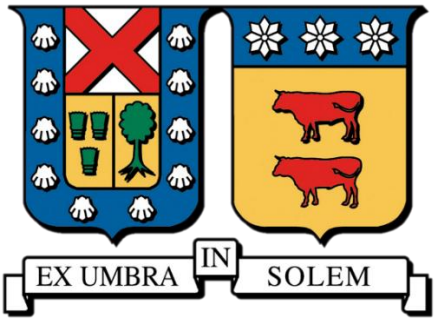
UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAÍSO – CHILE



"ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL ORIGEN DE LOS ÁRIDOS Y LA SATURACIÓN PARCIAL EN LA RESISTENCIA AL DAÑO POR HUMEDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO ENSAYO TSR"

ANDREA ESTEFANI GALLARDO BUCAREI

Memoria para optar al Título de
Constructor Civil

Profesor Guía
FRANCISCO JAVIER REBOLLEDO ORTIZ

Profesor Correferente
RODRIGO ANDRES DELGADILLO STURLA

Agosto 2025

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

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

Título del trabajo: "ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL ORIGEN DE LOS ÁRIDOS Y LA SATURACIÓN PARCIAL EN LA RESISTENCIA AL DAÑO POR HUMEDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO ENSAYO TSR"

Nombre del candidato(a): Andrea Gallardo Bucarei

Carrera / Grado: Construcción Civil

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

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Francisco Rebolledo Ortiz, 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: 08/07/2026 **Firma:**

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 8/7/26 **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.

Resumen

Esta memoria de título evalúa la resistencia a la humedad de mezclas asfálticas en caliente mediante el reemplazo del polvo roca de la mezcla patrón por materiales de distintas regiones de Chile. Se diseñaron tres mezclas: una patrón con áridos de la planta 1, y dos variantes que reemplazan la fracción fina por polvo roca de las plantas 2 y 3, respectivamente, manteniendo el mismo tipo y contenido de asfalto (CA-24).

La resistencia a la humedad se midió mediante el ensayo TSR, siguiendo el Manual de Carreteras (2023), considerando además dos niveles de saturación parcial (55–60 % y 70–75 %) en las probetas húmedas. También se incluyó un estudio petrográfico de los materiales y un análisis del módulo de rigidez.

Los resultados mostraron que el uso de polvo roca de otras plantas mejoró la resistencia al daño por humedad, destacando el material de la planta 2 por su buen desempeño. La mezcla patrón fue la única que no alcanzó el valor mínimo de TSR bajo condiciones extremas de saturación. Aunque el polvo roca de la planta 3 entregó los valores más altos de resistencia a la humedad, su comportamiento se volvió inestable ante saturaciones elevadas y temperaturas mayores.

Palabras clave: TSR, desprendimiento, resistencia a la humedad, saturación parcial, petrografía.

Contenido

Resumen 2

Contenido 3

Introducción 5

Objetivo General 6

Objetivo Específico 1 7

Objetivo Específico 2 7

Objetivo Específico 3 7

Marco Teórico 8

Asfalto 9

Áridos 12

Susceptibilidad al Daño por Humedad 15

Método de Ensaye para Determinar la Resistencia al Daño por Humedad en Mezclas Asfálticas (TSR) 20

Otros Métodos para Medir la Susceptibilidad a la Humedad 21

Metodología 24

Procedimiento 28

Resultados y Análisis 63

Análisis por Nivel de Saturación Parcial 63

Análisis por Desempeño entre Mezclas 65

Evaluación Respecto a la Normativa Vigente 65

Estudio Petrográfico 66

Resultados del Módulo de Rigidez 70

Conclusiones y Recomendaciones 73
Objetivo General 73
Objetivo Específico 1 73
Objetivo Específico 2 74
Objetivo Específico 3 74
Referencias 77
Anexos ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Introducción

A diciembre de 2022 la Red Vial Nacional de Chile cuenta con 88.210,4 km de caminos, de los cuales, 21.796,5 km son caminos pavimentados. En este segmento encontramos que un 85,2% corresponden a pavimentos de asfalto y 9,4% a pavimentos de hormigón (Dirección de Vialidad, 2023). Los pavimentos asfálticos son los preferidos en Chile cuando se trata de dar soluciones a largo plazo, tendencia que sigue en aumento, por lo que adquiere relevancia la identificación y gestión de los deterioros que puedan afectar su desempeño estructural y funcional.

