias sometidas a la probeta y de esta forma facilitar la comparación en el comportamiento de las distintas mezclas indicadas en la matriz de combinaciones. El acondicionamiento en condición no saturada se mantiene de la misma forma a la indicada en la normativa internacional, así como también las condiciones de carga aplicada; la Figura 27 y la Figura 28 presentan especímenes en condición de acondicionamiento y ensayo respectivamente.



Figura 27: Acondicionamiento en Condición Saturada para CMA.

Fuente: Elaboración Propia.



Figura 28: Ensayo de Tracción Indirecta Probeta Ensayada.

Fuente: Elaboración Propia.

3.3.3. Ensayo de Módulo Dinámico

La determinación de la rigidez de la mezcla asfáltica ante diferentes combinaciones de frecuencia y temperatura se realizó en condición no confinada de acuerdo con la normativa AASHTO T342-11 (2015) (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2015), sin embargo, dada la respuesta observada en las probetas para temperaturas de 54 °C en las que la deformación excedía el rango lineal se determinó no ensayar a este valor; por lo cuál, las frecuencias y temperaturas estudiadas son respectivamente: 25, 10, 5, 1, 0.5, 0.1 [Hz], y -10.0, 4.0, 21.0 y 37.0 °C. El acondicionamiento de las probetas se realiza según lo indicado en la normativa mencionada, pero excediendo en al menos 30 minutos los tiempos allí indicados. Ahora bien, dado que el alcance de la normativa se establece para mezclas asfálticas en caliente, la deformación máxima permitida para mezclas CMA se dispone según los estudios realizados por Yan, Zhang, Charmot, Ding, y Li (2015), considerando un rango lineal entre las 50 y 150 microdeformaciones.

3.3.4. Ensayo de Número de Flujo

Para establecer fehacientemente la resistencia ante la deformación terciaria o permanente, se utilizó el ensayo Flow Number o Número de Flujo según el estándar AASHTO T378-22 (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2022). Si bien este se encuentra descrito para equipos AMPT, se utilizó una Equipo Universal de Ensayos, capaz de replicar las condiciones de carga y temperatura requeridas según la norma. Ahora bien, de la misma forma al ensaye anterior, el alcance del documento solo contempla mezclas en caliente, por esta razón y a modo de simular de mejor forma las condiciones en terreno es que se

configura el ensayo de acuerdo con lo dispuesto en el estudio de Kim y Lee (2012), estableciendo:

- Temperatura de Ensayo: 40 °C
- Esfuerzo Desviador: 140 [kPa]
- Presión de Confinamiento: 0 [kPa] (No Confinado)
- Ciclo Creep: 0.1 segundos de aplicación de carga y 0.9 segundos de relajación

3.4. Equipamiento

3.4.1. Compactador Giratorio Superpave

En este estudio se utilizó el Compactador Giratorio Superpave Troxler Model 5850 (Ver Figura 29) para la fabricación de todas las probetas. Este equipo opera mediante un sistema hidráulico, mediante el cuál es posible compactar probetas cilíndricas a un ángulo y carga axial constante; de modo de simular apropiadamente las condiciones de compactación en terreno. El equipo puede ser operado mediante dos modos: giros por altura, o número de giros. Es posible producir probetas de hasta 185 [mm] de altura, con un ángulo interno entre 0 a 1.5°, una carga axial en el rango de 90 a 1000 [kPa], un número de giros entre 1 a 999, y una velocidad de rotación de 30 ± 0.5 [giros/min].



Figura 29: Compactador Giratorio Superpave Utilizado en la Investigación.

Fuente: Cooper Research Technology, (2015).

3.4.2. Moldes Compactador Giratorio Superpave

Complementario al Compactador Giratorio, se utilizaron moldes de acero de 150 [mm] de diámetro interior, y que sirvieron como recipientes dentro de los cuales se compactan las probetas; los moldes además presentan 2 tapas de acero, una superior y otra inferior, de modo de facilitar el movimiento y acomodo de las partículas en la mezcla asfáltica (Ver Figura 30).



Figura 30: Molde Compactador Giratorio Superpave sobre Extrusor de Probeta.

Fuente: Elaboración Propia.

3.4.3. Tamices

Se utilizaron tamices de tamaños de abertura entre 25 [mm] (tamiz de 1 pulgada) y 2.36 [mm] (tamiz N°8) para la reconstrucción de la granulometría, los que están normalizados y cumplen con los requisitos indicados en la normativa ASTM E11-22 (ASTM International, 2022a).



Figura 31: Tamices.

Fuente: Glenammer, (2025).

3.4.4. Bomba de Vacío

Para la determinación de la densidad máxima de la mezcla (DMM), se utilizó una bomba de vacío con capacidad máxima de generar hasta 760 [mmHg], que se aprecia en la Figura 32. Este equipo presenta un motor de 1/8 HP, y cumple con los requerimientos indicados en ASTM D2041-19 y ASTM D4867-22 (ASTM International, 2019, 2022b).



Figura 32: Bomba Operando para Ensayo de Densidad Máxima Suelta.

Fuente: Elaboración Propia.

3.4.5. Matraz Kitasato

Se utilizó un matraz kitasato con capacidad máxima de 4 [L], tal como es posible apreciar en la Figura 33; de modo de cumplir con los requerimientos para tamaño máximo absoluto de partículas de 1/2”.

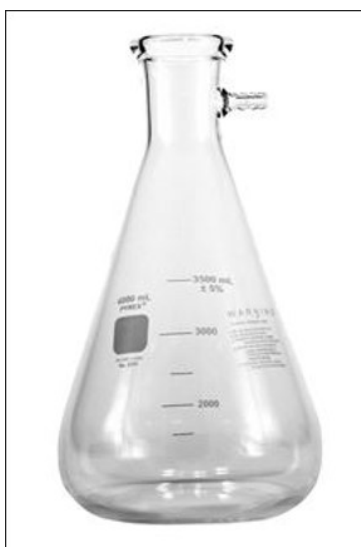


Figura 33: Matraz Kitasato.

Fuente: COTECNO, (2025).

3.4.6. Balanzas

Se utilizaron balanzas con capacidad máxima de 10 000 [g], y con una precisión de 0.1 [g]. Para la determinación de la masa bajo agua de las probetas, se utilizó un sistema de suspensión así como también una válvula que permite evacuar el agua, manteniendo su nivel constante en todo momento (Ver Figura 34), mientras que para el resto de casos se utilizó la balanza señalada en la Figura 35



Figura 34: Balanza Electrónica para Ensayos con Probeta Bajo Agua.

Fuente: Elaboración Propia.



Figura 35: Balanza Electrónica para Condiciones Regulares.

Fuente: Elaboración Propia.

3.4.7. Hornos

Los hornos utilizados, indicados en la Figura 36, tienen un rango de operación desde los 20 hasta los 300 °C, con una precisión de 0.1 °C. Presentan una adecuada aislación, lo que les permite mantener la temperatura constante de forma rápida y continua, asegurando un correcto acondicionamiento de las probetas.



Figura 36: Hornos.

Fuente: Elaboración Propia.

3.4.8. Baño de Agua

El baño de agua empleado correspondió al XUTEMP Model XT5600, el que cuenta con un recirculador inmersivo con capacidad para mantener una temperatura en un rango de -30 a 95 °C, con una precisión de 0.1 °C. El equipo se presenta en la Figura 37.



Figura 37: Baño de Agua para Acondicionamiento de Probetas.

Fuente: Elaboración Propia.

3.4.9. Dispensador - Dosificador

Para la aplicación del agente rejuvenecedor, se utilizó un dosificador de líquidos, mediante el cuál era posible dispersar el producto en la mayor cantidad de partículas a una tasa de aplicación constante. La fabricación de este dispositivo se realizó en el Taller de Vidrio de la Universidad Técnica Federico Santa María; el sistema en cuestión se presenta a continuación:



Figura 38: Dosificador Utilizado para la Aplicación del Líquido Piroclítico.

Fuente: Elaboración Propia.

3.4.10. Testiguera, Cortadora y Refrentadora

La testiguera utilizada durante la investigación correspondió a la máquina Husqvarna DMS240 con broca diamantada de diámetro interno 101 [mm], mientras que la cortadora presentaba un disco de corte de 14". La refrentadora por su parte facilitaba el pulido y acabado de las probetas. Los equipos mencionados se exponen en Figura 39, Figura 40 y Figura 41, y permitían cumplir con los requisitos expuestos en AASHTO T342-11 (2015) y AASHTO T378-22 (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2015, 2022).



Figura 39: Máquina Testiguera.

Fuente: Elaboración Propia.



Figura 40: Máquina Cortadora.

Fuente: Elaboración Propia.



Figura 41: Máquina Refrentadora.

Fuente: SERVIAM Ltda.

De esta manera, fue posible extraer el núcleo interno de una probeta como la señalada en la Figura 42, resultando en una muestra como la indicada en la Figura 43; siendo esta última sobre la cuál se realizan los ensayos pertinentes.



Figura 42: Probeta Completa para Ensayos de Módulo Dinámico y Número de Flujo.

Fuente: Elaboración Propia.



Figura 43: Núcleo de Probeta para Ensayos de Módulo Dinámico y Número de Flujo.

Fuente: Elaboración Propia.

3.4.11. Prensa Marshall

La prensa utilizada en esta investigación cumple con los requisitos indicados en ASTM D4867-22, esto es, permite aplicar una carga a velocidad constante de 50.8 [mm/min]; además, la prensa Marshall cuenta con un pistón electromecánico y un sistema de medición de anillo con capacidad máxima de 50 [kN] (Ver Figura 44).



Figura 44: Prensa Marshall

Fuente: Elaboración Propia.

3.4.12. Equipo Universal

Se empleó la máquina universal Cooper HYD25-II para los ensayos de Módulo Dinámico y Número de Flujo, cumpliendo con los requisitos de las respectivas normativas: AAHTO T342-11 (2015) y AASHTO T378-22 (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2015, 2022); el equipo cuenta con una cámara de acondicionamiento para temperaturas entre -15 y 60 °C, con una precisión de 0.1 °C, así como también permite la aplicación de cargas entre 50 a 200 [MPa] y frecuencias entre 0.1 a 70 [Hz] (Cooper Technology, 2008). En la Figura 45 se puede visualizar el equipo utilizado.



Figura 45: Equipo Universal Utilizado en la Investigación.

Fuente: Cooper Technology (2008).

3.5. Metodología Experimental

Para la confección de las probetas asfálticas se utilizó el diseño y los lineamientos propuestos por Parraguez Cruz, Sergio Abraham (2025), utilizando los mismos parámetros de compactación mediante Compactador Giratorio Superpave indicados a continuación:

- Ángulo de Giro: $1.16 \pm 0.02^\circ$
- Carga Axial durante los primeros 5 giros: 600 ± 60 [kPa]
- Carga Axial durante los siguientes giros: 600 ± 18 [kPa]
- Modo de Operación: Altura
- Altura de Compactación Objetivo TSR: 63 [mm]
- Altura de Compactación Objetivo M.D. y F.N.: 180 [mm]

Sin embargo, dadas las bajas resistencias apreciadas para mezclas confeccionadas con un 100 % de agregados pétreos vírgenes, es que se procedió a verificar el diseño de estas utilizando para ello el acondicionamiento de las probetas saturadas sugerido por la FHWA consistente en una sumergir la probeta bajo agua a temperatura de 25 °C durante 24 horas, para luego ser ensayada en la Prensa Marshall. De la misma forma, dada la investigación realizada por Providel Briceño, Ignacio Alejandro (2025), se establece un curado dentro del horno a 60 °C durante 3 días para todas las probetas en estudio.

Respecto a la aplicación del agente rejuvenecedor, el LP fue dispersado únicamente sobre RAP reconstituido para la banda granulométrica IV-A-12 mediante un difusor a una tasa constante, de forma tal que el contenido a suministrar se rociara durante 2 minutos, revolviendo vigorosamente la mezcla RAP al mismo instante de la aplicación del LP. Ahora bien, las dosis a aplicar se determinaron en función de los estudios realizados por Cruz Torres, Catalina Fernanda Margarita (2025), en donde se establece un contenido óptimo de agente rejuvenecedor del 18 % según el parámetro de ahuellamiento Superpave; a partir del cual se determina investigar dosis de

9, 15 y 21 % respecto al peso del ligante RAP, para analizar así un amplio espectro en la respuesta que produce este agente rejuvenecedor, mientras que al mismo tiempo se logra contener, de forma implícita, el valor recomendado por la investigadora previamente mencionada.

3.5.1. Ensayo de Tracción Indirecta

La confección de las probetas a utilizar en el ensayo de tracción indirecta (Ver Figura 46) consistió en primer lugar en secar a una temperatura de 70 °C todo el material RAP a ser utilizado hasta obtener masa constante, mientras que se utilizó una temperatura de 110 °C para secar el agregado virgen. Ahora bien, la aplicación del agente rejuvenecedor sobre el RAP se realiza según los estudios realizados por Li y cols. (2021), donde se explicita que no se debe incurrir en tiempos de difusión mayores a los 7 días, con un valor óptimo de 5 días para los materiales allí estudiados. Así, el RAP reconstituido y en condición seca es expuesto al agente rejuvenecedor mediante el equipo difusor, y luego trasladado a un horno acondicionado a 25 °C durante 5 días, sin exposición a otros agentes que pudieran perturbar la interacción LP – Ligante RAP.



Figura 46: Probeta para Ensayo de Tracción Indirecta.

Fuente: Elaboración Propia.

Una vez se que el material se encuentra seco, y luego de aplicar el rejuvenecedor en el RAP según se requiera, se procedió a reconstituir la granulometría IV-A-12, y mezclar este con el agua de premezclado, revolviendo durante 2 minutos manualmente, según lo indicado por Flores, Gallego, Miranda, y Marcobal (2020). Posterior a ello, se agrega la emulsión asfáltica y se vuelve a mezclar de forma manual durante otros 2 minutos. Inmediatamente finalizado este proceso, se introduce la mezcla en el molde, y se compacta hasta lograr una altura de 63 [mm]. Terminado este paso, se mantiene la probeta dentro del molde a temperatura ambiente por un periodo de una hora de modo de lograr que la probeta obtenga la suficiente resistencia para poder ser desmoldada; para finalmente trasladar la probeta a un horno previamente acondicionado a 60 °C durante 72 horas.

Una vez terminado el proceso de curado, se procede a determinar el contenido de vacíos con un valor óptimo de 7%; posteriormente, se acondicionan las probetas según las condiciones mencionadas previamente, esto es, saturación previa en cámara de vacío hasta un máximo de 75 % de saturación y posterior traspaso a un baño de agua a 25 °C durante 24 horas para probetas en condición saturada, y únicamente posicionar las probetas en un baño de agua a 25 °C durante 20 [min] para probetas en condición no saturada. Finalmente, se determinan los parámetros requeridos por la normativa y se ensaya en la Prensa Marshall, determinando mediante ambas resistencias el valor de TSR (Razón de resistencia a tracción indirecta, por sus siglas en inglés); en la Figura 47 y Figura 48 se puede apreciar una probeta ensayada en condición no saturada y saturada respectivamente.



Figura 47: Probeta Ensayo de Tracción Indirecta en Condición No Saturada.

Fuente: Elaboración Propia.



Figura 48: Probeta Ensayo de Tracción Indirecta en Condición Saturada.

Fuente: Elaboración Propia.

3.5.2. Ensayos de Módulo Dinámico y Número de Flujo

Respecto a la confección de las probetas a ser utilizadas para estudiar el efecto del LP en el módulo dinámico y en el Ensayo de Número de Flujo o Flow Number, se sigue el mismo procedimiento indicado previamente, variando el tiempo de mezclado manual a 3 [min] en idéntico orden: agua de premezclado, emulsión. Ahora bien, la altura de las probetas se estableció en 180 [mm] con un contenido óptimo de vacíos del 7%, y con un nivel de tolerancia indicado en la normativa correspondiente. Una vez curada esta durante 3 días a 60 °C, se utiliza la testiguera para extraer el núcleo de 100 [mm] de diámetro de la mezcla asfáltica; para posteriormente cortar las caras superior e inferior de esta de modo de obtener una altura en torno a los 150 [mm]. Por último, se pulen las caras base de la probeta, obteniendo una superficie lisa que permita eliminar en gran medida posibles discontinuidades y concentraciones de esfuerzos en dichas caras

Establecida la geometría de la probeta de acuerdo con la normativa, se introduce la probeta en un horno a una temperatura de 40 °C hasta obtener masa constante, para asegurar que el espécimen no presente humedad. Una vez logrado esto (condición conseguida en un tiempo de entre 3 a 5 días) se procedió a acondicionar la probeta en orden ascendente en temperatura según los tiempos estipulados en la normativa mencionada. Finalmente, logrado el acondicionamiento térmico se posiciona la probeta en el Equipo Universal y se ensaya la probeta

en orden ascendente en frecuencia; obteniendo de esta manera el módulo dinámico de la misma. En la Figura 49 se puede visualizar una probeta luego de ser ensayada ante módulo dinámico.

Dada la condición de destructibilidad del ensayo Flow Number, se ejecuta este una vez determinada la respuesta de la probeta en todo el rango de temperaturas y frecuencias de interés. Así, para obtener la respuesta de la probeta ante deformación terciaria, se acondiciona el espécimen a 40 °C durante 24 horas en un horno a temperatura constante, para luego extraer la probeta y situarla en el Equipo Universal, aplicando un esfuerzo constante de 140 [kPa], una deformación máxima permitida del 5% y un número máximo de ciclos Creep de 10 000. En la Figura 50 es posible apreciar una probeta posterior a su ensayo de Número de Flujo.



Figura 49: Probeta Posterior a Ensayo de Módulo Dinámico.

Fuente: Elaboración Propia.



Figura 50: Probeta Posterior a Ensayo de Número de Flujo.

Fuente: Elaboración Propia.

3.6. Análisis Estadístico

Una vez que las probetas fueron ensayadas, cumpliendo con los requerimientos normativos respectivos, se implementó una serie de códigos utilizando el lenguaje Python, de modo de procesar los datos de forma rápida y estandarizada, minimizando la varianza entre los conjuntos de muestras, de modo de tener en su conjunto datos con alta precisión y exactitud.

Para evaluar las diferencias en el comportamiento mecánico de los diferentes ensayos, se utilizó el Análisis de Varianza ANOVA (Analysis of Variance por sus siglas en inglés) con un nivel de confianza del 95% para evaluar la significancia de los resultados obtenidos para las distintas dosificaciones estudiadas, determinando de forma efectiva si existen diferencias entre los grupos de materialidad investigados. Posterior a este análisis y en caso de encontrarse diferencias importantes, se procedió a realizar la prueba de Tukey (o también denominada Honestly Significant Difference HSD, por sus siglas en inglés) para poder identificar rigurosamente que tipo de mezclas se diferencian significativamente de la muestra de control, de modo de distinguir

si los efectos observados son producto de la variabilidad del material o si corresponden a efectos reales derivados de la dosis de RAP y/o de agente rejuvenecedor.

3.7. Resumen

Durante este capítulo se definió el diseño y la metodología experimental utilizada en esta investigación, así como también los materiales utilizados y sus características físicas, los equipos en conjunto con sus configuraciones, y los procedimientos que se siguieron para la confección además del análisis estadístico de las probetas de mezclas asfálticas con diferentes dosis de RAP y de agente rejuvenecedor. A partir de esta metodología fue posible verificar el diseño de la mezcla asfáltica compuesta únicamente por agregados vírgenes, mientras que también se logró establecer la respuesta de mezclas asfálticas frías con diferentes dosis de RAP y de LP ante la susceptibilidad al daño por humedad, su módulo dinámico y su respuesta a deformación terciaria; todo lo cuál será expuesto y analizado en el siguiente capítulo.

IV | Capítulo 4

4. Resultados Experimentales

4.1. Verificación de Diseño de Mezclas Asfálticas Frías

La verificación de los diseños presentados por Parraguez Cruz, Sergio Abraham (2025) (Ver Figura 51) se realiza de acuerdo a los procedimientos indicados en AI-MS14 (Asphalt Institute, 1989), a partir del cual se establece un contenido inicial de emulsión de 7 %. Con este valor como punto de partida para las mezclas conformadas por 100 % agregados vírgenes (A.V.), es que se fabrican y determinan las densidades para diferentes contenidos de agua, y a partir de los cuales se puede establecer un contenido de 3 % de agua de premezcla (y por tanto un 5.75 % de agua total) como valor óptimo de líquido respecto al peso de los agregados pétreos secos; dichos valores se exponen en la Figura 52.

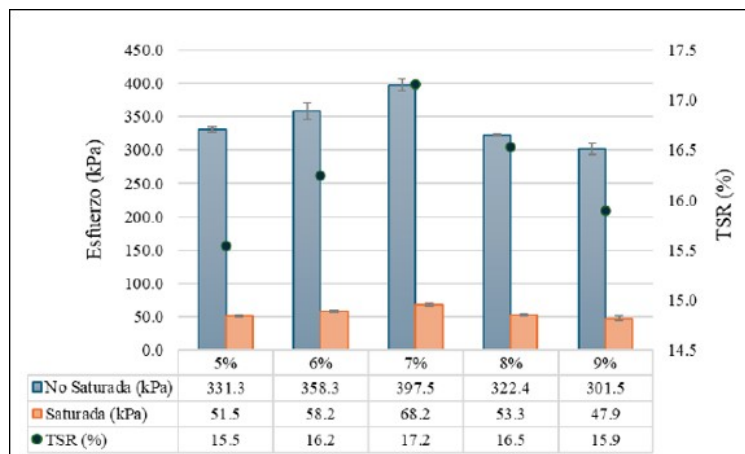


Figura 51: Diseño de Mezclas CMA 100 % A.V. según AI-MS 14.

Fuente: Parraguez Cruz, Sergio Abraham (2025).