Uno de los deterioros críticos que pueden afectar los pavimentos asfálticos es el daño por humedad, ya que compromete la adherencia entre el ligante y los agregados, y debilita la cohesión interna del ligante. La presencia de agua, en diferentes estados, puede acelerar el daño estructural, especialmente bajo tráfico pesado, afectando el rendimiento mecánico de la mezcla (Brown y otros, 2001).

En Chile, el Manual de Carreteras exige que las mezclas asfálticas de rodadura cumplan con una resistencia mínima al daño por humedad, evaluada mediante el ensayo TSR (Dirección de Vialidad, 2023). El grado de susceptibilidad a la humedad se obtiene como la relación de resistencia a la tracción indirecta entre un conjunto de probetas acondicionadas en humedad y un conjunto acondicionado en seco (Dirección de Vialidad, 2023).

Estudios han demostrado que la composición química de los áridos determina su afinidad con el ligante asfáltico. Los materiales con predominancia silícea tienden a ser ácidos e hidrófilos, lo que dificulta la adherencia con el betún. En cambio, los áridos ricos en óxidos de calcio son más básicos e hidrófobos, favoreciendo la adhesión y reduciendo la susceptibilidad al daño por humedad (Valentín y otros, 2021). Además, debido a la amplia diversidad climática y

geológica que caracteriza al país (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2024), se vuelve aún más importante encontrar la manera de predecir el comportamiento que tendrán los pavimentos frente a la humedad y al tipo de árido que se utilizará en la mezcla.

Las mezclas asfálticas en chile están conformadas generalmente de cuatro tamaños de áridos principales: gravilla ¾", gravilla ½", polvo roca, y Filler (o polvo mineral). Para carpetas de rodadura semidensas, el polvo roca es el que se encuentra en mayor proporción debido a su distribución granulométrica, la cual contiene tamaños intermedios de partículas que permiten una distribución continua de los áridos. Además, tiene la capacidad de rellenar los huecos entre áridos gruesos mejorando la densificación de la mezcla y disminuyendo su permeabilidad. En este caso particular, la mezcla patrón contiene polvo roca y arena como áridos intermedios, ambos serán reemplazados por polvo roca en las mezclas de prueba.

Esta investigación se enfoca en analizar cómo el origen del polvo roca de la mezcla, variando niveles de saturación parcial, afecta la resistencia de las mezclas asfálticas en caliente al daño por humedad. La investigación busca contribuir al desarrollo pavimentos durables en el largo plazo considerando el contexto chileno, donde las condiciones locales varían de región a región.

Objetivo General

Evaluar el impacto del reemplazo de una fracción de áridos, particularmente el Polvo de Roca, en la resistencia al daño por humedad de las mezclas asfálticas. Los áridos a utilizar serán extraídos de tres diferentes plantas de Bitumix ubicadas en la zona centro y centro-sur de Chile.

Objetivo Específico 1

Evaluar a través de ensayos, cómo la variación en el nivel de saturación parcial de las probetas acondicionadas en agua, dentro de los límites permitidos por la norma correspondiente, afecta la resistencia al daño por humedad de las mezclas asfálticas.

Objetivo Específico 2

Caracterizar las propiedades físicas y químicas de los Polvo Roca utilizados, y que provienen de distintas zonas geográficas de Chile.

Objetivo Específico 3

Analizar y comparar los efectos del uso de áridos de distintas zonas geográficas en el desempeño del ensayo TSR.

Marco Teórico

La mezcla asfáltica está compuesta por material pétreo (áridos) recubierto por una película de asfalto. Este conjunto, tras ser sometido a un proceso de compactación, adquiere propiedades que le permiten resistir el desgaste causado por el tránsito vehicular y, al mismo tiempo, distribuir las cargas hacia las capas inferiores del pavimento, absorbiendo una parte significativa de estas solicitaciones.