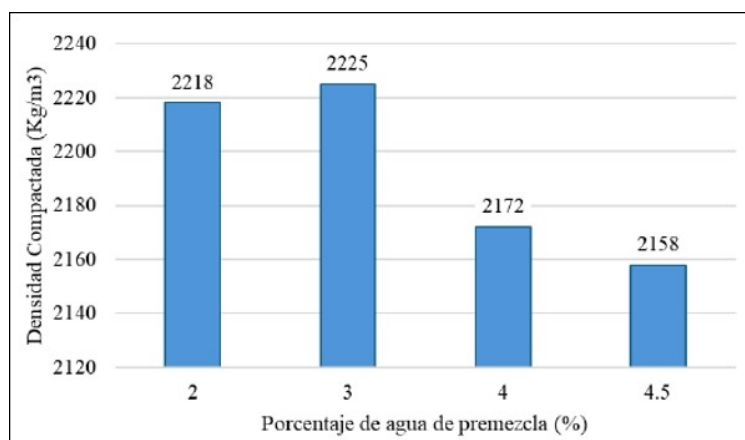


Figura 52: Contenido de Agua de Premezclado para Mezclas CMA 100 % A.V. Verificación de Diseño.

Fuente: Elaboración Propia.

Ahora bien, determinada el agua total requerida para la mayor densidad compactada de la mezcla, se determinan las resistencias en condición no saturada y saturada para distintos contenidos de emulsión (Ver Figura 53), siguiendo el acondicionamiento propuesto por la FHWA (Cross, Stephen A., 2012); y partir de los cuales, se puede establecer un contenido de 10.3 % respecto al peso de los agregados secos como el valor óptimo de emulsión asfáltica. Dicha elección se explica, en primer lugar, por los resultados obtenidos para TSR, el que no cuenta con un único valor definido en la literatura; por lo cual se adopta como criterio lo utilizado usualmente en diseño Superpave para mezclas en caliente (HMA), esto es, un mínimo de 80 % (Mossa, Hilal, Hasan, Fattah, y Hussein, 2025). Además, según lo recomendado por el Indian Roads Congress (2014), el porcentaje mínimo de asfalto residual por peso total de la mezcla es de 4.5 %; lo que indica que solo los contenidos de emulsión de 8.6 %, 10.3 % y 11.9 % cumplen lo señalado, definiendo el segundo de estos como el óptimo por su mayor resistencia en condición saturada bajo el ensayo de tracción indirecta (ITS).

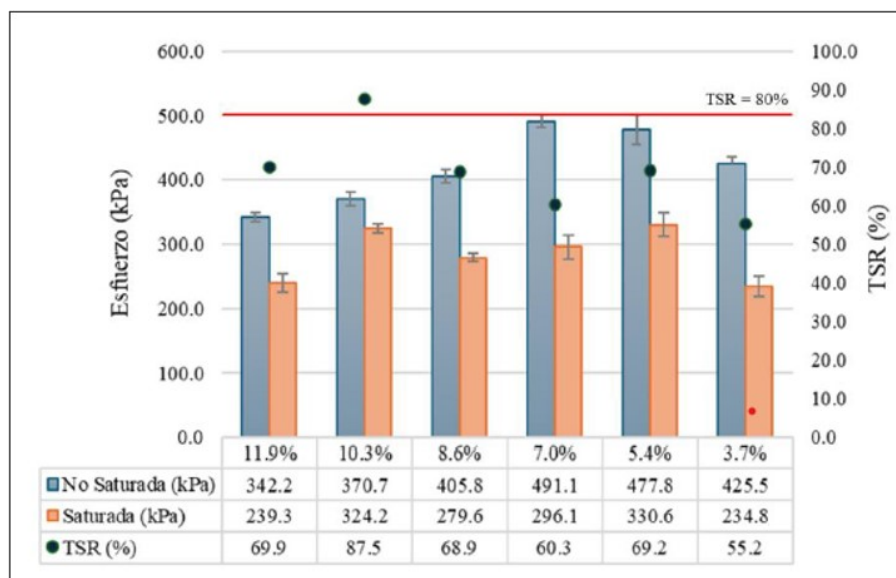


Figura 53: Contenido de Emulsión Asfáltica para Mezclas CMA 100 % A.V. Verificación de Diseño.

Fuente: Elaboración Propia.

Por otro lado, se decide utilizar el diseño propuesto por Parraguez Cruz, Sergio Abraham (2025) para el caso de mezclas compuestas por 100 % RAP, ya que las resistencias tienen valores comparables entre sí, más allá de únicamente posible ruido experimental. Sin embargo, y a modo de hacer comparable el análisis de este estudio, es que se procede a utilizar el acondicionamiento propuesto por la FHWA (Cross, Stephen A., 2012), lo que incrementa la resistencia en condición saturada otorgando un valor TSR de 78.7 %.

Así, suponiendo un comportamiento relativamente lineal tanto para la densidad de las mezclas como para sus resistencias en condición saturada y no saturada es que se resuelve considerar el caso de 50 % A.V. y 50 % RAP como el promedio de los valores obtenidos para los 2 diseños previamente mencionados; los resultados de TSR para la 3 dosis de RAP sin presencia de agente rejuvenecedor se presentan a continuación:

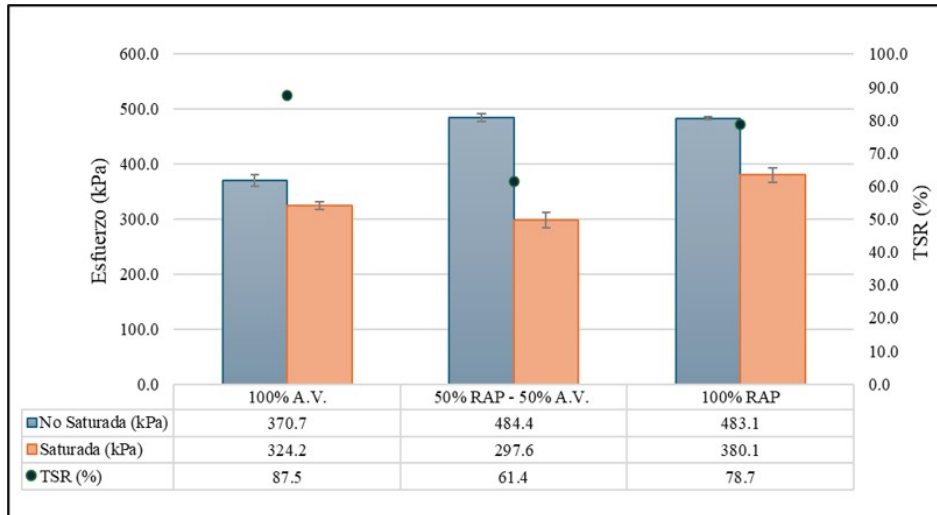


Figura 54: Diseño de Mezclas CMA con contenidos de RAP de 0 %, 50 % y 100 % Sin Presencia de Agente Rejuvenecedor.

Fuente: Elaboración Propia.

4.2. Resultados de Ensayo de Tracción Indirecta

Se presentan los resultados para la resistencia ante daño por humedad de mezclas asfálticas frías, en donde, para efectuar un análisis más completo del comportamiento de las mezclas es que se exponen y se utilizan los valores determinados por Leichtle Fernandez, Mathias Rolando (2026) para materiales compuestos por 100 % RAP con dosis de 9, 15 y 21 % de Líquido Piro-lítico (LP). Así, estudiando el ensayo de tracción indirecta, el potencial agente rejuvenecedor derivado de LP obtenido a partir de neumáticos fuera de uso presentó resultados dispares, como es posible apreciar en la Figura 55. En primer lugar se determina que no permite mejorar las propiedades ante daño por humedad, reduciendo la resistencia en condición no saturada desde la primera dosis evaluada de 9 % respecto al peso del ligante presente en el RAP.

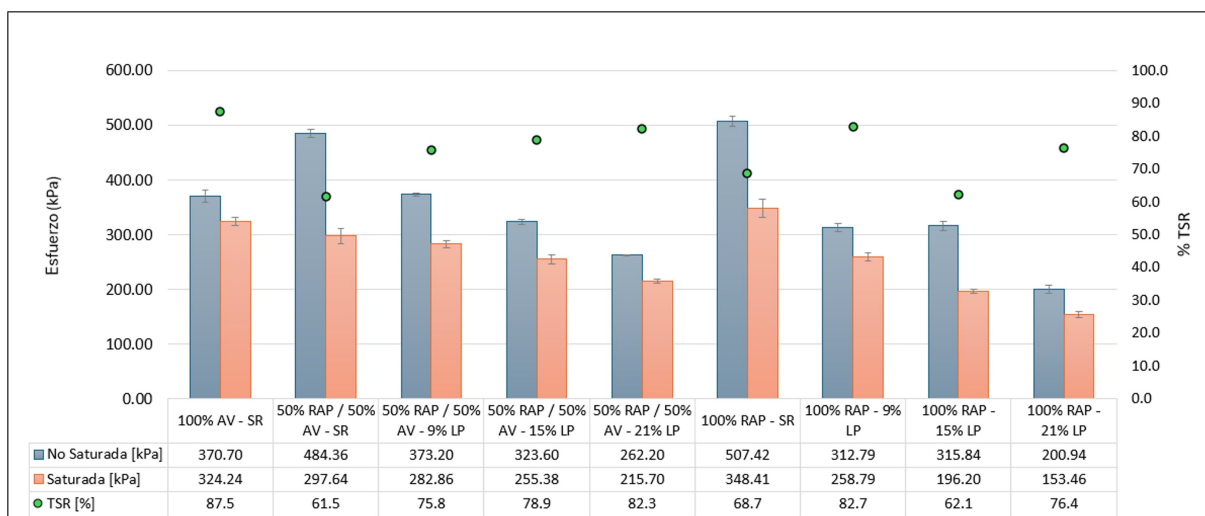


Figura 55: Resultados de Ensayo de Tracción Indirecta para Diferentes Dosis de RAP y/o LP.

Fuente: Elaboración Propia.

Adicionalmente se aprecia una sostenida disminución en la resistencia en condición saturada al aumentar la dosis de rejuvenecedor, reduciendo su valor inicial desde 380 kPa para una mezcla sin presencia de LP, hasta un valor de 153 kPa al utilizar una dosis de 21 %, esto es, se produce una reducción en un 60 % respecto a la resistencia inicial. De la misma forma, la resistencia en condición no saturada se reduce en un 59 % al comparar los mismos tipos de mezcla.

De la misma manera, la reducción en la resistencia en condición no saturada para la dosis de 9 % es de un 35 % respecto del caso 100 % RAP sin rejuvenecedor (100 % RAP – S.R.), no existiendo diferencias significativas entre los valores medidos para 9 % y 15 % para el mismo tipo de acondicionamiento.

Con esto se pueden establecer 2 posibles conclusiones: la dosis utilizada fue excesiva para los requerimientos de la mezcla, esto es, se produjo una considerable activación del ligante RAP, dejando de comportarse como roca negra, y produciendo por tanto una sobredosificación del ligante total activo respecto a la dosis de diseño; o bien, el potencial agente rejuvenecedor utilizado no tiene utilidad para mejorar el desempeño ante daño por humedad para mezclas constituidas en 100 % por RAP.

Como se señala en la Figura 55, similar comportamiento se aprecia en mezclas constituidas en igual proporción en masa por RAP y agregados vírgenes (A.V.); el agente rejuvenecedor disminuye la resistencia en condición saturada y no saturada, siendo más perjudicial para este último tipo de acondicionamiento tal como es posible apreciar por medio del valor medido de TSR. Así, de la misma forma al caso anterior, puede existir una sobredosis de agente rejuvenecedor y un consecuente aumento del ligante total activo en la mezcla; o bien, este material no tiene aplicabilidad para este tipo de mezclas asfálticas.

En adición, al comparar los comportamientos de mezclas con y sin agente rejuvenecedor con dosis de 50 % y 100 % de RAP es que se puede confirmar el efecto negativo que tiene la aplicación del RAP con agente rejuvenecedor en la resistencia al daño por humedad en mezclas asfálticas frías para las dosis evaluadas.

En cuanto al análisis estadístico, la Tabla 4 presenta los resultados de ANOVA, para el cuál se observó que para mezclas asfálticas no acondicionadas y acondicionadas el p-valor obtenido fue menor al nivel de significancia establecido ($\alpha = 0.05$); rechazando por tanto la hipótesis nula, confirmando así que las diferentes dosis de RAP y/o LP tienen un efecto significativo en la respuesta a daño por humedad. Posteriormente, se realizó la prueba de Tukey, cuyos resultados se exponen en la Tabla 5, y a partir de los cuales se puede establecer que, si bien existe una efectiva diferencia en el comportamiento ante variaciones del contenido de RAP y/o LP en la mezcla asfáltica, esta se presenta de forma dispersa y heterogénea para el caso de 100 % RAP, lo que parece indicar que la variabilidad inherente propia del RAP no logra proporcionar información suficientemente confiable, provocándose fallas locales en la matriz del material que afectan a la respuesta estructural global del sistema. No así, las mezclas compuestas por 50 % A.V. y 50 % RAP si presentaron una alta homogeneidad en su respuesta al aumentar la dosis del agente rejuvenecedor, por lo que el efecto de este último sobre el ligante envejecido y su posterior interacción con la emulsión asfáltica si permite establecer una mayor predicción en la respuesta del material.

Tabla 4: Resultados de ANOVA - Ensayo de Tracción Indirecta.

| Condición del Ensayo | p-valor | Nivel Signif. (α) | ¿Sig.? | Decisión |
|----------------------|------------|----------------------------|--------|------------------|
| ITS No Acondicionado | < 0.000001 | 0.05 | Sí | Se Rechaza H_0 |
| ITS Acondicionado | < 0.000001 | 0.05 | Sí | Se Rechaza H_0 |
| TSR | < 0.000001 | 0.05 | Sí | Se Rechaza H_0 |

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 5: Resultados de Prueba de Tukey* - Ensayo de Tracción Indirecta.

| Condición | Probetas | Dif. Medias | p-valor | Lim. Inf. | Lim. Sup. | ¿Signif.? |
|---------------|------------------------|-------------|---------|-----------|-----------|-----------|
| ITS No Acond. | 000.00.00 vs 100.21.LP | -169.733 | 0.000 | -203.178 | -136.289 | Si |
| | 000.00.00 vs 050.21.LP | -108.500 | 0.000 | -141.945 | -75.055 | Si |
| | 000.00.00 vs 100.09.LP | -57.900 | 0.000 | -91.345 | -24.455 | Si |
| | 000.00.00 vs 100.15.LP | -54.867 | 0.001 | -88.312 | -21.422 | Si |
| | 000.00.00 vs 050.15.LP | -47.100 | 0.003 | -80.545 | -13.655 | Si |
| | 000.00.00 vs 050.09.LP | 2.500 | 1.000 | -30.945 | 35.945 | No |
| | 000.00.00 vs 100.00.00 | 112.400 | 0.000 | 78.955 | 145.845 | Si |
| | 000.00.00 vs 050.00.00 | 113.633 | 0.000 | 80.189 | 147.078 | Si |
| | 000.00.00 vs 100.21.LP | -170.733 | 0.000 | -214.749 | -126.718 | Si |
| | 000.00.00 vs 100.15.LP | -128.033 | 0.000 | -172.049 | -84.018 | Si |
| ITS Acond. | 000.00.00 vs 050.21.LP | -108.533 | 0.000 | -152.549 | -64.518 | Si |
| | 000.00.00 vs 050.15.LP | -68.867 | 0.001 | -112.882 | -24.851 | Si |
| | 000.00.00 vs 100.09.LP | -65.433 | 0.002 | -109.449 | -21.418 | Si |
| | 000.00.00 vs 050.09.LP | -41.367 | 0.075 | -85.382 | 2.649 | No |
| | 000.00.00 vs 050.00.00 | -26.600 | 0.492 | -70.615 | 17.415 | No |
| | 000.00.00 vs 100.00.00 | 55.900 | 0.007 | 11.885 | 99.915 | Si |
| | 000.00.00 vs 100.21.LP | -170.733 | 0.000 | -214.749 | -126.718 | Si |
| | 000.00.00 vs 100.15.LP | -128.033 | 0.000 | -172.049 | -84.018 | Si |
| | 000.00.00 vs 050.21.LP | -108.533 | 0.000 | -152.549 | -64.518 | Si |
| | 000.00.00 vs 050.15.LP | -68.867 | 0.001 | -112.882 | -24.851 | Si |

* Respecto a la Mezcla de Control

Fuente: Elaboración Propia

De todas maneras, los resultados obtenidos indican que la adición de LP para las dosis evaluadas requiere de otros materiales que permitan aumentar el desempeño de este tipo de mezclas asfálticas ante daño por humedad, entre las que se puede mencionar por ejemplo el cemento, la cal hidratada o las aminas.

4.3. Resultados de Módulo Dinámico

El módulo dinámico de las mezclas asfálticas estudiadas se presenta de forma segregada (Ver Figura 56, Figura 57, 58) y mediante una visión global (Ver Figura 59).

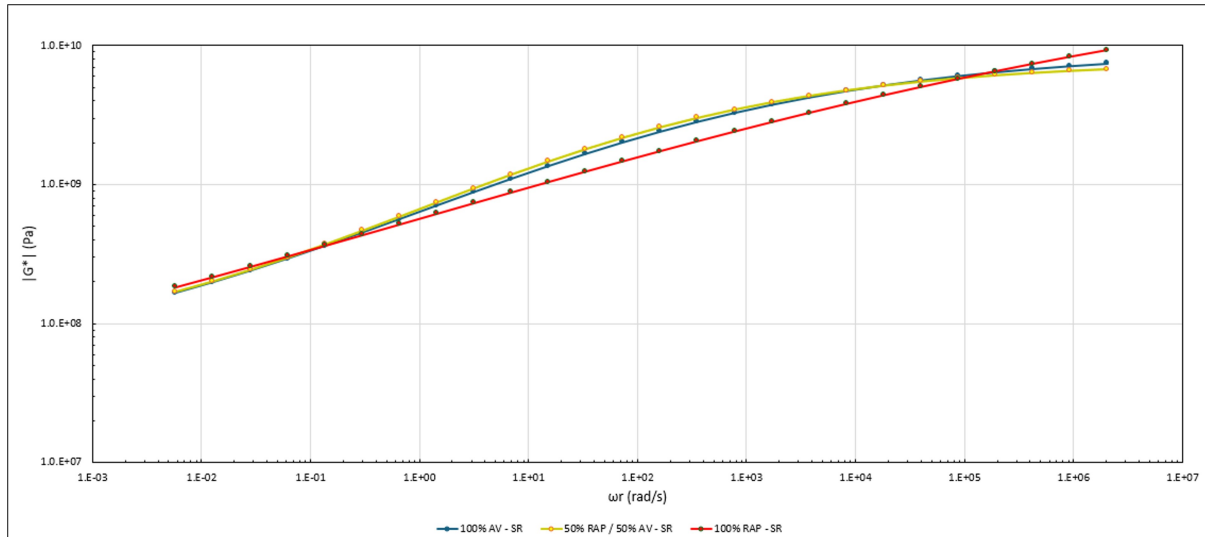


Figura 56: Curva Maestra de Módulo Dinámico para Diferentes Dosis de RAP Sin Presencia de LP.

Fuente: Elaboración Propia.

A partir de los resultados es posible identificar que, en general, el comportamiento de las mezclas constituidas en 100 % A.V., y 50 % RAP y 50 % A.V. se desempeña de igual forma para todo el rango de frecuencias; mientras que la mezcla formada únicamente por agregados RAP si presentó un comportamiento más blando en el rango intermedio de frecuencias (o temperaturas). Ahora bien, al analizar las curvas en orden decreciente de frecuencias, se tiene que visualmente para frecuencias altas (o bajas temperaturas) las curvas son similares para las mezclas compuestas por 100 % A.V., y 50 % RAP y 50 % A.V., mientras que las pendientes de las curvas para 100 % A.V. y 100 % RAP difieren en su comportamiento.

En la Tabla 6 se informan los resultados del análisis de varianza ANOVA realizado para todas las combinaciones de materiales estudiadas, y para el cual se observa que para todas las temperaturas evaluadas, el p-valor es menor al nivel de significancia ($\alpha = 0.05$); rechazando la hipótesis nula y confirmando estadísticamente que la aplicación de RAP y/o LP sí tiene un efecto sobre el módulo dinámico.

Tabla 6: Resultados de ANOVA - Ensayo Módulo Dinámico.

| Temperatura | Unidad | p-valor | Nivel Sig. (α) | ¿Sig? | Decisión |
|-------------|--------|------------|-------------------------|-------|------------------|
| -10 | °C | 0.000485 | 0.05 | Sí | Se Rechaza H_0 |
| 4 | °C | < 0.000001 | 0.05 | Sí | Se Rechaza H_0 |
| 21 | °C | 0.000001 | 0.05 | Sí | Se Rechaza H_0 |
| 37 | °C | 0.000004 | 0.05 | Sí | Se Rechaza H_0 |

Fuente: Elaboración Propia

Subsiguientemente se realizó la Prueba de Tukey, para determinar efectivamente el efecto que tiene la aplicación de RAP en el módulo dinámico, cuyos resultados se exhiben en la Tabla 7. Acorde a lo expuesto en esta última, se determina que, para temperaturas bajas, la distancia relativa entre ellas no es significativa para establecer con certeza un desempeño disímil; en otras palabras, el riesgo del material ante agrietamiento térmico no puede ser establecido directamente, por lo que son necesarios otros ensayos, como por ejemplo TSR a bajas temperaturas, para determinar con alta certeza si un material es más propenso a este tipo de daño que otro. De cualquier manera, dado el valor del módulo dinámico en torno a los 1×10^6 [rad/s], es posible identificar un comportamiento vítreo de las tres dosis de RAP, pudiendo esto explicar la baja o nula diferencia medida.

Tabla 7: Resultados de la Prueba de Tukey para Módulo Dinámico de Mezclas Asfálticas Sin la Presencia de LP.

| Temperatura | Unidad | Comparación | Dif. Medias | p-valor | Lim. Inf. | Lim. Sup. | ¿Sig? |
|-------------|--------|------------------|-------------|---------|-----------|-----------|-------|
| -10 | °C | 0 RAP vs 100 RAP | 1263.988 | 0.251 | -437.298 | 2965.275 | No |
| | | 0 RAP vs 50 RAP | -396.292 | 0.995 | -2097.578 | 1304.995 | No |
| 4 | °C | 0 RAP vs 100 RAP | -1590.536 | 0.000 | -2242.414 | -938.659 | Sí |
| | | 0 RAP vs 50 RAP | -459.632 | 0.307 | -1111.509 | 192.246 | No |
| 21 | °C | 0 RAP vs 100 RAP | -347.425 | 0.187 | -784.696 | 89.845 | No |
| | | 0 RAP vs 50 RAP | 184.964 | 0.850 | -252.307 | 622.234 | No |
| 37 | °C | 0 RAP vs 100 RAP | 90.920 | 0.589 | -72.005 | 253.844 | No |
| | | 0 RAP vs 50 RAP | 80.520 | 0.722 | -82.404 | 243.445 | No |

Fuente: Elaboración Propia

Para las temperaturas intermedias (4 °C y 21 °C), nuevamente las mezclas compuestas por 100 % A.V., y 50 % RAP y 50 % A.V. presentan el mismo desempeño, pero se observan importantes diferencias en el valor del módulo dinámico respecto a mezclas constituidas en su totalidad por RAP, confirmadas por la prueba de Tukey; el comportamiento sin embargo se presenta como contradictorio para estas últimas. Dado que se tiene un material más envejecido y por tanto rigidizado, se esperaba un mayor valor de módulo; esta discrepancia puede ser explicada o bien, por la inherente variabilidad propia del RAP, o bien por una baja capacidad de cohesión entre las partículas provocando una interfaz débil y la consecuente susceptibilidad a grandes deformaciones. A su vez, la baja adhesión puede tener su origen en una incompatibilidad química emulsión – ligante RAP, que debilita la matriz interna del material y provoca una pérdida de la integridad estructural del material. Todo lo anterior indica que el material compuesto por 100 % RAP tiene una menor capacidad de resistencia a fatiga en comparación.

En cuanto al comportamiento a altas temperaturas, es necesario destacar que ninguna de las mezclas estudiadas resistió temperaturas de 54 °C, fallando luego de pocos ciclos, lo que hace patente en primer lugar la inviabilidad de este tipo de mezclas en zonas con altas temperaturas, y en segundo, la necesidad de evaluar otro tipo de materiales que puedan subsanar esta incapacidad, elevando el punto de ablandamiento del asfalto, como pueden ser emulsiones modificadas con polímero o el uso de cal o cemento que rigidice la mezcla asfáltica. Mencionado lo anterior, el comportamiento de las mezclas con diferentes dosis de RAP presentó igual comportamiento, verificado con la prueba de Tukey con un p-valor de 0.59 y 0.72; por lo que se puede establecer un nivel de deformación igual ante sollicitaciones de carga a altas temperaturas.

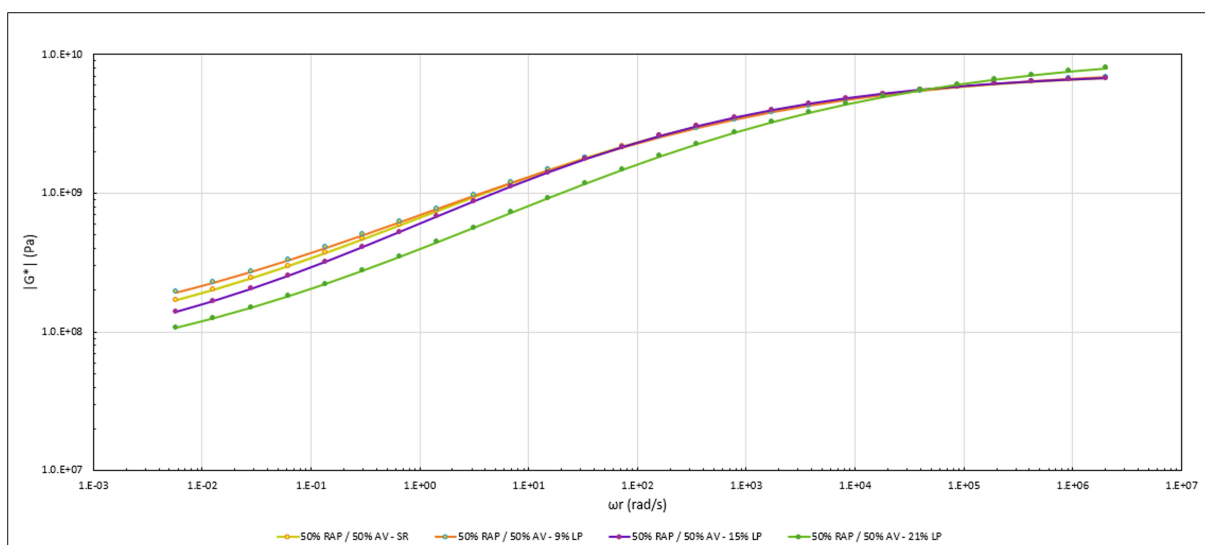


Figura 57: Curva Maestra de Módulo Dinámico para 50 % RAP con Diferentes Dosis de LP.

Fuente: Elaboración Propia.

Analizando los resultados obtenidos para mezclas constituidas por 50 % A.V. y 50 % RAP, se puede visualizar directamente el efecto que tiene la adición del agente rejuvenecedor en el comportamiento mecánico y reológico del material. En primer lugar, mayores dosis de LP provocan mezclas más blandas en comparación, siendo el efecto apreciable para frecuencias inferiores a 1×10^4 [rad/s]. En cuanto al comportamiento del material a bajas temperaturas, el

análisis estadístico mediante Tukey, cuyos resultados se exhiben en la Tabla 8, indica que no existen significativas diferencias para las temperaturas de -10°C y 4°C , es decir, de la misma forma a la observada en la Figura 57, el agente rejuvenecedor no provoca que el desempeño de las mezclas sea diferente.

Tabla 8: Resultados de la Prueba de Tukey - Comparación 0 RAP vs 50 RAP con Diferentes Dosis de LP.

| Temp. Unid. | Comparación | Dif. Medias | p-valor | Lim. Inf. | Lim. Sup. | ¿Sig.? |
|-------------|--|-------------|---------|-----------|-----------|--------|
| -10 °C | 0 RAP Dosis 0 LP vs 50 RAP Dosis 0 LP | -396.292 | 0.995 | -2097.578 | 1304.995 | No |
| | 0 RAP Dosis 0 LP vs 50 RAP Dosis 9 LP | -942.753 | 0.597 | -2644.040 | 758.533 | No |
| | 0 RAP Dosis 0 LP vs 50 RAP Dosis 15 LP | -767.784 | 0.803 | -2469.070 | 933.503 | No |
| | 0 RAP Dosis 0 LP vs 50 RAP Dosis 21 LP | -549.995 | 0.961 | -2251.282 | 1151.291 | No |
| 4 °C | 0 RAP Dosis 0 LP vs 50 RAP Dosis 0 LP | -459.632 | 0.307 | -1111.509 | 192.246 | No |
| | 0 RAP Dosis 0 LP vs 50 RAP Dosis 9 LP | -300.759 | 0.785 | -952.636 | 351.119 | No |
| | 0 RAP Dosis 0 LP vs 50 RAP Dosis 15 LP | -123.214 | 0.999 | -775.091 | 528.664 | No |
| | 0 RAP Dosis 0 LP vs 50 RAP Dosis 21 LP | -900.520 | 0.003 | -1552.397 | -248.642 | Sí |
| 21 °C | 0 RAP Dosis 0 LP vs 50 RAP Dosis 0 LP | 184.964 | 0.850 | -252.307 | 622.234 | No |
| | 0 RAP Dosis 0 LP vs 50 RAP Dosis 9 LP | 67.846 | 1.000 | -369.425 | 505.116 | No |
| | 0 RAP Dosis 0 LP vs 50 RAP Dosis 15 LP | 82.186 | 0.999 | -355.085 | 519.456 | No |
| | 0 RAP Dosis 0 LP vs 50 RAP Dosis 21 LP | -544.239 | 0.009 | -981.509 | -106.968 | Sí |
| 37 °C | 0 RAP Dosis 0 LP vs 50 RAP Dosis 0 LP | 80.520 | 0.722 | -82.404 | 243.445 | No |
| | 0 RAP Dosis 0 LP vs 50 RAP Dosis 9 LP | 221.897 | 0.004 | 58.972 | 384.821 | Sí |
| | 0 RAP Dosis 0 LP vs 50 RAP Dosis 15 LP | -11.888 | 1.000 | -174.813 | 151.036 | No |
| | 0 RAP Dosis 0 LP vs 50 RAP Dosis 21 LP | -80.358 | 0.724 | -243.283 | 82.566 | No |

Fuente: Elaboración Propia

Evaluando las temperaturas intermedias, es posible distinguir esta vez una clara separación para mezclas con 21 % LP respecto a las otras curvas expuestas en la Figura 57; los valores estadísticos lo comprueban, con un p-valor bastante menor a 0.05. Las mezclas con dosis de agente rejuvenecedor de 9 y 15 % se presentan como indistinguibles respecto a mezclas sin agente rejuvenecedor. Así, la dosis más alta evaluada parece lograr reblandecer el material.

Respecto a las frecuencias bajas, si parece existir un reblandecimiento del material para todas las dosis evaluadas; sin embargo, al mirar los datos de la Prueba de Tukey se determina que los porcentajes de LP de 9 y 15 % tienen un p-valor mayor a 0.05, mientras la dosis de 21 % se encuentra alrededor de dicho valor (Ver Tabla 25); lo anterior permite concluir que el LP únicamente cambia el comportamiento para la dosis más alta evaluada, ablandando de forma importante las mezclas con 50 % de RAP, lo que ciertamente puede llevar a problemas de deformación permanente o ahuellamiento, fenómeno que puede ser estudiado y comprobado mediante el ensayo de Rueda de Hamburgo.

A modo de síntesis, la adición del agente rejuvenecedor no cambia el comportamiento mecánico-reológico para dosis de líquido pirolítico de 9 y 15 %; mientras que el porcentaje de adición del 21 % de LP si evidenció variaciones en el desempeño mecánico del material, reblandeciendo la mezcla en su conjunto.

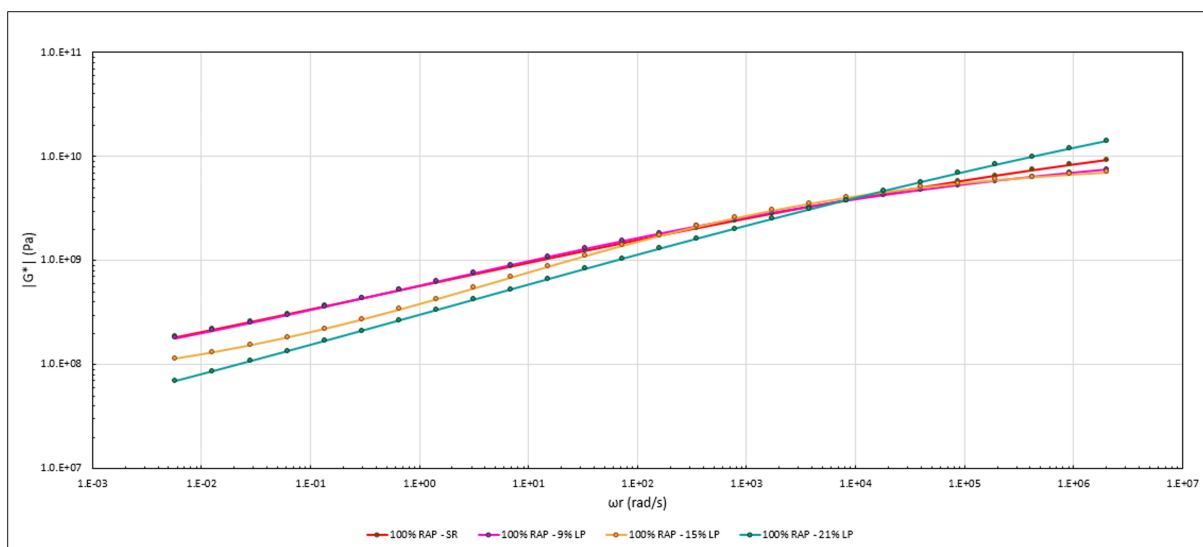


Figura 58: Curva Maestra de Módulo Dinámico para 100 % RAP con Diferentes Dosis de LP.

Fuente: Elaboración Propia.

Estudiando las mezclas constituidas en su totalidad por RAP, se observa a partir de la Figura 58 que la curva sin presencia de LP presenta mayor rigidez en temperaturas intermedias y altas, con un efecto de ablandamiento al incrementar la dosis de agente rejuvenecedor tal y como se espera según lo descrito en la literatura. Ahora bien, en las temperaturas bajas se puede apreciar que el comportamiento para la mayor de las dosis es contradictorio, puesto parece aumentar la rigidez del material en forma creciente a partir de la frecuencia 1×10^4 [rad/s] en adelante. Una posible explicación para la descripción de este fenómeno se basa en la inestabilidad térmica que puede poseer el material rejuvenecedor, pero aun así no pueden ser obviadas las

limitaciones relativas a la construcción de la Curva Maestra. Tanto la aplicación del principio de Superposición Tiempo-Temperatura, mediante la ecuación de Arrhenius para este rango de frecuencias, y el posterior ajuste mediante el Modelo Sigmoidal asumen que el material se comportará termorreológicamente simple, lo que puede haber sido alterado debido a la complejidad química a la que se encuentra expuesta la mezcla asfáltica, no encontrándose esta en el rango lineal asumido. Así, aunque visualmente se aprecia una notoria diferencia, los valores matemáticos reducidos y trabajados no representan el comportamiento físico real del material.

Por su parte, la evaluación en conjunto ante temperaturas intermedias y altas si permiten establecer un reblandecimiento del material para todas las dosis evaluadas. Sin embargo, y tal como se evidenció para mezclas 50 % A.V. y 50 RAP con LP, existe una dicotomía técnica entre el comportamiento a temperaturas intermedias y altas para mezclas con altas dosis de RAP; a temperaturas intermedias si se visualiza una disminución en el módulo de rigidez, pero estadísticamente solo se aprecian cambios significativos en el comportamiento para las dosis de 15 y 21 % de LP; tal y como es posible apreciar en los resultados obtenidos para la Prueba de Tukey indicados en la Tabla 9. Ahora bien, cuando se verifican los resultados para temperaturas altas se constata que no existe una única dosis que permita mejorar globalmente el desempeño de mezclas asfálticas con RAP. Mientras la dosis de 9 % sí logra mantener la resistencia ante deformaciones permanentes a altas temperaturas, no logra disminuir la rigidez de la mezcla a temperaturas bajas; por su parte, las dosis de 21 % LP presenta un comportamiento similar a bajas temperaturas respecto a la mezcla sin agente rejuvenecedor, pero falla al comportarse de forma más viscosa ante altas temperaturas respecto a la Mezcla de Control; lo que ciertamente incrementa la susceptibilidad ante ahuellamiento.

Con lo anterior, es posible establecer que la adición de este agente rejuvenecedor tiene un desempeño restringido, siendo insuficiente para mejorar el comportamiento viscoelástico en todo el rango de frecuencias reducidas estudiadas. Se requieren entonces medidas integrales que mantengan los beneficios otorgados por este agente rejuvenecedor y, a su vez, que puedan completar los vacíos en el comportamiento mecánico y reológico que otorga el LP. Entre las medidas a adoptar se puede mencionar la disminución en la dosis de RAP, el uso de RAP fraccionado, o el uso de asfaltos modificados que puedan mejorar la dilución de los asfaltenos en la fase apolar.

Tabla 9: Resultados de la Prueba de Tukey - Comparación 0 RAP vs 100 RAP con Diferentes Dosis de LP.

| Temp. | Unid. | Comparación | Dif. Medias | p-valor | Lim. Inf. | Lim. Sup. | ¿Sig.? |
|-------|-------|---|-------------|---------|-----------|-----------|--------|
| -10 | °C | 0 RAP Dosis 0 LP vs 100 RAP Dosis 0 LP | 1263.988 | 0.251 | -437.298 | 2965.275 | No |
| | | 0 RAP Dosis 0 LP vs 100 RAP Dosis 9 LP | -421.617 | 0.992 | -2122.904 | 1279.669 | No |
| | | 0 RAP Dosis 0 LP vs 100 RAP Dosis 15 LP | -1167.343 | 0.338 | -2868.630 | 533.944 | No |
| | | 0 RAP Dosis 0 LP vs 100 RAP Dosis 21 LP | 1193.627 | 0.313 | -507.660 | 2894.913 | No |
| 4 | °C | 0 RAP Dosis 0 LP vs 100 RAP Dosis 0 LP | -1590.536 | 0.000 | -2242.414 | -938.659 | Sí |
| | | 0 RAP Dosis 0 LP vs 100 RAP Dosis 9 LP | -1095.783 | 0.000 | -1747.660 | -443.905 | Sí |
| | | 0 RAP Dosis 0 LP vs 100 RAP Dosis 15 LP | -1049.769 | 0.001 | -1701.646 | -397.891 | Sí |
| | | 0 RAP Dosis 0 LP vs 100 RAP Dosis 21 LP | -2190.000 | 0.000 | -2841.878 | -1538.122 | Sí |
| 21 | °C | 0 RAP Dosis 0 LP vs 100 RAP Dosis 0 LP | -347.425 | 0.187 | -784.696 | 89.845 | No |
| | | 0 RAP Dosis 0 LP vs 100 RAP Dosis 9 LP | -385.425 | 0.110 | -822.695 | 51.846 | No |
| | | 0 RAP Dosis 0 LP vs 100 RAP Dosis 15 LP | -602.706 | 0.003 | -1039.977 | -165.436 | Sí |
| | | 0 RAP Dosis 0 LP vs 100 RAP Dosis 21 LP | -808.496 | 0.000 | -1245.767 | -371.226 | Sí |
| 37 | °C | 0 RAP Dosis 0 LP vs 100 RAP Dosis 0 LP | 90.920 | 0.589 | -72.005 | 253.844 | No |
| | | 0 RAP Dosis 0 LP vs 100 RAP Dosis 9 LP | 35.621 | 0.997 | -127.304 | 198.545 | No |
| | | 0 RAP Dosis 0 LP vs 100 RAP Dosis 15 LP | -64.596 | 0.888 | -227.520 | 98.329 | No |
| | | 0 RAP Dosis 0 LP vs 100 RAP Dosis 21 LP | -200.517 | 0.010 | -363.442 | -37.593 | Sí |

Fuente: Elaboración Propia

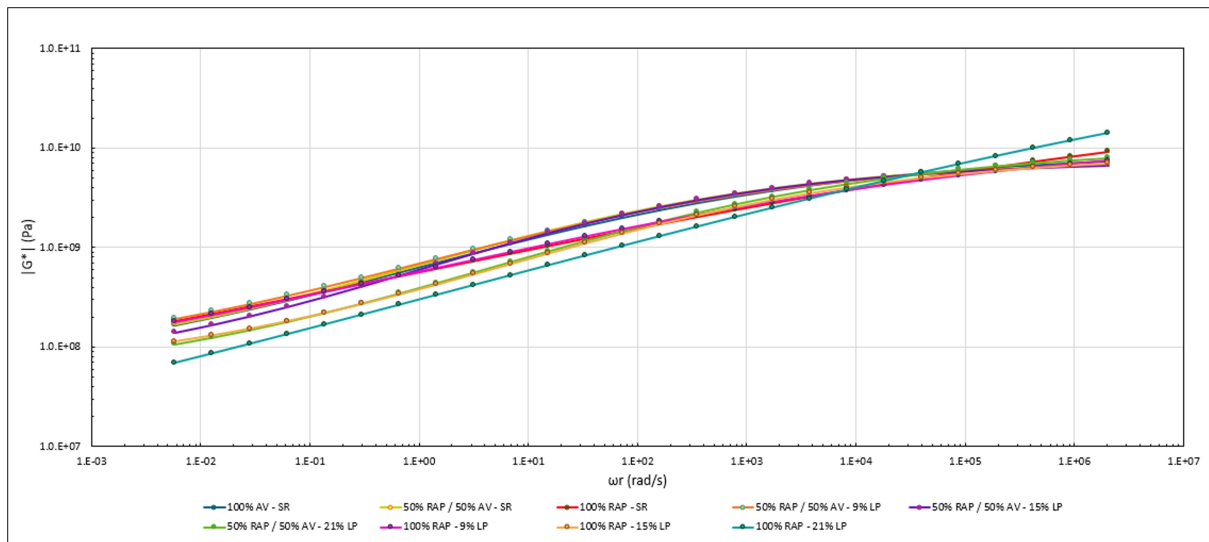


Figura 59: Curva Maestra de Módulo Dinámico para Todas las Dosis de RAP y/o LP Investigadas.

Fuente: Elaboración Propia.

La Figura 59 presenta una visión global del comportamiento que tienen mezclas asfálticas frías con diferentes dosis de RAP y/o de agente rejuvenecedor extraído de la pirólisis de neumáticos fuera de uso mineros. El análisis de los resultados permite establecer que el aumento de la dosis de LP reduce la rigidez para todos los casos estudiados; sin embargo, la eficiencia de esta interacción depende directamente del contenido de RAP, para el que se establece que a mayor contenido de RAP, mayor disminución en su módulo dinámico.