Previo al diseño de la mezcla todos los materiales constituyentes, agregados y asfalto, deben ser analizados de acuerdo con las respectivas especificaciones, para decidir si son aptos o no para formar parte del pavimento a construir. Una vez realizado esto, el objetivo principal del diseño será encontrar la combinación óptima de agregado-asfalto que le dé a la mezcla las siguientes propiedades (Aphalt Institute, 2020):

Durabilidad: capacidad de la mezcla asfáltica para resistir los efectos perjudiciales del aire, agua, temperatura y tránsito, que pueden provocar envejecimiento del asfalto, desintegración del agregado y desprendimiento de la película de asfalto del agregado. Una buena mezcla asfáltica no debe sufrir envejecimiento excesivo durante la vida en servicio.

Estabilidad: capacidad de la mezcla asfáltica para resistir la deformación y el desplazamiento debidos a las cargas que resultan del tránsito vehicular. Un pavimento es estable cuando conserva su forma; y es inestable cuando desarrolla deformaciones permanentes, corrugaciones y otros signos de desplazamiento de la mezcla.

Impermeabilidad: es la resistencia al paso de agua y aire hacia el interior, o a través de la mezcla asfáltica. La resistencia al daño por humedad se relaciona con las propiedades químicas

del agregado mineral y el contenido de vacíos de aire en la mezcla compactada, y por tanto con los procesos de oxidación del asfalto, su adherencia y el drenaje del pavimento.

Trabajabilidad: es la propiedad relacionada con la facilidad con que la mezcla asfáltica es colocada y compactada en obra. La mezcla debe permitir su colocación y compactación sin que se requiera un esfuerzo demasiado grande. Esta propiedad, generalmente depende de una combinación de los siguientes factores: características del agregado, la granulometría, el contenido, y la viscosidad del asfalto.

Resistencia a la fatiga: es la capacidad de la mezcla asfáltica para resistir cargas repetidas causadas por el paso de los vehículos. Esta característica está relacionada con el tipo y contenido de asfalto, ya que, si este está envejecido o endurecido, aumentará la rigidez de la mezcla asfáltica haciéndola menos resistente a la fatiga.

Flexibilidad: es la capacidad de la mezcla asfáltica para amoldarse, sin sufrir agrietamiento o fisuración, a los asentamientos y movimientos graduales de la base y la subrasante.

Para garantizar estas propiedades, es necesario caracterizar cada uno de los componentes de la mezcla asfáltica, en este caso el asfalto y los áridos, sin perjuicio de que en muchas ocasiones es necesario incorporar aditivos para mejorar una o varias propiedades de la mezcla. A continuación, se definirán las principales características de estos materiales.

Asfalto

El asfalto es un material cementoso negro, termoplástico, cuya viscosidad varía con los cambios de temperatura. A temperatura ambiente, puede ser sólido o semisólido. Al calentarse, se vuelve menos viscoso, lo que permite recubrir las partículas de áridos en la producción de la

mezcla. Los cementos asfálticos se designan con las letras “CA” y son asfaltos refinados o una combinación de asfalto refinado y aceite fluidificante proveniente de la destilación del crudo de petróleo y que otorga la consistencia apropiada para trabajos de pavimentación.

Existen diferentes maneras de clasificar un cemento asfáltico: por grado de viscosidad original, por grado de penetración, por grado de viscosidad del residuo, y por grado de desempeño PG (Laboratorio Nacional de Vialidad, Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas, 2000). Para la realización de esta investigación se utilizó cemento asfáltico CA-24, clasificado según grado de viscosidad original a 60 °C, usando viscosímetro rotacional. En la Tabla 1 podemos ver las especificaciones que debe cumplir este asfalto.

Tabla 1

Especificaciones para los Cementos Asfálticos Según Grado de Viscosidad Original (Dirección de Vialidad, 2023).