Comparando mezclas con la misma dosis de LP, se establece que las mezclas con contenido de RAP del 50 % mostraron un comportamiento más cercano a lo medido para mezclas conformadas por 100 % de agregados vírgenes, presentando un mejor comportamiento reológico y posiblemente una mejor interacción entre el ligante envejecido y el agente rejuvenecedor. Por el contrario, mezclas compuestas en su totalidad por RAP exhibieron una alta sensibilidad y variabilidad en su respuesta a lo largo de todo el rango de frecuencias reducidas, plausiblemente derivadas de la mala interacción emulsión – ligante RAP – LP, y donde estas diferencias de comportamiento no pueden ser directamente asociadas ni menos solucionadas únicamente mediante un incremento de la dosis de agente rejuvenecedor.

4.4. Resultados Ensayo de Número de Flujo (FN)

El análisis de los resultados obtenidos para el ensayo de Número de Flujo (FN) revela un importante aumento de la rigidez y la capacidad de deformación de mezclas con altas dosis de RAP. A partir del análisis mediante ANOVA, se determinó que el p-valor obtenido fue inferior al nivel de significancia establecido; rechazando la hipótesis nula y verificando que efectivamente existe un efecto en la incorporación de estos materiales respecto a la Mezcla de Control (Ver Tabla 10).

Tabla 10: Resultados de ANOVA - Ensayo de Número de Flujo.

| p-valor | Nivel Signif. (α) | ¿Sig.? | Decisión |
|----------------|--|---------------|------------------|
| < 0.000001 | 0.05 | Sí | Se Rechaza H_0 |

Fuente: Elaboración Propia

Posterior a ello, la Prueba de Tukey demostró que existe una diferencia significativa al comparar la Mezcla de Control con la mayoría de las combinaciones estudiadas, tal como es posible apreciar en la Tabla 11. Estos hallazgos se pueden confirmar mediante lo apreciado en la Figura 62, en donde observa que la adición del agente rejuvenecedor reduce la capacidad de resistir deformaciones pero a su vez altera el comportamiento de mezclas con altas dosis de RAP en deformación secundaria (Ver Figura 60 y Figura 61).

Tabla 11: Comparación de Probetas respecto al Parámetro de Control

| Probetas a Comparar | Dif. Medias | p-valor | Lim. Inf. | Lim. Sup. | ¿Sig.? |
|------------------------------|--------------------|----------------|------------------|------------------|---------------|
| FN.000.00.00 vs FN.050.LP.21 | -24.8720 | 1.00000 | -592.2201 | 542.4761 | No |
| FN.000.00.00 vs FN.100.LP.15 | 84.3129 | 0.99980 | -483.0351 | 651.661 | No |
| FN.000.00.00 vs FN.050.LP.15 | 609.2569 | 0.02990 | 41.9088 | 1176.605 | Sí |
| FN.000.00.00 vs FN.100.LP.21 | -627.5866 | 0.02380 | -1194.9347 | -60.2386 | Sí |
| FN.000.00.00 vs FN.050.00.00 | 1440.2411 | 0.00000 | 872.8931 | 2007.5892 | Sí |
| FN.000.00.00 vs FN.050.LP.09 | 1789.5916 | 0.00000 | 1222.2436 | 2356.9397 | Sí |
| FN.000.00.00 vs FN.100.LP.09 | 2300.8496 | 0.00000 | 1733.5015 | 2868.1977 | Sí |
| FN.000.00.00 vs FN.100.00.00 | 2399.9628 | 0.00000 | 1832.6148 | 2967.3109 | Sí |

* Respecto al Parámetro de Control

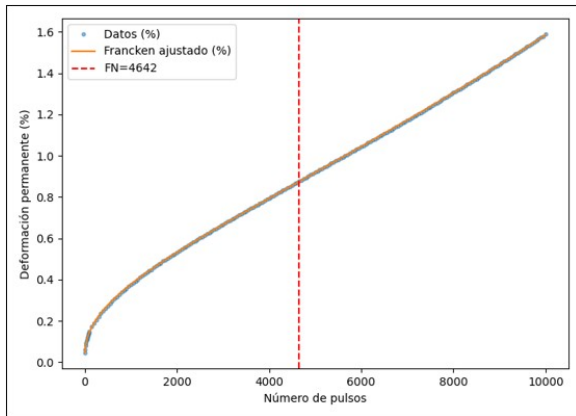


Figura 60: Curva de Comportamiento FN Mezcla 100 % RAP S.R.

Fuente: Elaboración Propia.

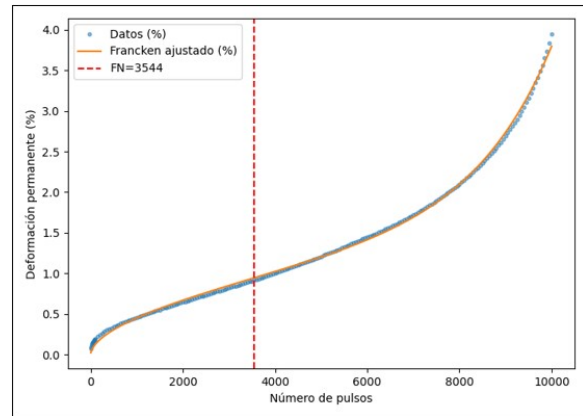


Figura 61: Curva de Comportamiento FN Mezcla 100 % RAP con 9 % LP .

Fuente: Elaboración Propia.

Tal como es esperable para mezclas con 100 % RAP, el comportamiento en esta fase es prácticamente lineal-elástico, esto es, corresponde a un material con una alta rigidez y una incapacidad de relajar esfuerzos, lo que se traduce en un comportamiento frágil; sin embargo, la aplicación del agente rejuvenecedor modifica sustancialmente el desempeño en esta fase, disminuyendo su componente viscosa probablemente debido al aumento relativo de maltenos respecto a los asfaltenos, permitiendo que el material se recupere en esta zona de deformación.

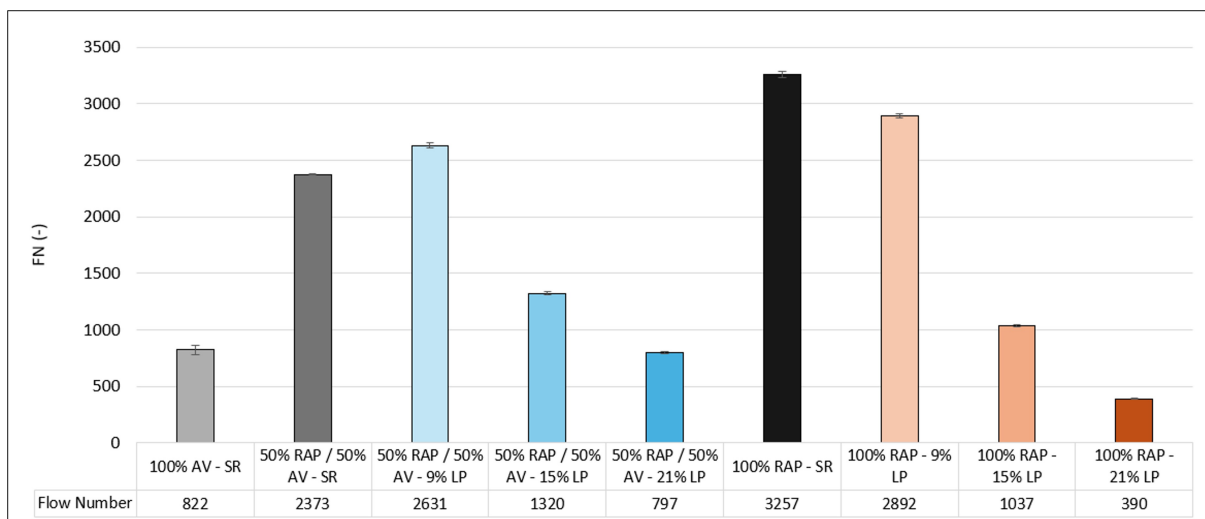


Figura 62: Resultados Ensayo de Número de Flujo para Todas las Dosis de RAP y/o LP Investigadas.

Fuente: Elaboración Propia.

Ahora, en cuanto a lo apreciado en la Figura 62, se determina que la relación RAP – LP es bastante sensible, requiriendo de un equilibrio delicado para lograr un adecuado desempeño, sin excesiva rigidez lineal pero con la suficiente capacidad para resistir ciclos de carga antes de alcanzar la deformación terciaria. Por ejemplo, la mezcla compuesta por 50 % A.V. y 50 % RAP

con una dosis de 15 % LP se diferencia de forma importante con la Mezcla de Control, pero no presenta excesiva linealidad en la zona de deformación secundaria, permitiendo la relajación de esfuerzos.

Refiriendo a las mezclas compuestas por 50 % RAP, presentan en todas sus dosis de agente rejuvenecedor una clara diferenciación para cada zona de deformación primaria, secundaria y terciaria; confirmando su mejor desempeño ante este tipo de degradación del material, sin experimentar rigideces excesivas que puedan incurrir en fallas frágiles y la consecuente aparición de grietas, aun cuando la temperatura es relativamente alta.

Ahora bien, la respuesta de las mezclas constituidas por 100 % RAP también puede ser atribuida a una discontinuidad matricial del material, en la que el ligante asfáltico no es capaz de actuar de forma homogénea, debilitando la capacidad de cohesión de las partículas, lo que genera un equilibrio inestable ante variaciones de LP.

De forma general entonces es posible determinar que la adición de RAP si incrementa la resistencia ante deformación terciaria, pero sin la incorporación de agente rejuvenecedor esta mezcla presenta una alta rigidez con comportamiento lineal, que le impide relajar esfuerzos; aun así, excesivas dosis de LP también se presentan como perjudiciales al reducir la capacidad de deformación producto de un excesivo ablandamiento del material RAP.

4.5. Discusión General

La incorporación de pavimento asfáltico recuperado (RAP) y la de un potencial agente rejuvenecedor (LP) en mezclas asfálticas frías con emulsión presenta una respuesta compleja y altamente variable, tanto en la estabilidad mecánica del material evaluado, como también en su reología para diversos escenarios a los que puede verse sometido un pavimento asfáltico. En primer lugar, el módulo dinámico nos indica que la aplicación de LP si logra reblandecer el material envejecido, pero su eficacia depende fuertemente de un esqueleto mineral virgen capaz de dar soporte estructural a la mezcla asfáltica, pues, como se evidenció para CMA con 100 % RAP, la cohesión entre las partículas recubiertas por ligante envejecido no es lo suficientemente robusta, provocando esta aparente mayor flexibilidad en comparación con mezclas asfálticas con otros contenidos de RAP.

Además, la alta rigidez del RAP no permite disipar energía relajando esfuerzos, comportándose preferentemente como un material elástico y frágil a diferencia de lo observado para mezclas con 100 % A.V.; en ese sentido, la aplicación de LP si logra cambiar el comportamiento reológico de materiales con altas dosis de RAP, probablemente dispersando la matriz de asfaltos a través de los componentes ligeros que presenta y agrega este agente rejuvenecedor en la mezcla asfáltica.

Un aspecto fundamental a considerar en el uso de mezclas frías es su trabajabilidad, de acuerdo a los resultados analizados para Flow Number, la aplicación de 9 % de LP actúa como lubricante para las partículas RAP altamente rugosas, facilitando el reacomodo de las partículas (deformación primaria), otorgando una zona más extensa de deformación secundaria y en consecuencia alcanzando la deformación terciaria a mayor número de ciclos. Sin embargo, el equilibrio de lubricación de las partículas es sensible, lo que se traduce en una rápida sobresaturación del sistema y la posterior caída en la capacidad de deformación producto de una

pérdida de los puntos de trabazón entre agregados pétreos, y en donde la capacidad estructural del sistema queda presumiblemente soportada por la capacidad del ligante asfáltico rejuvenecido.

Por último, la cohesión entre las partículas para diferentes dosis de RAP también presenta un comportamiento altamente variable e inestable al comparar mezclas con y sin la presencia de agregados pétreos vírgenes. Las mezclas compuestas únicamente por agregados RAP reflejan un comportamiento irregular para diferentes dosis de LP, propias de un material altamente heterogéneo, en donde el espesor de las capas de ligante envejecido y su reología no permiten desarrollar la cohesión necesaria para mejorar el comportamiento ante daño por humedad como se visualiza para los resultados de TSR. Ahora bien, la presencia de agregados vírgenes exhibe un comportamiento estabilizante dentro de la mezcla asfáltica, al proporcionar superficies limpias y aptas para una adecuada interacción con la emulsión asfáltica, favoreciendo una estructura más equilibrada y homogénea, y por tanto con un desempeño predecible para los efectos que produce la aplicación de LP en la susceptibilidad ante el daño por humedad para mezclas conformadas por 50 % RAP y 50 % A.V.

4.6. Resumen

Durante el presente capítulo se presentaron y analizaron los resultados obtenidos para el diseño y el comportamiento de mezclas asfálticas frías con emulsión con diferentes dosis de RAP y/o agente rejuvenecedor. Como era previsible, el diseño utilizando las recomendaciones dadas por la FHWA (Cross, Stephen A., 2012) presentó resultados comparables y permitió establecer que los porcentajes de agua de premezclado y de emulsión asfáltica varían al utilizar esta metodología, con valores de 3 % y 10.3 % respectivamente.

El comportamiento en módulo dinámico y el desempeño de las mezclas ante deformación terciaria y daño por humedad expuso la complejidad inherente del RAP; y en donde los agregados pétreos se presentan como estabilizadores de la respuesta estructural. La presencia de 50 % de RAP no se tradujo en diferencias significativas de comportamiento respecto a mezclas compuestas únicamente por agregados vírgenes, mientras que la adición de dosis de LP para la misma situación disminuyó de forma lineal y significativamente estadística el valor del módulo dinámico para gran parte del rango de frecuencias estudiadas. Aun así, mezclas conformadas por 100 % RAP si presentaron inestabilidad en su comportamiento, las que se explican en gran parte por la heterogeneidad propia del material.

De la misma forma, la adición de RAP incrementa el número de flujo (FN) pero afecta al comportamiento de las mezclas en su deformación secundaria, por lo que la dosis a aplicar de LP debe ser ajustada delicadamente para no reblandecer o lubricar en exceso las partículas, pudiendo esto resultar en una menor resistencia a la deformación terciaria.

Finalmente, el desempeño ante daño por humedad también confirmó la inestabilidad de las mezclas con 100 % RAP y el papel que juegan las mezclas con agregados vírgenes como mejorador de la respuesta estructural; de cualquier forma, la adición de LP demostró disminuir la capacidad de las mezclas en condición no saturada, con ligeras diferencias en magnitud de resistencia para mezclas en condición saturada, y requiriendo posiblemente de otros materiales que puedan subsanar esta condición para el daño por humedad.

V | Capítulo 5

5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

El presente estudio abordó la evaluación y comprensión reológica y mecánica de mezclas asfálticas frías con emulsión, con la incorporación de pavimento asfáltico recuperado (RAP) y un agente rejuvenecedor extraído a partir de la pirólisis de neumáticos fuera de uso (LP). A través de una extensa revisión del estado del arte, se identificaron los efectos que tiene la incorporación de material con ligante asfáltico envejecido en mezclas asfálticas CMA; estableciendo el proceso de rigidización del cemento asfáltico y como la incorporación de materiales con, entre otras propiedades, altos contenidos de maltenos, logran restaurar las propiedades físicas y reológicas de los ligantes envejecidos.

Aun cuando la revisión de la literatura describe el comportamiento del RAP a temperaturas en torno a los 25 °C como una “roca negra”, los resultados de este estudio indican que sí existe un efecto reológico estadísticamente significativo, dado por la incorporación del LP y la posterior interacción entre ligante asfáltico rejuvenecido y emulsión asfáltica. Con lo anterior, a pesar de que la hipótesis investigativa es rechazada, este estudio demostró que la aplicación de agentes rejuvenecedores a temperaturas intermedias permite restituir la capacidad de relajación de esfuerzos de ligantes altamente rigidizados, logrando reblandecer mezclas asfálticas frías con altas dosis de RAP en un amplio rango de temperaturas (y frecuencias).

A partir de los resultados obtenidos y sus respectivos análisis, es posible establecer las siguientes conclusiones:

- La incorporación de material recuperado RAP en mezclas asfálticas permite acercar al sector de la construcción a la carbono neutralidad, a la vez que proporciona grandes beneficios económicos y ambientales a la industria vial.

- Es imperativo establecer una metodología de diseño que sea ampliamente aceptada por la comunidad científica e industrial, de modo que la comparación entre diferentes estudios de mezclas asfálticas frías, con o sin presencia de RAP, sea rigurosa y verosímil.

- La cantidad de RAP a incorporar en la mezcla asfáltica fría afecta de forma importante el comportamiento mecánico y reológico del material. Una dosis de 50 % se desempeña mejor ante el daño por humedad y tiene mayor resistencia ante deformación terciaria y al mismo tiempo cuenta con un comportamiento de módulo dinámico similar respecto a mezclas constituidas por 100 % A.V. Sin embargo, mezclas fabricadas únicamente con RAP presentan un comportamiento más elástico y frágil en comparación, aún cuando su desempeño a daño por humedad y su resistencia a deformación terciaria sea la mayor de las estudiadas.

- El Líquido Pirolítico permite modificar propiedades reológicas y mecánicas al aplicarse a mezclas asfálticas frías, por lo que cuenta con sustento técnico para continuar investigando este material como un potencial agente rejuvenecedor útil para este tipo de mezclas.

- El uso de agentes rejuvenecedores permite reactivar la reología de ligantes asfálticos envejecidos a temperaturas en torno a los 25 °C, sin embargo, debido a que la difusión se encuentra limitada por la baja energía cinética del sistema, el efecto de rejuvenecimiento es parcial.

- Los ensayos realizados indican una alta complejidad en el desempeño de los materiales estudiados, y donde el efecto mecánico que tiene la aplicación de diferentes dosis de Líquido Pirolítico no es lineal, dependiendo directamente de la proporción de RAP en la mezcla asfáltica fría.

- Una dosis excesiva de Líquido Pirolítico, superior al 15 %, ablanda en demasía la mezcla asfáltica, perdiendo rápidamente la capacidad estructural derivada del bajo contacto entre las partículas de agregado pétreo.

- Las mezclas asfálticas frías con o sin presencia de RAP y/o LP presentan una alta vulnerabilidad al daño por humedad, siendo esta una condición crítica de resistencia. Se concluye además que las mezclas con 100 % RAP presentan un comportamiento con alta incertidumbre y alta susceptibilidad ante variaciones de LP; mientras que mezclas con 50 % A.V. y 50 % RAP exhiben un comportamiento predecible y dependiente de la presencia de agregados pétreos vírgenes.

- Integrando los resultados obtenidos en este estudio se determina que la confección e implementación de mezclas asfálticas frías con 100 % RAP con o sin la adición de un agente rejuvenecedor no es técnicamente viable para capas de rodadura debido a su alta fragilidad y variabilidad, siendo preferible su uso como capa base para pavimentos con bajo nivel de tránsito. Por su parte, mezclas con 50 % A.V. y 50 % RAP, y con adición de bajas dosis de LP, presentan un desempeño similar y en algunos casos mejor que mezclas asfálticas frías fabricadas en su totalidad por agregados vírgenes; contando con respaldo técnico para ser utilizadas como capa base para caminos con mayores requerimientos de esfuerzo y deformación.

5.2. Recomendaciones

Considerando la investigación realizada, y las limitaciones y alcances experimentales de este estudio, se sugieren las siguientes recomendaciones para ampliar el campo de conocimiento de mezclas asfálticas frías con emulsión con incorporación de RAP y de agentes rejuvenecedores:

- Evaluar diferentes dosis de RAP para establecer el efecto que tienen los agregados pétreos vírgenes en el comportamiento mecánico y reológico en las mezclas asfálticas.

- Analizar otras dosis de LP, optimizando su aplicación para diferentes tipos de ensayos, verificando si efectivamente el desempeño de las mezclas con altas dosis de RAP y agente rejuvenecedor puede verse incrementado ante diferentes tipos de solicitaciones.

- Evaluar otro tipo de agentes rejuvenecedores, para determinar el efecto de la compatibilidad fisicoquímica en la respuesta mecánica y reológica de las mezclas asfálticas frías con RAP.

- Determinar el comportamiento de las mezclas evaluadas en este estudio en otros ensayos como son Rueda de Hamburgo o Ensayo de Fatiga.

- Cuantificar la activación del ligante RAP para diferentes condiciones de temperatura, presión y tipo de agente rejuvenecedor.