Ensayes	CA-24	CA-14
Viscosidad Original a 60°C, poises.	Min. 2400	Min. 1400
Penetración, 25°C, 100 g, 5 s, 0,1 mm	Mín. 40	Mín. 40
Ductilidad, 25°C, 5 cm/min, cm	Mín. 100	Mín. 100
Ensaye de la Mancha (% xilol)	Máx. 30%	Máx. 30%
Solubilidad en Tricloroetileno, %	Mín. 99	Mín. 99
Punto de Inflamación, °C	Mín. 232	Mín. 232
Punto de Ablandamiento, °C	Informar	Informar
Índice de Penetración	-2,0 a +1,0	-2,0 a +1,0
Película Delgada Rotatoria		

– Pérdida por Calentamiento (%)	Máx. 0,8	Máx. 0,8
– Viscosidad PDR a 60°C, poises	Informar	Informar
– Ductilidad, 25°C, 5 cm/min, cm	Mín. 100	Mín. 100
Índice de Durabilidad	Máx. 4	Máx. 4

Ensayos de Caracterización

Viscosidad mediante viscosímetro rotacional: mide la resistencia del asfalto al flujo a temperaturas de aplicación. Se calcula la viscosidad midiendo el torque necesario para girar un vástago en la muestra.

Ensayo de penetración: evalúa la dureza del asfalto midiendo cuán profundo penetra una aguja estándar bajo condiciones controladas. Un mayor valor indica una consistencia más blanda. El valor de penetración es el promedio de tres mediciones.

Ensayo de ductilidad: determina la capacidad del asfalto para alargarse sin romperse. Se mide la longitud que alcanza una briqueta estirada a una velocidad y temperatura estándar.

Ensayo de la mancha: establece la proporción de asfaltenos (insolubles en n-heptano) y maltenos (solubles en ambos disolventes) en el ligante. Usa una mezcla de xilol y n-heptano para medir la solubilidad diferencial.

Solubilidad en tricloroetileno: determina la pureza del cemento asfáltico. Lo soluble corresponde a los compuestos cementantes; lo insoluble, a impurezas. Se cuantifica tras filtrar una mezcla diluida con tricloroetileno.

Punto de inflamación: determina la temperatura mínima en que los vapores del asfalto se encienden al contacto con una llama. Se calienta gradualmente la muestra y se aplica fuego de prueba para registrar el momento de ignición.

Punto de ablandamiento (anillo y bola): establece la temperatura en que el asfalto cambia de estado semisólido a líquido. Una bola de acero induce la deformación de una muestra suspendida, midiendo la temperatura necesaria para que descienda 25 mm.

Índice de penetración (IP): evalúa la sensibilidad térmica del ligante asfáltico integrando datos de penetración, ablandamiento,

Horno de película delgada rotatoria (RTFOT): simula el envejecimiento primario del asfalto por acción de calor y aire durante el mezclado en planta. Genera un residuo para ensayos posteriores. El contenido de volátiles no debe exceder el 0,8%.

Índice de durabilidad: compara la viscosidad a 60 °C del asfalto antes y después de RTFOT. Cuanto menor sea la variación, mayor será la durabilidad del ligante frente al envejecimiento.

Áridos

Los áridos son materiales minerales inertes utilizados en la fabricación de mezclas asfálticas. Los más comunes son la arena, grava, piedra triturada, escoria y polvo de roca. Los áridos constituyen el 90-95% en peso y el 80-85% en volumen de la mayoría de las mezclas asfálticas. Debido a que este material proporciona la mayor parte de las características de soporte de carga en un pavimento flexible, el rendimiento del pavimento está muy influenciado por la elección de un árido adecuado para cada tipo de solicitación (Aphalt Institute, 2020). A

continuación, en la Tabla 2, Tabla 3 y Tabla 4 se detallan las especificaciones correspondientes a los áridos gruesos, áridos finos y a la combinación de ambos en la mezcla.

Tabla 2

Requisitos Para la Fracción Gruesa[1] de los Árido (Dirección de Vialidad, 2023).

Ensaye	Rodadura	Intermedia	Base gruesa	Base Abierta	Método
Partículas Chancadas (mín.)	90%	70%	60%	90%	8.202.6
Partículas Lajeadas (máx.)	10%	15%	15%	10%	8.202.6
Desgaste Los Ángeles (máx.)	25%	35%	35%	30%	8.202.11

[1] corresponde a la fracción retenida en el tamiz 2,5 mm (ASTM N°8).