Referencias

- Ahmad, K. A., Abdullah, M. E., Hassan, N. A., Usman, N., Mohd Hassan, M. R., Bilema, M. A. M., ... Batari, A. (2018, abril). Effect of Bio based rejuvenator on mix design, Energy consumption and GHG Emission of High RAP Mixture. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 140, 012086. Descargado 2025-12-11, de <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/140/1/012086> doi: 10.1088/1755-1315/140/1/012086
- Alegria, A., Guerrica-Echevarria, E., Goitiandia, L., Telleria, I., y Colmenero, J. (1995, febrero). Alpha-Relaxation in the Glass Transition Range of Amorphous Polymers. 1. Temperature Behavior across the Glass transition. *Macromolecules*, 28(5), 1516–1527. Descargado 2025-12-18, de <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ma00109a025> doi: 10.1021/ma00109a025
- Al-Saffar, Z. H., Yaacob, H., Satar, M. K. I. M., Saleem, M. K., Lai, J. C., y Putra Jaya, R. (2021, marzo). A review on rejuvenating materials used with reclaimed hot mix asphalt. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 48(3), 233–249. Descargado 2025-12-29, de <https://cdnsiencepub.com/doi/10.1139/cjce-2019-0635> doi: 10.1139/cjce-2019-0635
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2015). *Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA)*. AASHTO.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2022). *Standard Method of Test for Determining the Dynamic Modulus and Flow Number for Asphalt Mixtures Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT)*. AASHTO.
- Arimilli, S., Jain, P. K., y Nagabhushana, M. N. (2016, febrero). Optimization of Recycled Asphalt Pavement in Cold Emulsified Mixtures by Mechanistic Characterization. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(2), 04015132. Descargado de <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0001412> doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001412
- Arrhenius, Svante. (1889). Über die Reaktionsgeschwindigkeit bei der Inversion von Rohrzucker durch Säuren. *Zeitschrift für physikalische Chemie*, 4(1), 226–248.
- Arteaga-Pérez, L. E., Larrere, S., Chávez-Delgado, M., Rueda Ordoñez, Y. J., Concha, J. L., Segura, C., ... Casas-Ledón, Y. (2025, enero). Environmental life cycle assessment of encapsulated rejuvenators from mining truck waste tires via pyrolysis for asphalt self-healing. *Journal of Cleaner Production*, 490, 144787. Descargado 2025-12-29, de <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652625001374> doi: 10.1016/j.jclepro.2025.144787
- Asphalt Institute. (1989). *Asphalt Cold Mix Manual* (3.^a edición ed.). Lexington, KY: Asphalt Institute.
- ASTM International. (2019). *Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures*. Descargado de https://store.astm.org/d2041_d2041m-19.html
- ASTM International. (2021). *Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Asphalt Mixtures*. Descargado de https://store.astm.org/d2726_d2726m-21.html
- ASTM International. (2022a). *Standard Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves*. ASTM International. Descargado de <https://store.astm.org/e0011-22.html>

- ASTM International. (2022b). *Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Mixtures*. Descargado de https://store.astm.org/d4867_d4867m-22e01.html
- Aurangzeb, Q., Al-Qadi, I. L., Ozer, H., y Yang, R. (2014, febrero). Hybrid life cycle assessment for asphalt mixtures with high RAP content. *Resources, Conservation and Recycling*, 83, 77–86. Descargado 2025-12-11, de <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092134491300270X> doi: 10.1016/j.resconrec.2013.12.004
- Baghaee Moghaddam, T., y Baaj, H. (2016, julio). The use of rejuvenating agents in production of recycled hot mix asphalt: A systematic review. *Construction and Building Materials*, 114, 805–816. Descargado de <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061816305499> doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.015
- Behnood, A., y Modiri Gharehveran, M. (2019, marzo). Morphology, rheology, and physical properties of polymer-modified asphalt binders. *European Polymer Journal*, 112, 766–791. Descargado 2025-12-17, de <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0014305718318019> doi: 10.1016/j.eurpolymj.2018.10.049
- Biblioteca del Congreso Nacional. (2016). *Biblioteca del Congreso Nacional | Ley Chile*. Descargado 2025-12-29, de <https://www.bcn.cl/leychile>
- Bocci, M., Grilli, A., Cardone, F., y Graziani, A. (2011, febrero). A study on the mechanical behaviour of cement–bitumen treated materials. *Construction and Building Materials*, 25(2), 773–778. Descargado 2025-12-15, de <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061810003740> doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.07.007
- Carpenter, S. H., y Wolosick, J. R. (1980). Modifier influence in the characterization of hot-mix recycled material. *Transportation Research Record*(777). Descargado de <https://trid.trb.org/View/167580>
- Cavalli, M. C., Partl, M. N., y Poulidakos, L. D. (2017, abril). Measuring the binder film residues on black rock in mixtures with high amounts of reclaimed asphalt. *Journal of Cleaner Production*, 149, 665–672. Descargado 2025-12-26, de <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095965261730269X> doi: 10.1016/j.jclepro.2017.02.055
- Chen, H., Barbieri, D. M., Zhang, X., y Hoff, I. (2022, junio). Reliability of Calculation of Dynamic Modulus for Asphalt Mixtures Using Different Master Curve Models and Shift Factor Equations. *Materials*, 15(12), 4325. Descargado 2025-12-19, de <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/12/4325> doi: 10.3390/ma15124325
- Chen, Xiang. (2015). *Evaluation of Cold Recycled Asphalt Mixtures Modified with Conventional and Polymer Modified Emulsion* (Tesis Doctoral no publicada). The Pennsylvania State University.
- Comisión Europea. (2012). *Strategy for the sustainable competitiveness of the construction sector and its enterprises* (Inf. Téc. n.º COM(2012) 433 final). Bruselas: Comisión Europea. Descargado de <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A52012DC0433>
- Cooper Technology. (2008). *CRT-HYD25 Universal Servo Hydraulic Testing Machine: User Manual* (Inf. Téc.). Cooper Research Technology.
- Copeland, Audrey. (2011). *Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice* (Inf. Téc. n.º FHWA-HRT-11-021). Federal Highway Administration.
- Cross, Stephen A. (2012). *Cold In-Place Recycling (CIR) Study* (Inf. Téc. n.º FHWA-CFL/TD-12-003). Federal Highway Administration.
- Cruz Torres, Catalina Fernanda Margarita. (2025). *Determinación del efecto de la aplicación de rejuvenecedor pirolítico de neumáticos fuera de uso en las propiedades reológicas del cemento asfáltico extraído de RAP, utilizando el Reómetro de Corte Dinámico* (Memoria

- de Título). Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.
- Cámara del Neumático de Chile. (2024). *Generación de NFU por regiones en Chile*. Descargado de <https://cinc.cl/estadisticas/>
- Dash, S. S., Chandrappa, A. K., y Sahoo, U. C. (2022, enero). Design and performance of cold mix asphalt – A review. *Construction and Building Materials*, 315, 125687. Descargado 2025-12-31, de <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061821034218> doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125687
- Deb, P., y Lakshman Singh, K. (2022, febrero). Mix design, durability and strength enhancement of cold mix asphalt: a state-of-the-art review. *Innovative Infrastructure Solutions*, 7(1), 61. Descargado 2025-12-27, de <https://link.springer.com/10.1007/s41062-021-00600-2> doi: 10.1007/s41062-021-00600-2
- Di Benedetto, H., Olard, F., Sauzéat, C., y Delaporte, B. (2004, enero). Linear viscoelastic behaviour of bituminous materials: From binders to mixes. *Road Materials and Pavement Design*, 5(sup1), 163–202. Descargado de <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14680629.2004.9689992> doi: 10.1080/14680629.2004.9689992
- Dirección de Vialidad. (2003). *Manual de Carreteras - Volumen N°8: Especificaciones y Métodos de Muestreo, Ensaye y Control*. Chile: Ministerio de Obras Públicas.
- Dirección de Vialidad. (2024a). *Manual de Carreteras - Volumen N°5: Especificaciones Técnicas Generales de Construcción* (Edición 2024 ed.). Chile: Ministerio de Obras Públicas.
- Dirección de Vialidad. (2024b). *Red Vial Nacional: Dimensionamiento y Características* (Inf. Téc.). Ministerio de Obras Públicas. Descargado de <https://vialidad.mop.gob.cl/uploads/sites/9/2024/11/Red-Vial-Nacional-Dimensionamiento-y-Characterísticas-Ano-2023.pdf>
- Dong, S., Wang, D., Hao, P., Zhang, Q., Bi, J., y Chen, W. (2021, noviembre). Quantitative assessment and mechanism analysis of modification approaches for cold recycled mixtures with asphalt emulsion. *Journal of Cleaner Production*, 323, 129163. Descargado 2025-12-15, de <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652621033497> doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129163
- Du, S. (2024, noviembre). Liquid Drainage in the Compaction Process of Asphalt Emulsion Mixtures with Cement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 36(11), 04024361. Descargado 2026-01-02, de <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/JMCEE7.MTENG-17832> doi: 10.1061/JMCEE7.MTENG-17832
- El-Ashwah, A. S., y Abdelrahman, M. (2024, agosto). The Effectiveness of Waste Tire Pyrolysis Oils (WTPOs) as Rejuvenating Agents for Asphalt Materials. *Environments*, 11(8), 176. Descargado 2025-12-30, de <https://www.mdpi.com/2076-3298/11/8/176> doi: 10.3390/environments11080176
- Flores, G., Gallego, J., Miranda, L., y Marcobal, J. R. (2020, julio). Cold asphalt mix with emulsion and 100% rap: Compaction energy and influence of emulsion and cement content. *Construction and Building Materials*, 250, 118804. Descargado 2026-01-22, de <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061820308096> doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118804
- He, Y., Li, Y., Zhang, J., Xiong, K., Huang, G., Hu, Q., y Zhao, X. (2024, enero). Performance evolution mechanism and affecting factors of emulsified asphalt cold recycled mixture performance: A state-of art review. *Construction and Building Materials*, 411, 134545. Descargado 2026-01-02, de <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061823042642> doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134545
- Indian Roads Congress. (2014). *Use of Cold Mix Technology in Construction and Maintenance*

- of Roads Using Bitumen Emulsion* (Inf. Téc. n.º IRC:SP:100-2014). India: Indian Roads Congress.
- Jain, S., y Singh, B. (2021, enero). Cold mix asphalt: An overview. *Journal of Cleaner Production*, 280, 124378. Descargado de <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652620344231> doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124378
- James, A. (2006). Overview of asphalt emulsions. *Transportation Research Circular*(E-C102).
- Kal Tire Recycling Chile Spa. (2024, abril). *Hoja de Datos de Seguridad: Líquido Pirolítico* (Inf. Téc.).
- Kandhal, Prithvi S. (1988). *Low-temperature properties of paving asphalt cements* (Inf. Téc. n.º State of the Art Report 7). Washington, D.C.: Transportation Research Board.
- Karlsson, R., y Isacson, U. (2003, abril). Application of FTIR-ATR to Characterization of Bitumen Rejuvenator Diffusion. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15(2), 157–165. Descargado 2025-12-08, de <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290899-1561%282003%2915%3A2%28157%29> doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2003)15:2(157)
- Kim, Y., y Lee, H. D. (2012, mayo). Performance evaluation of Cold In-Place Recycling mixtures using emulsified asphalt based on dynamic modulus, flow number, flow time, and raveling loss. *KSCCE Journal of Civil Engineering*, 16(4), 586–593. Descargado 2026-01-15, de <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S122679882400240X> doi: 10.1007/s12205-012-1376-0
- Kumar, Abhinay, y Choudhary, Rajan. (2020). Use of waste tyre pyrolytic products for asphalt binder modification. *International Journal of Pavement Engineering & Asphalt Technology*, 21, 35–51. doi: 10.1515/ijpeat-2016-0031
- Landi, D., Marconi, M., Bocci, E., y Germani, M. (2020, marzo). Comparative life cycle assessment of standard, cellulose-reinforced and end of life tires fiber-reinforced hot mix asphalt mixtures. *Journal of Cleaner Production*, 248, 119295. Descargado de <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652619341654> doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119295
- Larrain, M. M. (2015). *Analytical modeling of rutting potential of asphalt mixes using Hamburg Wheel Tracking device*. Unpublished. Descargado 2026-02-05, de <https://www.researchgate.net/doi/10.13140/RG.2.1.4754.9206> doi: 10.13140/RG.2.1.4754.9206
- Leichtle Fernandez, Mathias Rolando. (2026). *Análisis de susceptibilidad a la humedad de mezcla asfáltica fría con pavimento recuperado (RAP) y rejuvenecedor basado en líquido pirolítico mediante índice TSR* (Memoria de Título). Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.
- Lesueur, D. (2009, enero). The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification. *Advances in Colloid and Interface Science*, 145(1-2), 42–82. Descargado 2025-12-16, de <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0001868608001413> doi: 10.1016/j.cis.2008.08.011
- Li, C., Ouyang, J., Cao, P., Shi, J., Yang, W., y Sha, Y. (2021, abril). Effect of Rejuvenating Agent on the Pavement Properties of Cold Recycled Mixture with Bitmen Emulsion. *Coatings*, 11(5), 520. Descargado 2026-01-22, de <https://www.mdpi.com/2079-6412/11/5/520> doi: 10.3390/coatings11050520
- Liu, Z., Sun, L., Zhai, J., y Huang, W. (2022, octubre). A review of design methods for cold in-place recycling asphalt mixtures: Design processes, key parameters, and evaluation. *Journal of Cleaner Production*, 370, 133530. Descargado de <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652622031109> doi: 10.1016/j

.jclepro.2022.133530

- Lizasoain-Arteaga, E., Indacochea-Vega, I., Pascual-Muñoz, P., y Castro-Fresno, D. (2019, enero). Environmental impact assessment of induction-healed asphalt mixtures. *Journal of Cleaner Production*, 208, 1546–1556. Descargado de <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652618332499> doi: 10.1016/j.jclepro.2018.10.223
- Loise, V., Caputo, P., Porto, M., Calandra, P., Angelico, R., y Oliviero Rossi, C. (2019, octubre). A Review on Bitumen Rejuvenation: Mechanisms, Materials, Methods and Perspectives. *Applied Sciences*, 9(20), 4316. Descargado 2025-12-16, de <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/20/4316> doi: 10.3390/app9204316
- Lomellini, Paolo. (1992). Williams-Landel-Ferry versus Arrhenius behaviour: polystyrene melt viscoelasticity revised. *Polymer*, 33(23), 4983–4989.
- Meijer, J. R., Huijbregts, M. A. J., Schotten, K. C. G. J., y Schipper, A. M. (2018, junio). Global patterns of current and future road infrastructure. *Environmental Research Letters*, 13(6), 064006. Descargado 2025-12-10, de <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aabd42> doi: 10.1088/1748-9326/aabd42
- Mercado, R., y Fuentes Pumarejo, L. (2016, octubre). Asphalt emulsions formulation: State-of-the-art and dependency of formulation on emulsions properties. *Construction and Building Materials*, 123, 162–173. Descargado 2025-12-15, de <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061816310674> doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.129
- Milad, A., Babalghaith, A. M., Al-Sabaei, A. M., Dulaimi, A., Ali, A., Reddy, S. S., ... Yusoff, N. I. M. (2022, noviembre). A Comparative Review of Hot and Warm Mix Asphalt Technologies from Environmental and Economic Perspectives: Towards a Sustainable Asphalt Pavement. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(22), 14863. Descargado 2025-12-11, de <https://www.mdpi.com/1660-4601/19/22/14863> doi: 10.3390/ijerph192214863
- Ministerio del Medio Ambiente. (2021, enero). *Ley REP: Se publicó decreto que obliga a empresas importadoras de neumáticos a recolectar y reciclar el 90% de ellos*. Descargado de <https://mma.gob.cl/ley-rep-se-publico-decreto-que-obliga-a-empresas-importadoras-de-neumaticos-a-recolectar-y-reciclar-el-90-de-ellos/>
- Mossa, Z., Hilal, M. M., Hasan, S. S., Fattah, M. Y., y Hussein, H. H. (2025, marzo). Evaluation of moisture damage for warm mix asphalt (WMA) containing reclaimed asphalt pavement (RAP). *Open Engineering*, 15(1), 20240071. Descargado 2026-01-29, de <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/eng-2024-0071/html> doi: 10.1515/eng-2024-0071
- Nguyen, H. M., Pouget, S., Di Benedetto, H., y Sauzéat, C. (2009, octubre). Time-temperature superposition principle for bituminous mixtures. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 13(9), 1095–1107. Descargado 2025-12-17, de <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/19648189.2009.9693176> doi: 10.1080/19648189.2009.9693176
- Niazi, Y., y Jalili, M. (2009, marzo). Effect of Portland cement and lime additives on properties of cold in-place recycled mixtures with asphalt emulsion. *Construction and Building Materials*, 23(3), 1338–1343. Descargado 2025-12-27, de <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061808002110> doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.07.020
- Norambuena-Contreras, J., Arteaga-Pérez, L. E., Concha, J. L., y Gonzalez-Torre, I. (2021, junio). Pyrolytic oil from waste tyres as a promising encapsulated rejuvenator for the extrinsic self-healing of bituminous materials. *Road Materials and Pavement Design*, 22(sup1), S117–S133. Descargado de <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14680629.2021.1907216> doi: 10.1080/14680629.2021.1907216

- Norambuena-Contreras, J., Serpell, R., Valdés Vidal, G., González, A., y Schlangen, E. (2016, noviembre). Effect of fibres addition on the physical and mechanical properties of asphalt mixtures with crack-healing purposes by microwave radiation. *Construction and Building Materials*, 127, 369–382. Descargado 2025-12-13, de <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061816316099> doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.10.005
- Park, K., Hwang, Y., Seo, S., y Seo, H. (2003, febrero). Quantitative Assessment of Environmental Impacts on Life Cycle of Highways. *Journal of Construction Engineering and Management*, 129(1), 25–31. Descargado de <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9364%282003%29129%3A1%2825%29> doi: 10.1061/(ASCE)0733-9364(2003)129:1(25)
- Parraguez Cruz, Sergio Abraham. (2025). *Comparación de diseño con compactador giratorio de mezclas asfálticas en frío para material reciclado y material virgen mediante ensayo TSR* (Memoria de Título). Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.
- Pasetto, M., Baliello, A., Giacomello, G., y Pasquini, E. (2021, diciembre). Towards very high RAP content asphalt mixes: A comprehensive performance-based study of rejuvenated binders. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 8(6), 1022–1035. Descargado de <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2095756421000659> doi: 10.1016/j.jtte.2020.12.007
- Petersen, J. Claine. (1984). Chemical Composition of Asphalt as Related to Asphalt Durability: State of the Art. *Transportation Research Record*, 999, 13–30.
- Planas Willis, Xavier. (2016). *Analysis of the use of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) in Europe* (Tesis de Magister). POLITECNICO DI MILANO.
- Porto, M., Angelico, R., Caputo, P., Abe, A. A., Teltayev, B., y Rossi, C. O. (2022, enero). The Structure of Bitumen: Conceptual Models and Experimental Evidences. *Materials*, 15(3), 905. Descargado 2025-12-16, de <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/3/905> doi: 10.3390/ma15030905
- Productos Bituminosos S.A. (2024, abril). *Emulsión Asfáltica CSS-1h* (Certificado de Calidad). Chile: PROBISA.
- Providel Briceño, Ignacio Alejandro. (2025). *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 título). Universidad Técnica Federico Santa María, Chile.
- Read, John, y Whiteoak, David. (2003). *The Shell Bitumen Handbook* (5.^a ed.). London: Thomas Telford.
- Ren, S., Liu, X., Gao, Y., Jing, R., Lin, P., Erkens, S., y Wang, H. (2023, febrero). Molecular dynamics simulation and experimental validation on the interfacial diffusion behaviors of rejuvenators in aged bitumen. *Materials & Design*, 226, 111619. Descargado 2025-12-29, de <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0264127523000345> doi: 10.1016/j.matdes.2023.111619
- Rezaei, M., Hashemian, L., Bayat, A., y Huculak, B. (2017, octubre). Investigation of Rutting Resistance and Moisture Damage of Cold Asphalt Mixes. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(10), 04017193. Descargado 2025-12-15, de <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0002042> doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002042
- Rowe, G. M., y Sharrock, M. J. (2011, enero). Alternate Shift Factor Relationship for Describing Temperature Dependency of Viscoelastic Behavior of Asphalt Materials. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2207(1), 125–135. Descargado 2025-12-17, de <https://journals.sagepub.com/doi/10.3141/2207-16>

doi: 10.3141/2207-16

- Rubio, M. D. C., Moreno, F., Martínez-Echevarría, M. J., Martínez, G., y Vázquez, J. M. (2013, febrero). Comparative analysis of emissions from the manufacture and use of hot and half-warm mix asphalt. *Journal of Cleaner Production*, 41, 1–6. Descargado 2025-12-13, de <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652612005070> doi: 10.1016/j.jclepro.2012.09.036
- Ržek, L., Ravnikar Turk, M., y Tušar, M. (2022, abril). Rejuvenator Obtained by Pyrolysis of Waste Tires for Use in Asphalt Mixtures with Added Reclaimed Asphalt. En M. Bartoli y M. Giorcelli (Eds.), *Recent Perspectives in Pyrolysis Research*. IntechOpen. Descargado 2025-12-30, de <https://www.intechopen.com/chapters/77939> doi: 10.5772/intechopen.99490
- Sabita. (2019). *Use of Reclaimed Asphalt in the Production of Asphalt* (Inf. Téc. n.º Manual 36 / TRH 21). South Africa: Southern African Bitumen Association.
- Shatnawi, N., Obaidat, M. T., y Al-Mistarehi, B. (2021, diciembre). Road pavement rut detection using mobile and static terrestrial laser scanning. *Applied Geomatics*, 13(4), 901–911. Descargado 2026-02-05, de <https://link.springer.com/10.1007/s12518-021-00400-4> doi: 10.1007/s12518-021-00400-4
- Sun, D.-X., Zou, Y., Wang, H., y Weng, H.-X. (2011, julio). Study of Road Bitumen Modified with Heavy Fraction of Tire Pyrolysis Oil. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 33(19), 1822–1831. Descargado de <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15567030903419489> doi: 10.1080/15567030903419489
- Tarsi, G., Tataranni, P., y Sangiorgi, C. (2020, septiembre). The Challenges of Using Reclaimed Asphalt Pavement for New Asphalt Mixtures: A Review. *Materials*, 13(18), 4052. Descargado 2025-12-09, de <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/18/4052> doi: 10.3390/ma13184052
- Technical Activities Division, Transportation Research Board, y National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2006). *Asphalt Emulsion Technology*. Washington, D.C.: Transportation Research Board. Descargado 2025-12-15, de <https://www.nap.edu/catalog/23246> (Pages: 23246) doi: 10.17226/23246
- Wang, Z., Wang, P., Guo, H., Wang, X., y Li, G. (2020, enero). Adhesion Improvement between RAP and Emulsified Asphalt by Modifying the Surface Characteristics of RAP. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020(1), 4545971. Descargado 2025-12-26, de <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2020/4545971> doi: 10.1155/2020/4545971
- Williams, M. L., Landel, R. F., y Ferry, J. D. (1955, julio). The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Glass-forming Liquids. *Journal of the American Chemical Society*, 77(14), 3701–3707. Descargado 2025-12-18, de <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ja01619a008> doi: 10.1021/ja01619a008
- Xiao, F., Yao, S., Wang, J., Li, X., y Amirkhanian, S. (2018, agosto). A literature review on cold recycling technology of asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 180, 579–604. Descargado 2025-12-10, de <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061818313928> doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.006
- Yan, J., Zhang, Z., Charmot, S., Ding, W., y Li, F. (2015, enero). Investigation and Prediction Model for the Dynamic Modulus of Asphalt Emulsion Cold Recycled Mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(1), 04014113. Descargado 2026-01-15, de <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0001048>

doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001048

- Zaumanis, M., y Mallick, R. B. (2015, enero). Review of very high-content reclaimed asphalt use in plant-produced pavements: state of the art. *International Journal of Pavement Engineering*, 16(1), 39–55. Descargado 2025-12-29, de <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10298436.2014.893331> doi: 10.1080/10298436.2014.893331
- Zaumanis, M., Mallick, R. B., y Frank, R. (2014, noviembre). 100% recycled hot mix asphalt: A review and analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 92, 230–245. Descargado 2025-12-26, de <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921344914001505> doi: 10.1016/j.resconrec.2014.07.007
- Zaumanis, M., Mallick, R. B., y Frank, R. (2016). 100% Hot Mix Asphalt Recycling: Challenges and Benefits. *Transportation Research Procedia*, 14, 3493–3502. Descargado de <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352146516303210> doi: 10.1016/j.trpro.2016.05.315
- Zhao, Y., Goulias, D., y Peterson, D. (2021, julio). Recycled Asphalt Pavement Materials in Transport Pavement Infrastructure: Sustainability Analysis & Metrics. *Sustainability*, 13(14), 8071. Descargado 2025-12-10, de <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/14/8071> doi: 10.3390/su13148071

Anexos

Tabla 12: Cálculo del Contenido de Ligante Asfáltico RAP por Extracción Mediante Centrifugación.

| Parámetro / Variable | Valor |
|---|-----------------|
| 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 |
| Cálculo Final | |
| Masa pétreo total (M2 + M3 + M4) [g] (pt) | 2147,19 |
| Contenido de asfalto (% ligante ref. al agregado) (B) | 4,16 |

Fuente: Parraguez Cruz, Sergio Abraham (2025).

Tabla 13: TSR 100 % A.V. - S.R.

| Ensayo TSR - 100% A.V. (N. AC.) | | | | | | | |
|--|-----------------------|---|-----------|-----------|----------|---------|---------|
| Condicion Muestra | | Saturada | | | Seca | | |
| Código de Muestra | Nomenclatura | P1 | P4 | P6 | P2 | P3 | P7 |
| Diameter, mm (in.) | <i>D</i> | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 |
| Thickness, mm (in.) | <i>t</i> | 63.4 | 63.6 | 63.6 | 64.0 | 63.8 | 63.5 |
| Drymass in air | <i>A</i> | 2476.6 | 2479.3 | 2472 | 2462.4 | 2466.3 | 2452.1 |
| SSDmass | <i>B</i> | 2484.8 | 2486 | 2478.1 | 2472.6 | 2474.1 | 2461.8 |
| Mass in water | <i>C</i> | 1398.2 | 1395.6 | 1384.6 | 1375.9 | 1376.0 | 1371.7 |
| Volume (B-C) | <i>E</i> | 1086.6 | 1090.4 | 1093.5 | 1096.7 | 1098.1 | 1090.1 |
| Bulk Sp. Gr. (A/E) ("G") | <i>F</i> | 2.279 | 2.274 | 2.261 | 2.245 | 2.246 | 2.249 |
| Max Sp. Gr. ("DMM") | <i>G</i> | 2.443 | 2.443 | 2.443 | 2.443 | 2.443 | 2.443 |
| % AirVoid (100(G-F)/G) | <i>H</i> | 6.70 | 6.93 | 7.46 | 8.09 | 8.07 | 7.92 |
| Volume AirVoid, HE/100 | <i>I</i> | 72.8 | 75.5 | 81.6 | 88.8 | 88.6 | 86.4 |
| Load, Direct | - | 105 | 99 | 107 | 115 | 118 | 126 |
| Load, N (lbf) | <i>P</i> | 4903 | 4639 | 5001 | 5354 | 5492 | 5855 |
| Saturada por min. @ | | 10 seg a 60 [°C] | | | - | | |
| SSD Mass | <i>B'</i> | 2524 | 2534.8 | 2526.5 | | | |
| Mass in water | <i>C'</i> | 1436 | 1443.9 | 1432.2 | | | |
| Volume (B'-C') | <i>E'</i> | 1088 | 1090.9 | 1094.3 | 0 | 0 | 0 |
| Vol Abs. water (B'-A) | <i>J'</i> | 47.4 | 55.5 | 54.5 | -2462.4 | -2466.3 | -2452.1 |
| % Saturation (100J'/I) | | 65.1 | 73.5 | 66.8 | -2774.3 | -2784.8 | -2838.9 |
| ¿Cumple nivel de saturacion? | | VERDADERO | VERDADERO | VERDADERO | - | - | - |
| % Swell (100(E'-E)/E) | | 0.1 | 0.0 | 0.1 | -100.0 | -100.0 | -100.0 |
| Acondicionada por 24 h a 60°C en agua | | Inicio: 01/07 a las 14:15 probeta (P1; P2; P3), espaciadas cada 7 min. | | | | | |
| Thickness, mm (in.) | <i>t9</i> | 63.5 | 63.3 | 63.6 | | | |
| SSD Mass | <i>B9</i> | 2533.7 | 2540.0 | 2534.8 | | | |
| Mass in water | <i>C9</i> | 1444.6 | 1447.9 | 1439.3 | | | |
| Volume (B9-C9) | <i>E9</i> | 1089.1 | 1092.1 | 1095.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Vol Abs. Water (B9-A) | <i>J9</i> | 57.1 | 60.7 | 62.8 | -2462.4 | -2466.3 | -2452.1 |
| % Saturation, (100J9/I) | | 78.4 | 80.4 | 76.9 | -2774.3 | -2784.8 | -2838.9 |
| ¿Cumple nivel de saturacion? | | No | Si | No | - | - | - |
| % Swell, 100(E9-E)/E | | 0.2 | 0.2 | 0.2 | -100.0 | -100.0 | -100.0 |
| Load, N (lbf) | <i>P9</i> | 4903 | 4639 | 5001 | 5354 | 5492 | 5855 |
| Dry Strength, 2000 P /πtD (2P /π tD) | <i>s^{td}</i> | - | - | - | 355.13 | 365.56 | 391.41 |
| Wet Strength, 2000 P9/πt9D (2P9/π t9D) | <i>stm</i> | 327.61 | 311.21 | 333.91 | - | - | - |
| TSR, 100S _{tm} /S _{td} | | 87.5 | | | | | |
| Visual Moisture Damage | | | | | | | |
| Crack/Break Aggregate | | | | | | | |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14: TSR 50 % RAP - S.R.

| Ensayo TSR - 50 RAP/50 AV - SR | | | | | | | |
|--|-----------------------|---|-----------|-----------|----------|---------|---------|
| Condicion Muestra | | Saturada | | | Seca | | |
| Código de Muestra | Nomenclatura | P1 | P4 | P6 | P2 | P3 | P5 |
| Diameter, mm (in.) | <i>D</i> | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 |
| Thickness, mm (in.) | <i>t</i> | 63.4 | 63.9 | 63.6 | 63.7 | 63.5 | 63.6 |
| Drymass in air | <i>A</i> | 2440.1 | 2479.2 | 2435.1 | 2445.1 | 2448.3 | 2442.3 |
| SSD mass | <i>B</i> | 2448.4 | 2485.1 | 2443.6 | 2452.6 | 2456.7 | 2452.2 |
| Mass in water | <i>C</i> | 1350.3 | 1378.9 | 1349.2 | 1349.2 | 1353.4 | 1347.9 |
| Volume (B-C) | <i>E</i> | 1098.1 | 1106.2 | 1094.4 | 1103.4 | 1103.3 | 1104.3 |
| Bulk Sp. Gr. (A/E) ("G") | <i>F</i> | 2.222 | 2.241 | 2.225 | 2.216 | 2.219 | 2.212 |
| Max Sp. Gr. ("DMM") | <i>G</i> | 2.391 | 2.391 | 2.391 | 2.391 | 2.391 | 2.391 |
| % AirVoid (100(G-F)/G) | <i>H</i> | 7.06 | 6.27 | 6.94 | 7.32 | 7.19 | 7.50 |
| Volume AirVoid, HE/100 | <i>I</i> | 77.6 | 69.3 | 76.0 | 80.8 | 79.3 | 82.8 |
| Load, Direct | - | 86 | 102 | 97 | 162 | 154 | 155 |
| Load, N (lbf) | <i>P</i> | 4050 | 4776 | 4550 | 7482 | 7120 | 7169 |
| Saturada por min. @ | | 8 seg a 60 [°C] | | | - | | |
| SSD Mass | <i>B'</i> | 2498.1 | 2528.3 | 2488.3 | | | |
| Mass in water | <i>C'</i> | 1395.7 | 1421.8 | 1392.8 | | | |
| Volume (B'-C') | <i>E'</i> | 1102.4 | 1106.5 | 1095.5 | 0 | 0 | 0 |
| Vol Abs. water (B'-A) | <i>J'</i> | 58 | 49.1 | 53.2 | -2445.1 | -2448.3 | -2442.3 |
| % Saturation (100J'/I) | | 74.8 | 70.8 | 70.0 | -3027.1 | -3086.0 | -2948.1 |
| ¿Cumple nivel de saturacion? | | VERDADERO | VERDADERO | VERDADERO | - | - | - |
| % Swell (100(E'-E)/E) | | 0.4 | 0.0 | 0.1 | -100.0 | -100.0 | -100.0 |
| Acondicionada por 24 h a 60°C en agua | | Inicio: 04/08 a las 18:00 probeta (P1; P4; P6), espaciadas cada 6 min. | | | | | |
| Thickness, mm (in.) | <i>t9</i> | 63.4 | 63.8 | 63.5 | | | |
| SSD Mass | <i>B9</i> | 2505.8 | 2537.2 | 2498.6 | | | |
| Mass in water | <i>C9</i> | 1404.3 | 1428.9 | 1401.6 | | | |
| Volume (B9-C9) | <i>E9</i> | 1101.5 | 1108.3 | 1097.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Vol Abs. Water (B9-A) | <i>J9</i> | 65.7 | 58.0 | 63.5 | -2445.1 | -2448.3 | -2442.3 |
| % Saturation, (100J9/I) | | 84.7 | 83.7 | 83.6 | -3027.1 | -3086.0 | -2948.1 |
| ¿Cumple nivel de saturacion? | | Si | Si | Si | - | - | - |
| % Swell, 100(E9-E)/E | | 0.3 | 0.2 | 0.2 | -100.0 | -100.0 | -100.0 |
| Load, N (lbf) | <i>P9</i> | 4050 | 4776 | 4550 | 7482 | 7120 | 7169 |
| Dry Strength, 2000 P/πtD (2P/πtD) | <i>S_{td}</i> | - | - | - | 498.72 | 476.05 | 478.31 |
| Wet Strength, 2000 P9/πt9D (2P9/πt9D) | <i>S_{tm}</i> | 270.93 | 317.80 | 304.19 | - | - | - |
| TSR, 100S _{tm} /S _{td} | | 61.5 | | | | | |
| Visual Moisture Damage | | | | | | | |
| Crack/Break Aggregate | | | | | | | |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15: TSR 50 % RAP - 9 % LP.

| Ensayo TSR - 50 RAP/50 AV - 9% LP | | | | | | | |
|--|-----------------------|---|-----------|-----------|---------|---------|---------|
| Condicion Muestra | | Saturada | | | Seca | | |
| Código de Muestra | Nomenclatura | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 |
| Diameter, mm (in.) | D | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 |
| Thickness, mm (in.) | t | 63.9 | 63.6 | 63.7 | 63.7 | 63.6 | 63.8 |
| Drymass in air | A | 2474.4 | 2473.9 | 2466.0 | 2465 | 2474.8 | 2472 |
| SSDmass | B | 2482.1 | 2481.6 | 2475.7 | 2474.7 | 2483.2 | 2480.7 |
| Mass in water | C | 1376.0 | 1373.9 | 1371.5 | 1374.1 | 1380.1 | 1375.0 |
| Volume (B-C) | E | 1106.1 | 1107.7 | 1104.2 | 1100.6 | 1103.1 | 1105.7 |
| Bulk Sp. Gr. (A/E) ("G") | F | 2.237 | 2.233 | 2.233 | 2.240 | 2.243 | 2.236 |
| Max Sp. Gr. ("DMM") | G | 2.389 | 2.389 | 2.389 | 2.389 | 2.389 | 2.389 |
| % AirVoid (100(G-F)/G) | H | 6.36 | 6.51 | 6.52 | 6.25 | 6.09 | 6.42 |
| Volume AirVoid, HE/100 | I | 70.4 | 72.2 | 72.0 | 68.8 | 67.2 | 71.0 |
| Load, Direct | - | 86 | 94 | 91 | 126 | 119 | 116 |
| Load, N (lbf) | P | 4050 | 4413 | 4276 | 5855 | 5541 | 5403 |
| Saturada por min. @ | | 8 seg a 60 [°C] | | | - | | |
| SSD Mass | B' | 2530.0 | 2525.9 | 2517.6 | | | |
| Mass in water | C' | 1424.7 | 1418.1 | 1411.2 | | | |
| Volume (B'-C') | E' | 1105.3 | 1107.8 | 1106.4 | 0 | 0 | 0 |
| Vol Abs. water (B'-A) | J' | 55.6 | 52 | 51.6 | -2465 | -2474.8 | -2472 |
| % Saturation (100J'/I) | | 79.0 | 72.1 | 71.7 | -3583.5 | -3683.5 | -3483.8 |
| ¿Cumple nivel de saturacion? | | VERDADERO | VERDADERO | VERDADERO | - | - | - |
| % Swell (100(E'-E)/E) | | -0.1 | 0.0 | 0.2 | -100.0 | -100.0 | -100.0 |
| Acondicionada por 24 h a 60°C en agua | | Inicio: 07/08 a las 16:51 probeta (P1; P2; P3; P4), espaciadas cada 6 min. | | | | | |
| Thickness, mm (in.) | t9 | 63.5 | 63.8 | 63.8 | | | |
| SSD Mass | B9 | 2537.6 | 2533.9 | 2517.2 | | | |
| Mass in water | C9 | 1429.1 | 1424.9 | 1411.2 | | | |
| Volume (B9-C9) | E9 | 1108.5 | 1109.0 | 1106.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Vol Abs. Water (B9-A) | J9 | 63.2 | 60.0 | 51.2 | -2465.0 | -2474.8 | -2472.0 |
| % Saturation, (100J9/I) | | 89.8 | 83.1 | 71.1 | -3583.5 | -3683.5 | -3483.8 |
| ¿Cumple nivel de saturacion? | | Si | Si | No | - | - | - |
| % Swell, 100(E9-E)/E | | 0.2 | 0.1 | 0.2 | -100.0 | -100.0 | -100.0 |
| Load, N (lbf) | P9 | 4050 | 4413 | 4276 | 5855 | 5541 | 5403 |
| Dry Strength, 2000 P /πtD (2P /π tD) | s_{td} | - | - | - | 390.19 | 369.67 | 359.66 |
| Wet Strength, 2000 P9/πt9D (2P9/π t9D) | s_{tm} | 270.57 | 293.53 | 284.47 | - | - | - |
| TSR, 100S _{tm} /S _{td} | | 75.8 | | | | | |
| Visual Moisture Damage | | | | | | | |
| Crack/Break Aggregate | | | | | | | |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16: TSR 50 % RAP - 15 % LP.

| Ensayo TSR - 50 RAP/50 AV - 15% LP | | | | | | | |
|--|-----------------------|---|-----------|-----------|----------|---------|---------|
| Condicion Muestra | | Saturada | | | Seca | | |
| Código de Muestra | Nomenclatura | P1 | P2 | P3 | P5 | P7 | P8 |
| Diameter, mm (in.) | <i>D</i> | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 |
| Thickness, mm (in.) | <i>t</i> | 63.6 | 63.6 | 63.6 | 63.9 | 63.8 | 63.7 |
| Drymass in air | <i>A</i> | 2453.5 | 2465.4 | 2463.1 | 2456.9 | 2448.1 | 2465.3 |
| SSDmass | <i>B</i> | 2462.7 | 2473.2 | 2471.4 | 2468.2 | 2460 | 2472.4 |
| Mass in water | <i>C</i> | 1364.1 | 1373.6 | 1371.0 | 1368.2 | 1365.3 | 1373.8 |
| Volume (B-C) | <i>E</i> | 1098.6 | 1099.6 | 1100.4 | 1100 | 1094.7 | 1098.6 |
| Bulk Sp. Gr. (A/E) ("G") | <i>F</i> | 2.233 | 2.242 | 2.238 | 2.234 | 2.236 | 2.244 |
| Max Sp. Gr. ("DMM") | <i>G</i> | 2.395 | 2.395 | 2.395 | 2.395 | 2.395 | 2.395 |
| % AirVoid (100(G-F)/G) | <i>H</i> | 6.75 | 6.38 | 6.54 | 6.74 | 6.63 | 6.30 |
| Volume AirVoid, HE/100 | <i>I</i> | 74.2 | 70.2 | 72.0 | 74.2 | 72.5 | 69.2 |
| Load, Direct | - | 71 | 79 | 88 | 102 | 103 | 107 |
| Load, N (lbf) | <i>P</i> | 3673 | 3736 | 4095 | 4776 | 4815 | 5001 |
| Saturada por min. @ | | 8 seg a 60 [°C] | | | - | | |
| SSD Mass | <i>B'</i> | 2505.6 | 2514.4 | 2513.9 | | | |
| Mass in water | <i>C'</i> | 1405.1 | 1415.3 | 1412.1 | | | |
| Volume (B'-C') | <i>E'</i> | 1100.5 | 1099.1 | 1101.8 | 0 | 0 | 0 |
| Vol Abs. water (B'-A) | <i>J'</i> | 52.1 | 49 | 50.8 | -2456.9 | -2448.1 | -2465.3 |
| % Saturation (100J'/I) | | 70.2 | 69.8 | 70.6 | -3313.2 | -3375.3 | -3560.1 |
| ¿Cumple nivel de saturacion? | | VERDADERO | VERDADERO | VERDADERO | - | - | - |
| % Swell (100(E'-E)/E) | | 0.2 | 0.0 | 0.1 | -100.0 | -100.0 | -100.0 |
| Acondicionada por 24 h a 60°C en agua | | Inicio: 07/08 a las 17:15 probeta (P4; P1; P2; P3), espaciadas cada 6 min. | | | | | |
| Thickness, mm (in.) | <i>t9</i> | 63.8 | 63.7 | 63.9 | | | |
| SSD Mass | <i>B9</i> | 2510.6 | 2521.6 | 2523.5 | | | |
| Mass in water | <i>C9</i> | 1409.8 | 1420.8 | 1420.6 | | | |
| Volume (B9-C9) | <i>E9</i> | 1100.8 | 1100.8 | 1102.9 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Vol Abs. Water (B9-A) | <i>J9</i> | 57.1 | 56.2 | 60.4 | -2456.9 | -2448.1 | -2465.3 |
| % Saturation, (100J9/I) | | 77.0 | 80.1 | 83.9 | -3313.2 | -3375.3 | -3560.1 |
| ¿Cumple nivel de saturacion? | | No | Si | Si | - | - | - |
| % Swell, 100(E9-E)/E | | 0.2 | 0.1 | 0.2 | -100.0 | -100.0 | -100.0 |
| Load, N (lbf) | <i>P9</i> | 3673 | 3736 | 4095 | 4776 | 4815 | 5001 |
| Dry Strength, 2000 P /πtD (2P /π tD) | <i>s_{td}</i> | - | - | - | 317.04 | 320.53 | 333.04 |
| Wet Strength, 2000 P9/πt9D (2P9/π t9D) | <i>s_{tm}</i> | 244.50 | 249.01 | 272.13 | - | - | - |
| TSR, 100S _{tm} /S _{td} | | 78.9 | | | | | |
| Visual Moisture Damage | | | | | | | |
| Crack/Break Aggregate | | | | | | | |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 17: TSR 50 % RAP - 21 % LP.

| Ensayo TSR - 50 RAP/50 AV - 21% LP | | | | | | | |
|--|-----------------------|---|-----------|-----------|----------|---------|---------|
| Condicion Muestra | | Saturada | | | Seca | | |
| Código de Muestra | Nomenclatura | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 |
| Diameter, mm (in.) | <i>D</i> | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 |
| Thickness, mm (in.) | <i>t</i> | 63.3 | 63.5 | 63.8 | 63.6 | 63.5 | 63.7 |
| Drymass in air | <i>A</i> | 2430.2 | 2434.7 | 2429.8 | 2441.5 | 2439.3 | 2435.9 |
| SSDmass | <i>B</i> | 2440.1 | 2445.1 | 2440.8 | 2449.3 | 2448.3 | 2444.1 |
| Mass in water | <i>C</i> | 1343.1 | 1345.5 | 1343.0 | 1356.8 | 1356.1 | 1351.0 |
| Volume (B-C) | <i>E</i> | 1097.0 | 1099.6 | 1097.8 | 1092.5 | 1092.2 | 1093.1 |
| Bulk Sp. Gr. (A/E) ("G") | <i>F</i> | 2.215 | 2.214 | 2.213 | 2.235 | 2.233 | 2.228 |
| Max Sp. Gr. ("DMM") | <i>G</i> | 2.383 | 2.383 | 2.383 | 2.383 | 2.383 | 2.383 |
| % AirVoid (100(G-F)/G) | <i>H</i> | 7.04 | 7.08 | 7.12 | 6.22 | 6.28 | 6.49 |
| Volume AirVoid, HE/100 | <i>I</i> | 77.2 | 77.9 | 78.2 | 68.0 | 68.6 | 70.9 |
| Load, Direct | - | 73 | 65 | 66 | 83 | 83 | 84 |
| Load, N (lbf) | <i>P</i> | 3462 | 3099 | 3148 | 3911 | 3911 | 3962 |
| Saturada por min. @ | | 8 seg a 60 [°C] | | | - | | |
| SSD Mass | <i>B'</i> | 2487.0 | 2488.1 | 2487.0 | | | |
| Mass in water | <i>C'</i> | 1388.9 | 1388.1 | 1388.6 | | | |
| Volume (B'-C') | <i>E'</i> | 1098.1 | 1100 | 1098.4 | 0 | 0 | 0 |
| Vol Abs. water (B'-A) | <i>J'</i> | 56.8 | 53.4 | 57.2 | -2441.5 | -2439.3 | -2435.9 |
| % Saturation (100J'/I) | | 73.6 | 68.5 | 73.2 | -3593.0 | -3557.2 | -3435.6 |
| ¿Cumple nivel de saturacion? | | VERDADERO | VERDADERO | VERDADERO | - | - | - |
| % Swell (100(E'-E)/E) | | 0.1 | 0.0 | 0.1 | -100.0 | -100.0 | -100.0 |
| Acondicionada por 24 h a 60°C en agua | | Inicio: 02/09 a las 14:25 probeta (P1; P2; P3; P4), espaciadas cada 6 min. | | | | | |
| Thickness, mm (in.) | <i>t9</i> | 63.7 | 63.6 | 63.7 | | | |
| SSD Mass | <i>B9</i> | 2490.0 | 2494.6 | 2493.9 | | | |
| Mass in water | <i>C9</i> | 1391.3 | 1393.4 | 1393.4 | | | |
| Volume (B9-C9) | <i>E9</i> | 1098.7 | 1101.2 | 1100.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Vol Abs. Water (B9-A) | <i>J9</i> | 59.8 | 59.9 | 64.1 | -2441.5 | -2439.3 | -2435.9 |
| % Saturation, (100J9/I) | | 77.5 | 76.9 | 82.0 | -3593.0 | -3557.2 | -3435.6 |
| ¿Cumple nivel de saturacion? | | No | No | Si | - | - | - |
| % Swell, 100(E9-E)/E | | 0.2 | 0.1 | 0.2 | -100.0 | -100.0 | -100.0 |
| Load, N (lbf) | <i>P9</i> | 3462 | 3099 | 3148 | 3911 | 3911 | 3962 |
| Dry Strength, 2000 P /πtD (2P /π tD) | <i>s_{td}</i> | - | - | - | 261.15 | 261.47 | 264.10 |
| Wet Strength, 2000 P9/πt9D (2P9/π t9D) | <i>s_{tm}</i> | 230.79 | 206.73 | 209.69 | - | - | - |
| TSR, 100S _{tm} /S _{td} | | 82.3 | | | | | |
| Visual Moisture Damage | | | | | | | |
| Crack/Break Aggregate | | | | | | | |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 18: TSR 100 % RAP - S.R.

| Ensayo TSR 100% RAP - 0% LP - N. Ac. | | | | | | | |
|--|-----------------------|---|-------------|-------------|---------|---------|---------|
| Condicion Muestra | | Saturada | | | Seca | | |
| Código de Muestra | Nomenclatura | P1 (N. Ac.) | P2 (N. Ac.) | P3 (N. Ac.) | P1 | P2 | P3 |
| Diameter, mm (in.) | D | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 |
| Thickness, mm (in.) | t | 63.8 | 63.8 | 63.8 | 63.2 | 63.3 | 63.1 |
| Drymass in air | A | 2386.8 | 2393.9 | 2391.3 | 2402.6 | 2398.8 | 2401.1 |
| SSDmass | B | 2399.2 | 2405.4 | 2403.4 | 2415 | 2410.5 | 2411.6 |
| Mass in water | C | 1302.8 | 1308.5 | 1306.8 | 1321.2 | 1315.7 | 1317.9 |
| Volume (B-C) | E | 1096.4 | 1096.9 | 1096.6 | 1093.8 | 1094.8 | 1093.7 |
| Bulk Sp. Gr. (A/E) ("G") | F | 2.177 | 2.182 | 2.181 | 2.197 | 2.191 | 2.195 |
| Max Sp. Gr. ("DMM") | G | 2.342 | 2.342 | 2.342 | 2.342 | 2.342 | 2.342 |
| % AirVoid (100(G-F)/G) | H | 7.0 | 6.8 | 6.9 | 6.2 | 6.4 | 6.3 |
| Volume AirVoid, HE/100 | I | 77.3 | 74.7 | 75.5 | 67.9 | 70.5 | 68.5 |
| Load, Direct | - | 101 | 117 | 119 | 168 | 166 | 157 |
| Load, N (lbf) | P | 4717 | 5452 | 5541 | 7749 | 7659 | 7259 |
| Saturada por min. @ | | 5 seg a 60 [°C] | | | - | | |
| SSD Mass | B' | 2447.5 | 2444.3 | 2441.1 | | | |
| Mass in water | C' | 1350.3 | 1344.8 | 1342.6 | | | |
| Volume (B'-C') | E' | 1097.2 | 1099.5 | 1098.5 | 0 | 0 | 0 |
| Vol Abs. water (B'-A) | J' | 60.7 | 50.4 | 49.8 | -2402.6 | -2398.8 | -2401.1 |
| % Saturation (100/J'/I) | | 78.6 | 67.4 | 65.9 | -3537.2 | -3400.3 | -3507.0 |
| ¿Cumple nivel de saturacion? | | VERDADERO | VERDADERO | VERDADERO | - | - | - |
| % Swell (100(E'-E)/E) | | 0.1 | 0.2 | 0.2 | -100.0 | -100.0 | -100.0 |
| Acondicionada por 24 h a 60°C en agua | | Inicio: 11/08 a las 17:43 probeta (P1; P2; P3), espaciadas cada 7 min. | | | | | |
| Thickness, mm (in.) | t9 | 63.8 | 63.8 | 63.8 | 63.5 | 63.5 | 63.5 |
| SSD Mass | B9 | 2463.7 | 2460.2 | 2453.0 | | | |
| Mass in water | C9 | | | | | | |
| Volume (B9-C9) | E9 | 2463.7 | 2460.2 | 2453.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Vol Abs. Water (B9-A) | J9 | 76.9 | 66.3 | 61.7 | -2402.6 | -2398.8 | -2401.1 |
| % Saturation, (100/J9/I) | | 99.5 | 88.7 | 81.7 | -3537.2 | -3400.3 | -3507.0 |
| ¿Cumple nivel de saturacion? | | Si | Si | Si | - | - | - |
| % Swell, 100(E9-E)/E | | 124.7 | 124.3 | 123.7 | -100.0 | -100.0 | -100.0 |
| Load, N (lbf) | P9 | 4717 | 5452 | 5541 | 7749 | 7659 | 7259 |
| Dry Strength, 2000 P /πtD (2P /π tD) | s_{td} | - | - | - | 520.38 | 513.52 | 488.24 |
| Wet Strength, 2000 P9/πt9D (2P9/π t9D) | s_{tm} | 313.90 | 362.75 | 368.57 | - | - | - |
| TSR, 100S _{tm} /S _{td} | | 68.7 | | | | | |
| Visual Moisture Damage | | | | | | | |
| Crack/Break Aggregate | | | | | | | |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 19: TSR 100 % RAP - 9 % LP.

| Ensayo TSR - 100% RAP - 9% LP | | | | | | | |
|--|-----------------------|--|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Condicion Muestra | | Saturada | | | Seca | | |
| Código de Muestra | Nomenclatura | N1 | N2 | N3 | M1 | M2 | M3 |
| Diameter, mm (in.) | D | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 |
| Thickness, mm (in.) | t | 63.8 | 63.8 | 63.7 | 63.8 | 63.7 | 63.7 |
| Drymass in air | A | 2400 | 2405.5 | 2402.8 | 2402.2 | 2405 | 2404.2 |
| SSDmass | B | 2413.5 | 2419.2 | 2417.4 | 2419.5 | 2418.7 | 2416.0 |
| Mass in water | C | 1323.0 | 1325.5 | 1324.7 | 1326.7 | 1327.4 | 1320.7 |
| Volume (B-C) | E | 1090.5 | 1093.7 | 1092.7 | 1092.8 | 1091.3 | 1095.3 |
| Bulk Sp. Gr. (A/E) ("G") | F | 2.201 | 2.199 | 2.199 | 2.198 | 2.204 | 2.195 |
| Max Sp. Gr. ("DMM") | G | 2.376 | 2.376 | 2.376 | 2.376 | 2.376 | 2.376 |
| % AirVoid (100(G-F)/G) | H | 7.36 | 7.42 | 7.44 | 7.468 | 7.233 | 7.603 |
| Volume AirVoid, HE/100 | I | 80.2 | 81.1 | 81.3 | 81.6 | 78.9 | 83.3 |
| Load, Direct | - | 84 | 78 | 86 | 105 | 99 | 97 |
| Load, N (lbf) | P | 3962 | 3687 | 4050 | 4903 | 4639 | 4550 |
| Saturada por min. @ | | 10 seg a 60 [°C] | | | - | | |
| SSD Mass | B' | 2454.7 | 2465.2 | 2460.2 | | | |
| Mass in water | C' | 1364 | 1371.7 | 1368.3 | | | |
| Volume (B'-C') | E' | 1090.7 | 1093.5 | 1091.9 | 0 | 0 | 0 |
| Vol Abs. water (B'-A) | J' | 54.7 | 59.7 | 57.4 | -2402.2 | -2405 | -2404.2 |
| % Saturation (100J'/I) | | 68.2 | 73.6 | 70.6 | -2943.4 | -3046.9 | -2887.2 |
| ¿Cumple nivel de saturacion? | | VERDADERO | VERDADERO | VERDADERO | - | - | - |
| % Swell (100(E'-E)/E) | | 0.0 | 0.0 | -0.1 | -100.0 | -100.0 | -100.0 |
| Acondicionada por 24 h a 60°C en agua | | Inicio: 26/08 a las 14:19 probeta (N5; N1; N2; N3; N4), espaciada cada 14 min entre | | | | | |
| Thickness, mm (in.) | t9 | 63.9 | 63.9 | 64.1 | | | |
| SSD Mass | B9 | 2466.1 | 2471.2 | 2468.3 | | | |
| Mass in water | C9 | 1373.6 | 1376.7 | 1375.7 | | | |
| Volume (B9-C9) | E9 | 1092.5 | 1094.5 | 1092.6 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Vol Abs. Water (B9-A) | J9 | 66.1 | 65.7 | 65.5 | -2402.2 | -2405.0 | -2404.2 |
| % Saturation, (100J9/I) | | 82.4 | 81.0 | 80.6 | -2943.4 | -3046.9 | -2887.2 |
| ¿Cumple nivel de saturacion? | | Si | Si | Si | - | - | - |
| % Swell, 100(E9-E)/E | | 0.2 | 0.1 | 0.0 | -100.0 | -100.0 | -100.0 |
| Load, N (lbf) | P9 | 3962 | 3687 | 4050 | 4903 | 4639 | 4550 |
| Dry Strength, 2000 P /πtD (2P /π tD) | ^std | - | - | - | 326.33 | 309.00 | 303.06 |
| Wet Strength, 2000 P9/πt9D (2P9/π t9D) | ^stm | 263.11 | 244.89 | 268.36 | - | - | - |
| TSR, 100S _{tm} /S _{td} | | 82.7 | | | | | |
| Visual Moisture Damage | | | | | | | |
| Crack/Break Aggregate | | | | | | | |

Fuente: Leichtle Fernandez, Mathias Rolando (2026).

Tabla 20: TSR 100 % RAP - 15 % LP.

| Ensayo TSR - 100% RAP - 15% LP | | | | | | | |
|--|-----------------------|--|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Condicion Muestra | | Saturada | | | Seca | | |
| Código de Muestra | Nomenclatura | N6 | N7 | N9 | P3 | P4 | P6 |
| Diameter, mm (in.) | <i>D</i> | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 |
| Thickness, mm (in.) | <i>t</i> | 63.9 | 63.7 | 63.8 | 64.1 | 63.8 | 63.9 |
| Drymass in air | <i>A</i> | 2413.3 | 2411.6 | 2405.5 | 2415.5 | 2417.3 | 2419.2 |
| SSDmass | <i>B</i> | 2424.4 | 2422.4 | 2421.9 | 2434 | 2434 | 2434.6 |
| Mass in water | <i>C</i> | 1333.3 | 1331.2 | 1333.1 | 1335.8 | 1334.7 | 1337.6 |
| Volume (B-C) | <i>E</i> | 1091.1 | 1091.2 | 1088.8 | 1098.2 | 1099.3 | 1097 |
| Bulk Sp. Gr. (A/E) ("G") | <i>F</i> | 2.212 | 2.210 | 2.209 | 2.200 | 2.199 | 2.205 |
| Max Sp. Gr. ("DMM") | <i>G</i> | 2.374 | 2.374 | 2.374 | 2.374 | 2.374 | 2.374 |
| % AirVoid (100(G-F)/G) | <i>H</i> | 6.83 | 6.90 | 6.93 | 7.35 | 7.37 | 7.10 |
| Volume AirVoid, HE/100 | <i>I</i> | 74.5 | 75.3 | 75.5 | 80.7 | 81.0 | 77.9 |
| Load, Direct | - | 59 | 62 | 64 | 108 | 99 | 98 |
| Load, N (lbf) | <i>P</i> | 2834 | 2962 | 3060 | 5041 | 4639 | 4590 |
| Saturada por min. @ | | 18 seg a 60 [°C] | | | - | | |
| SSD Mass | <i>B'</i> | 2468.7 | 2465.7 | 2461.2 | | | |
| Mass in water | <i>C'</i> | 1379.1 | 1375.1 | 1374.2 | | | |
| Volume (B'-C') | <i>E'</i> | 1089.6 | 1090.6 | 1087 | 0 | 0 | 0 |
| Vol Abs. water (B'-A) | <i>J'</i> | 55.4 | 54.1 | 55.7 | -2415.5 | -2417.3 | -2419.2 |
| % Saturation (100J'/I) | | 74.3 | 71.8 | 73.8 | -2993.4 | -2983.0 | -3104.1 |
| ¿Cumple nivel de saturacion? | | VERDADERO | VERDADERO | VERDADERO | - | - | - |
| % Swell (100(E'-E)/E) | | -0.1 | -0.1 | -0.2 | -100.0 | -100.0 | -100.0 |
| Acondicionada por 24 h a 60°C en agua | | Inicio: 27/08 a las 17:15 probeta (N10; N6; N7; N8; N9), espaciadas cada 6 min. | | | | | |
| Thickness, mm (in.) | <i>t9</i> | 63.8 | 63.9 | 63.9 | | | |
| SSD Mass | <i>B9</i> | 2475.7 | 2472.2 | 2467.9 | | | |
| Mass in water | <i>C9</i> | 1388.4 | 1385.3 | 1382.6 | | | |
| Volume (B9-C9) | <i>E9</i> | 1087.3 | 1086.9 | 1085.3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Vol Abs. Water (B9-A) | <i>J9</i> | 62.4 | 60.6 | 62.4 | -2415.5 | -2417.3 | -2419.2 |
| % Saturation, (100J9/I) | | 83.7 | 80.4 | 82.6 | -2993.4 | -2983.0 | -3104.1 |
| ¿Cumple nivel de saturacion? | | Si | Si | Si | - | - | - |
| % Swell, 100(E9-E)/E | | -0.3 | -0.4 | -0.3 | -100.0 | -100.0 | -100.0 |
| Load, N (lbf) | <i>P9</i> | 2834 | 2962 | 3060 | 5041 | 4639 | 4590 |
| Dry Strength, 2000 P /πtD (2P /π tD) | <i>s_{td}</i> | - | - | - | 333.90 | 308.77 | 304.85 |
| Wet Strength, 2000 P9/πt9D (2P9/π t9D) | <i>s_{tm}</i> | 188.67 | 196.81 | 203.13 | - | - | - |
| TSR, 100S _{tm} /S _{td} | | 62.1 | | | | | |
| Visual Moisture Damage | | | | | | | |
| Crack/Break Aggregate | | | | | | | |

Fuente: Leichtle Fernandez, Mathias Rolando (2026).

Tabla 21: TSR 100 % RAP - 21 % LP.

| Ensayo TSR - 100% RAP - 21% LP | | | | | | | |
|--|-----------------------|--|-----------|-----------|---------|---------|---------|
| Condicion Muestra | | Saturada | | | Seca | | |
| Código de Muestra | Nomenclatura | N12 | N15 | N18 | O2 | O4 | O5 |
| Diameter, mm (in.) | D | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 |
| Thickness, mm (in.) | t | 63.8 | 63.9 | 63.7 | 63.9 | 63.9 | 63.9 |
| Drymass in air | A | 2419.6 | 2420.0 | 2429.7 | 2412.3 | 2423.7 | 2410.3 |
| SSDmass | B | 2427.4 | 2431.3 | 2436.7 | 2425.1 | 2435.9 | 2423.2 |
| Mass in water | C | 1336.3 | 1338.4 | 1342.3 | 1337.3 | 1343.6 | 1337.0 |
| Volume (B-C) | E | 1091.1 | 1092.9 | 1094.4 | 1087.8 | 1092.3 | 1086.2 |
| Bulk Sp. Gr. (A/E) ("G") | F | 2.218 | 2.214 | 2.220 | 2.218 | 2.219 | 2.219 |
| Max Sp. Gr. ("DMM") | G | 2.368 | 2.368 | 2.368 | 2.368 | 2.368 | 2.368 |
| % AirVoid (100(G-F)/G) | H | 6.35 | 6.49 | 6.24 | 6.35 | 6.30 | 6.29 |
| Volume AirVoid, HE/100 | I | 69.3 | 70.9 | 68.3 | 69.1 | 68.8 | 68.3 |
| Load, Direct | - | 47 | 51 | 44 | 62 | 60 | 68 |
| Load, N (lbf) | P | 2285 | 2471 | 2157 | 2962 | 2873 | 3236 |
| Saturada por min. @ | | 10 seg a 60 [°C] | | | - | | |
| SSD Mass | B' | 2471.5 | 2473.1 | 2475.2 | | | |
| Mass in water | C' | 1382.3 | 1379.4 | 1381.3 | | | |
| Volume (B'-C') | E' | 1089.2 | 1093.7 | 1093.9 | 0 | 0 | 0 |
| Vol Abs. water (B'-A) | J' | 51.9 | 53.1 | 45.5 | -2412.3 | -2423.7 | -2410.3 |
| % Saturation (100J'/I) | | 74.9 | 74.9 | 66.6 | -3491.4 | -3523.9 | -3527.1 |
| ¿Cumple nivel de saturacion? | | VERDADERO | VERDADERO | VERDADERO | - | - | - |
| % Swell (100(E'-E)/E) | | -0.2 | 0.1 | 0.0 | -100.0 | -100.0 | -100.0 |
| Acondicionada por 24 h a 60°C en agua | | Inicio: 02/09 a las 11:07 probeta (N11; N12; N15; N18), espaciadas cada 6 min | | | | | |
| Thickness, mm (in.) | t9 | 63.7 | 63.8 | 63.6 | | | |
| SSD Mass | B9 | 2479.5 | 2480.7 | 2483.0 | | | |
| Mass in water | C9 | 1389.7 | 1386.6 | 1391.0 | | | |
| Volume (B9-C9) | E9 | 1089.8 | 1094.1 | 1092.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Vol Abs. Water (B9-A) | J9 | 59.9 | 60.7 | 53.3 | -2412.3 | -2423.7 | -2410.3 |
| % Saturation, (100J9/I) | | 86.4 | 85.6 | 78.0 | -3491.4 | -3523.9 | -3527.1 |
| ¿Cumple nivel de saturacion? | | Si | Si | No | - | - | - |
| % Swell, 100(E9-E)/E | | -0.1 | 0.1 | -0.2 | -100.0 | -100.0 | -100.0 |
| Load, N (lbf) | P9 | 2285 | 2471 | 2157 | 2962 | 2873 | 3236 |
| Dry Strength, 2000 P /πtD (2P /π tD) | s_{td} | - | - | - | 196.79 | 190.97 | 215.06 |
| Wet Strength, 2000 P9/πt9D (2P9/π t9D) | s_{tm} | 152.16 | 164.36 | 143.86 | - | - | - |
| TSR, 100S _{tm} /S _{td} | | 76.4 | | | | | |
| Visual Moisture Damage | | | | | | | |
| Crack/Break Aggregate | | | | | | | |

Fuente: Leichtle Fernandez, Mathias Rolando (2026).

Tabla 22: Resultados de Prueba de Tukey para Temperatura -10 °C - Ensayo Módulo Dinámico

| Probetas a Comparar | Diferencia de Medias | p-valor | Límite Inferior | Límite Superior | ¿Significativo? |
|----------------------------------|----------------------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| RAP0_Dosis0 vs RAP100_Dosis0 | 1263.9881 | 0.2508 | -437.2984 | 2965.2747 | No |
| RAP0_Dosis0 vs RAP100_Dosis15 | -1167.3429 | 0.3380 | -2868.6295 | 533.9436 | No |
| RAP0_Dosis0 vs RAP100_Dosis21 | 1193.6266 | 0.3126 | -507.6599 | 2894.9132 | No |
| RAP0_Dosis0 vs RAP100_Dosis9 | -421.6174 | 0.9921 | -2122.9039 | 1279.6692 | No |
| RAP0_Dosis0 vs RAP50_Dosis0 | -396.2918 | 0.9947 | -2097.5784 | 1304.9947 | No |
| RAP0_Dosis0 vs RAP50_Dosis15 | -767.7839 | 0.8027 | -2469.0704 | 933.5027 | No |
| RAP0_Dosis0 vs RAP50_Dosis21 | -549.9953 | 0.9608 | -2251.2818 | 1151.2913 | No |
| RAP0_Dosis0 vs RAP50_Dosis9 | -942.7533 | 0.5969 | -2644.0398 | 758.5333 | No |
| RAP100_Dosis0 vs RAP100_Dosis15 | -2431.3311 | 0.0023 | -4132.6176 | -730.0445 | Si |
| RAP100_Dosis0 vs RAP100_Dosis21 | -70.3615 | 1.0000 | -1771.6480 | 1630.9251 | No |
| RAP100_Dosis0 vs RAP100_Dosis9 | -1685.6055 | 0.0532 | -3386.8920 | 15.6811 | No |
| RAP100_Dosis0 vs RAP50_Dosis0 | -1660.2799 | 0.0589 | -3361.5665 | 41.0066 | No |
| RAP100_Dosis0 vs RAP50_Dosis15 | -2031.7720 | 0.0127 | -3733.0585 | -330.4854 | Si |
| RAP100_Dosis0 vs RAP50_Dosis21 | -1813.9834 | 0.0316 | -3515.2699 | -112.6968 | Si |
| RAP100_Dosis0 vs RAP50_Dosis9 | -2206.7414 | 0.0060 | -3908.0279 | -505.4548 | Si |
| RAP100_Dosis15 vs RAP100_Dosis21 | 2360.9696 | 0.0031 | 659.6830 | 4062.2561 | Si |
| RAP100_Dosis15 vs RAP100_Dosis9 | 745.7256 | 0.8250 | -955.5610 | 2447.0121 | No |
| RAP100_Dosis15 vs RAP50_Dosis0 | 771.0511 | 0.7993 | -930.2354 | 2472.3377 | No |
| RAP100_Dosis15 vs RAP50_Dosis15 | 399.5591 | 0.9945 | -1301.7275 | 2100.8456 | No |
| RAP100_Dosis15 vs RAP50_Dosis21 | 617.3477 | 0.9274 | -1083.9389 | 2318.6342 | No |
| RAP100_Dosis15 vs RAP50_Dosis9 | 224.5897 | 0.9999 | -1476.6969 | 1925.8762 | No |
| RAP100_Dosis21 vs RAP100_Dosis9 | -1615.2440 | 0.0704 | -3316.5305 | 86.0426 | No |
| RAP100_Dosis21 vs RAP50_Dosis0 | -1589.9185 | 0.0777 | -3291.2050 | 111.3681 | No |
| RAP100_Dosis21 vs RAP50_Dosis15 | -1961.4105 | 0.0171 | -3662.6970 | -260.1239 | Si |
| RAP100_Dosis21 vs RAP50_Dosis21 | -1743.6219 | 0.0421 | -3444.9084 | -42.3353 | Si |
| RAP100_Dosis21 vs RAP50_Dosis9 | -2136.3799 | 0.0081 | -3837.6664 | -435.0933 | Si |

Continúa en la siguiente página...

Tabla 22 – continuación de la página anterior

| Probetas a Comparar | Diferencia de Medias | p-valor | Límite Inferior | Límite Superior | ¿Significativo? |
|--------------------------------|-----------------------------|----------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| RAP100_Dosis9 vs RAP50_Dosis0 | 25.3255 | 1.0000 | -1675.9610 | 1726.6121 | No |
| RAP100_Dosis9 vs RAP50_Dosis15 | -346.1665 | 0.9979 | -2047.4530 | 1355.1200 | No |
| RAP100_Dosis9 vs RAP50_Dosis21 | -128.3779 | 1.0000 | -1829.6645 | 1572.9086 | No |
| RAP100_Dosis9 vs RAP50_Dosis9 | -521.1359 | 0.9712 | -2222.4224 | 1180.1506 | No |
| RAP50_Dosis0 vs RAP50_Dosis15 | -371.4920 | 0.9966 | -2072.7786 | 1329.7945 | No |
| RAP50_Dosis0 vs RAP50_Dosis21 | -153.7034 | 1.0000 | -1854.9900 | 1547.5831 | No |
| RAP50_Dosis0 vs RAP50_Dosis9 | -546.4614 | 0.9622 | -2247.7480 | 1154.8251 | No |
| RAP50_Dosis15 vs RAP50_Dosis21 | 217.7886 | 0.9999 | -1483.4980 | 1919.0751 | No |
| RAP50_Dosis15 vs RAP50_Dosis9 | -174.9694 | 1.0000 | -1876.2559 | 1526.3171 | No |
| RAP50_Dosis21 vs RAP50_Dosis9 | -392.7580 | 0.9951 | -2094.0445 | 1308.5285 | No |

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 23: Resultados de Prueba de Tukey para Temperatura 4 °C - Ensayo Módulo Dinámico

| Probetas a Comparar | Diferencia de Medias | p-valor | Límite Inferior | Límite Superior | ¿Significativo? |
|----------------------------------|----------------------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| RAP0_Dosis0 vs RAP100_Dosis0 | -1590.5362 | 0.0000 | -2242.4138 | -938.6586 | Si |
| RAP0_Dosis0 vs RAP100_Dosis15 | -1049.7688 | 0.0006 | -1701.6464 | -397.8912 | Si |
| RAP0_Dosis0 vs RAP100_Dosis21 | -2189.9998 | 0.0000 | -2841.8775 | -1538.1222 | Si |
| RAP0_Dosis0 vs RAP100_Dosis9 | -1095.7826 | 0.0004 | -1747.6603 | -443.9050 | Si |
| RAP0_Dosis0 vs RAP50_Dosis0 | -459.6318 | 0.3070 | -1111.5094 | 192.2459 | No |
| RAP0_Dosis0 vs RAP50_Dosis15 | -123.2138 | 0.9987 | -775.0914 | 528.6638 | No |
| RAP0_Dosis0 vs RAP50_Dosis21 | -900.5196 | 0.0033 | -1552.3972 | -248.6420 | Si |
| RAP0_Dosis0 vs RAP50_Dosis9 | -300.7585 | 0.7846 | -952.6362 | 351.1191 | No |
| RAP100_Dosis0 vs RAP100_Dosis15 | 540.7674 | 0.1517 | -111.1102 | 1192.6450 | No |
| RAP100_Dosis0 vs RAP100_Dosis21 | -599.4636 | 0.0857 | -1251.3412 | 52.4140 | No |
| RAP100_Dosis0 vs RAP100_Dosis9 | 494.7536 | 0.2295 | -157.1240 | 1146.6312 | No |
| RAP100_Dosis0 vs RAP50_Dosis0 | 1130.9045 | 0.0003 | 479.0268 | 1782.7821 | Si |
| RAP100_Dosis0 vs RAP50_Dosis15 | 1467.3224 | 0.0000 | 815.4448 | 2119.2001 | Si |
| RAP100_Dosis0 vs RAP50_Dosis21 | 690.0166 | 0.0333 | 38.1390 | 1341.8942 | Si |
| RAP100_Dosis0 vs RAP50_Dosis9 | 1289.7777 | 0.0001 | 637.9000 | 1941.6553 | Si |
| RAP100_Dosis15 vs RAP100_Dosis21 | -1140.2310 | 0.0002 | -1792.1087 | -488.3534 | Si |
| RAP100_Dosis15 vs RAP100_Dosis9 | -46.0138 | 1.0000 | -697.8915 | 605.8638 | No |
| RAP100_Dosis15 vs RAP50_Dosis0 | 590.1370 | 0.0941 | -61.7406 | 1242.0147 | No |
| RAP100_Dosis15 vs RAP50_Dosis15 | 926.5550 | 0.0024 | 274.6774 | 1578.4326 | Si |
| RAP100_Dosis15 vs RAP50_Dosis21 | 149.2492 | 0.9953 | -502.6284 | 801.1268 | No |
| RAP100_Dosis15 vs RAP50_Dosis9 | 749.0103 | 0.0176 | 97.1326 | 1400.8879 | Si |
| RAP100_Dosis21 vs RAP100_Dosis9 | 1094.2172 | 0.0004 | 442.3396 | 1746.0948 | Si |
| RAP100_Dosis21 vs RAP50_Dosis0 | 1730.3681 | 0.0000 | 1078.4905 | 2382.2457 | Si |
| RAP100_Dosis21 vs RAP50_Dosis15 | 2066.7861 | 0.0000 | 1414.9084 | 2718.6637 | Si |
| RAP100_Dosis21 vs RAP50_Dosis21 | 1289.4802 | 0.0001 | 637.6026 | 1941.3579 | Si |
| RAP100_Dosis21 vs RAP50_Dosis9 | 1889.2413 | 0.0000 | 1237.3637 | 2541.1189 | Si |

Continúa en la siguiente página...

Tabla 23 – continuación de la página anterior

| Probetas a Comparar | Diferencia de Medias | p-valor | Límite Inferior | Límite Superior | ¿Significativo? |
|--------------------------------|-----------------------------|----------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| RAP100_Dosis9 vs RAP50_Dosis0 | 636.1509 | 0.0589 | -15.7267 | 1288.0285 | No |
| RAP100_Dosis9 vs RAP50_Dosis15 | 972.5688 | 0.0015 | 320.6912 | 1624.4465 | Si |
| RAP100_Dosis9 vs RAP50_Dosis21 | 195.2630 | 0.9747 | -456.6146 | 847.1407 | No |
| RAP100_Dosis9 vs RAP50_Dosis9 | 795.0241 | 0.0106 | 143.1465 | 1446.9017 | Si |
| RAP50_Dosis0 vs RAP50_Dosis15 | 336.4180 | 0.6770 | -315.4597 | 988.2956 | No |
| RAP50_Dosis0 vs RAP50_Dosis21 | -440.8878 | 0.3549 | -1092.7655 | 210.9898 | No |
| RAP50_Dosis0 vs RAP50_Dosis9 | 158.8732 | 0.9929 | -493.0044 | 810.7508 | No |
| RAP50_Dosis15 vs RAP50_Dosis21 | -777.3058 | 0.0129 | -1429.1834 | -125.4282 | Si |
| RAP50_Dosis15 vs RAP50_Dosis9 | -177.5448 | 0.9857 | -829.4224 | 474.3329 | No |
| RAP50_Dosis21 vs RAP50_Dosis9 | 599.7610 | 0.0855 | -52.1166 | 1251.6387 | No |

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 24: Resultados de Prueba de Tukey para Temperatura 21 °C - Ensayo Módulo Dinámico

| Probetas a Comparar | Diferencia de Medias | p-valor | Límite Inferior | Límite Superior | ¿Significativo? |
|----------------------------------|----------------------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| RAP0_Dosis0 vs RAP100_Dosis0 | -347.4253 | 0.1871 | -784.6958 | 89.8452 | No |
| RAP0_Dosis0 vs RAP100_Dosis15 | -602.7060 | 0.0033 | -1039.9765 | -165.4355 | Si |
| RAP0_Dosis0 vs RAP100_Dosis21 | -808.4962 | 0.0001 | -1245.7667 | -371.2257 | Si |
| RAP0_Dosis0 vs RAP100_Dosis9 | -385.4248 | 0.1098 | -822.6953 | 51.8457 | No |
| RAP0_Dosis0 vs RAP50_Dosis0 | 184.9639 | 0.8497 | -252.3065 | 622.2344 | No |
| RAP0_Dosis0 vs RAP50_Dosis15 | 82.1858 | 0.9988 | -355.0847 | 519.4563 | No |
| RAP0_Dosis0 vs RAP50_Dosis21 | -544.2389 | 0.0088 | -981.5094 | -106.9684 | Si |
| RAP0_Dosis0 vs RAP50_Dosis9 | 67.8456 | 0.9997 | -369.4249 | 505.1161 | No |
| RAP100_Dosis0 vs RAP100_Dosis15 | -255.2807 | 0.5344 | -692.5512 | 181.9898 | No |
| RAP100_Dosis0 vs RAP100_Dosis21 | -461.0709 | 0.0343 | -898.3414 | -23.8004 | Si |
| RAP100_Dosis0 vs RAP100_Dosis9 | -37.9995 | 1.0000 | -475.2700 | 399.2710 | No |
| RAP100_Dosis0 vs RAP50_Dosis0 | 532.3892 | 0.0107 | 95.1188 | 969.6597 | Si |
| RAP100_Dosis0 vs RAP50_Dosis15 | 429.6111 | 0.0563 | -7.6594 | 866.8816 | No |
| RAP100_Dosis0 vs RAP50_Dosis21 | -196.8136 | 0.8048 | -634.0841 | 240.4569 | No |
| RAP100_Dosis0 vs RAP50_Dosis9 | 415.2709 | 0.0703 | -21.9996 | 852.5414 | No |
| RAP100_Dosis15 vs RAP100_Dosis21 | -205.7902 | 0.7674 | -643.0607 | 231.4803 | No |
| RAP100_Dosis15 vs RAP100_Dosis9 | 217.2812 | 0.7161 | -219.9893 | 654.5517 | No |
| RAP100_Dosis15 vs RAP50_Dosis0 | 787.6699 | 0.0002 | 350.3994 | 1224.9404 | Si |
| RAP100_Dosis15 vs RAP50_Dosis15 | 684.8918 | 0.0009 | 247.6213 | 1122.1622 | Si |
| RAP100_Dosis15 vs RAP50_Dosis21 | 58.4671 | 0.9999 | -378.8034 | 495.7375 | No |
| RAP100_Dosis15 vs RAP50_Dosis9 | 670.5516 | 0.0011 | 233.2811 | 1107.8221 | Si |
| RAP100_Dosis21 vs RAP100_Dosis9 | 423.0714 | 0.0623 | -14.1991 | 860.3419 | No |
| RAP100_Dosis21 vs RAP50_Dosis0 | 993.4601 | 0.0000 | 556.1897 | 1430.7306 | Si |
| RAP100_Dosis21 vs RAP50_Dosis15 | 890.6820 | 0.0000 | 453.4115 | 1327.9525 | Si |
| RAP100_Dosis21 vs RAP50_Dosis21 | 264.2573 | 0.4920 | -173.0132 | 701.5278 | No |
| RAP100_Dosis21 vs RAP50_Dosis9 | 876.3418 | 0.0000 | 439.0713 | 1313.6123 | Si |

Continúa en la siguiente página...

Tabla 24 – continuación de la página anterior

| Probetas a Comparar | Diferencia de Medias | p-valor | Límite Inferior | Límite Superior | ¿Significativo? |
|--------------------------------|-----------------------------|----------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| RAP100_Dosis9 vs RAP50_Dosis0 | 570.3888 | 0.0057 | 133.1183 | 1007.6592 | Si |
| RAP100_Dosis9 vs RAP50_Dosis15 | 467.6106 | 0.0309 | 30.3401 | 904.8811 | Si |
| RAP100_Dosis9 vs RAP50_Dosis21 | -158.8141 | 0.9270 | -596.0846 | 278.4564 | No |
| RAP100_Dosis9 vs RAP50_Dosis9 | 453.2704 | 0.0388 | 15.9999 | 890.5409 | Si |
| RAP50_Dosis0 vs RAP50_Dosis15 | -102.7782 | 0.9944 | -540.0486 | 334.4923 | No |
| RAP50_Dosis0 vs RAP50_Dosis21 | -729.2029 | 0.0004 | -1166.4733 | -291.9324 | Si |
| RAP50_Dosis0 vs RAP50_Dosis9 | -117.1183 | 0.9871 | -554.3888 | 320.1522 | No |
| RAP50_Dosis15 vs RAP50_Dosis21 | -626.4247 | 0.0023 | -1063.6952 | -189.1542 | Si |
| RAP50_Dosis15 vs RAP50_Dosis9 | -14.3402 | 1.0000 | -451.6107 | 422.9303 | No |
| RAP50_Dosis21 vs RAP50_Dosis9 | 612.0845 | 0.0029 | 174.8141 | 1049.3550 | Si |

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 25: Resultados de Prueba de Tukey para Temperatura 37 °C - Ensayo Módulo Dinámico

| Probetas a Comparar | Diferencia de Medias | p-valor | Límite Inferior | Límite Superior | ¿Significativo? |
|----------------------------------|----------------------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| RAP0_Dosis0 vs RAP100_Dosis0 | 90.9197 | 0.5887 | -72.0048 | 253.8441 | No |
| RAP0_Dosis0 vs RAP100_Dosis15 | -64.5958 | 0.8880 | -227.5202 | 98.3286 | No |
| RAP0_Dosis0 vs RAP100_Dosis21 | -200.5172 | 0.0097 | -363.4416 | -37.5927 | Si |
| RAP0_Dosis0 vs RAP100_Dosis9 | 35.6208 | 0.9966 | -127.3037 | 198.5452 | No |
| RAP0_Dosis0 vs RAP50_Dosis0 | 80.5200 | 0.7215 | -82.4044 | 243.4445 | No |
| RAP0_Dosis0 vs RAP50_Dosis15 | -11.8883 | 1.0000 | -174.8127 | 151.0362 | No |
| RAP0_Dosis0 vs RAP50_Dosis21 | -80.3584 | 0.7235 | -243.2829 | 82.5660 | No |
| RAP0_Dosis0 vs RAP50_Dosis9 | 221.8965 | 0.0038 | 58.9721 | 384.8210 | Si |
| RAP100_Dosis0 vs RAP100_Dosis15 | -155.5155 | 0.0680 | -318.4399 | 7.4090 | No |
| RAP100_Dosis0 vs RAP100_Dosis21 | -291.4368 | 0.0002 | -454.3613 | -128.5124 | Si |
| RAP100_Dosis0 vs RAP100_Dosis9 | -55.2989 | 0.9488 | -218.2233 | 107.6256 | No |
| RAP100_Dosis0 vs RAP50_Dosis0 | -10.3997 | 1.0000 | -173.3241 | 152.5248 | No |
| RAP100_Dosis0 vs RAP50_Dosis15 | -102.8080 | 0.4387 | -265.7324 | 60.1165 | No |
| RAP100_Dosis0 vs RAP50_Dosis21 | -171.2781 | 0.0351 | -334.2025 | -8.3537 | Si |
| RAP100_Dosis0 vs RAP50_Dosis9 | 130.9768 | 0.1770 | -31.9476 | 293.9013 | No |
| RAP100_Dosis15 vs RAP100_Dosis21 | -135.9214 | 0.1474 | -298.8458 | 27.0031 | No |
| RAP100_Dosis15 vs RAP100_Dosis9 | 100.2166 | 0.4702 | -62.7079 | 263.1410 | No |
| RAP100_Dosis15 vs RAP50_Dosis0 | 145.1158 | 0.1034 | -17.8086 | 308.0403 | No |
| RAP100_Dosis15 vs RAP50_Dosis15 | 52.7075 | 0.9607 | -110.2169 | 215.6319 | No |
| RAP100_Dosis15 vs RAP50_Dosis21 | -15.7626 | 1.0000 | -178.6871 | 147.1618 | No |
| RAP100_Dosis15 vs RAP50_Dosis9 | 286.4923 | 0.0002 | 123.5679 | 449.4168 | Si |
| RAP100_Dosis21 vs RAP100_Dosis9 | 236.1379 | 0.0020 | 73.2135 | 399.0624 | Si |
| RAP100_Dosis21 vs RAP50_Dosis0 | 281.0372 | 0.0003 | 118.1127 | 443.9616 | Si |
| RAP100_Dosis21 vs RAP50_Dosis15 | 188.6289 | 0.0165 | 25.7044 | 351.5533 | Si |
| RAP100_Dosis21 vs RAP50_Dosis21 | 120.1587 | 0.2584 | -42.7657 | 283.0832 | No |
| RAP100_Dosis21 vs RAP50_Dosis9 | 422.4137 | 0.0000 | 259.4892 | 585.3381 | Si |

Continúa en la siguiente página...

Tabla 25 – continuación de la página anterior

| Probetas a Comparar | Diferencia de Medias | p-valor | Límite Inferior | Límite Superior | ¿Significativo? |
|--------------------------------|-----------------------------|----------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| RAP100_Dosis9 vs RAP50_Dosis0 | 44.8992 | 0.9846 | -118.0252 | 207.8237 | No |
| RAP100_Dosis9 vs RAP50_Dosis15 | -47.5091 | 0.9784 | -210.4335 | 115.4154 | No |
| RAP100_Dosis9 vs RAP50_Dosis21 | -115.9792 | 0.2964 | -278.9036 | 46.9452 | No |
| RAP100_Dosis9 vs RAP50_Dosis9 | 186.2757 | 0.0183 | 23.3513 | 349.2002 | Si |
| RAP50_Dosis0 vs RAP50_Dosis15 | -92.4083 | 0.5694 | -255.3327 | 70.5161 | No |
| RAP50_Dosis0 vs RAP50_Dosis21 | -160.8784 | 0.0545 | -323.8029 | 2.0460 | No |
| RAP50_Dosis0 vs RAP50_Dosis9 | 141.3765 | 0.1197 | -21.5479 | 304.3009 | No |
| RAP50_Dosis15 vs RAP50_Dosis21 | -68.4701 | 0.8540 | -231.3946 | 94.4543 | No |
| RAP50_Dosis15 vs RAP50_Dosis9 | 233.7848 | 0.0022 | 70.8604 | 396.7093 | Si |
| RAP50_Dosis21 vs RAP50_Dosis9 | 302.2549 | 0.0001 | 139.3305 | 465.1794 | Si |

Fuente: Elaboración Propia