Tabla 3

Requisitos para la Fracción Fina[1] de los Áridos (Dirección de Vialidad, 2023).

Ensaye	Rodadura	Intermedia	Base gruesa	Base Abierta	Método
Índice de Plasticidad	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	8.102.4
Adherencia Riedel-Weber (mín.)	0-5	0-5	0-5	0-5	8.302.30
Desintegración por Sulfato de Sodio (máx.)	15%	15%	15%	15%	8.202.17

[1] corresponde a la fracción que pasa por el tamiz 2,5 mm (ASTM N°8).

Tabla 4.

Requisitos para Áridos Combinados (Dirección de Vialidad, 2023).

Ensaye	Rodadura	Intermedia	Base gruesa	Base Abierta	Método
Sales Solubles (máx.)	2%	3%	3%	3%	8.202.14
Equivalente de Arena (mín.)	50%	45%	40%	50%	8.202.9

Ensayos de Caracterización

Granulometría: describe cómo se distribuyen los tamaños de partículas en un árido, expresado en porcentaje respecto a su masa seca. Se determina mediante el tamizado de una

muestra conocida, calculando el porcentaje retenido en cada tamiz. Las mezclas deben ajustarse a bandas granulométricas específicas: densa, semidensa, gruesa, fina o abierta.

Densidad aparente: se determina midiendo el peso del árido contenido en un volumen conocido, incluyendo los espacios vacíos entre las partículas.

Densidad real seca: densidad en que se considera solo la masa del pétreo seco, es decir, sin incluir la masa del agua que llena los poros accesibles.

Densidad neta: se calcula considerando el volumen macizo de las partículas de material pétreo más el volumen de los poros inaccesibles.

Partículas chancadas: determina el porcentaje de partículas con al menos dos caras fracturadas mediante métodos mecánicos, utilizadas para mejorar la adherencia en mezclas.

Partículas lajeadas: cuantifica las partículas planas y alargadas, considerando como lajas aquellas cuya relación entre dimensiones máxima y mínima supera el valor de 5.

Índice de lajas: calcula el porcentaje en peso de partículas cuyo espesor es menor a 0,6 veces la dimensión media del agregado analizado.

Desgaste Los Ángeles: evalúa la resistencia al desgaste por abrasión de los áridos en un tambor giratorio, obteniendo el porcentaje de pérdida de masa de la muestra.

Índice de plasticidad: diferencia entre límite líquido y plástico. Si no hay cohesión ni plasticidad en el árido, se clasifica como No Plástico (N.P.).

Sales solubles: se mide la cantidad de sales presentes en el árido tras lavarlo con agua destilada caliente y aplicar reactivos químicos que detectan precipitados.

Adherencia – método estático: evalúa la retención del recubrimiento asfáltico sobre agregados tras inmersión prolongada en agua. Se reporta si el área cubierta es mayor o menor al 95%.

Adherencia – método dinámico: mide la pérdida de recubrimiento asfáltico luego de curado térmico y agitación en agua. Se clasifica la adherencia como buena (≥ 95%) o regular (> 75% y < 95%).

Equivalente de arena: determina la proporción de arena limpia respecto a impurezas presentes. Indica la calidad del árido fino frente a contaminantes como arcilla u orgánicos.

Densidad real seca ponderada: calcula la densidad promedio de una mezcla con agregados múltiples, ponderando por el peso de cada componente en la fórmula total.

Densidad efectiva: corresponde a la densidad de los agregados considerando el volumen de los poros no ocupados por el asfalto.

Absorción de asfalto: representa el porcentaje de ligante retenido por los agregados. Este valor permite estimar la cantidad total de asfalto necesaria en la mezcla para lograr una adecuada adhesión entre el asfalto y el agregado.

Susceptibilidad al Daño por Humedad

La susceptibilidad al daño por humedad en pavimentos asfálticos se refiere a la capacidad de la mezcla para resistir los efectos negativos provocados por la presencia de agua, ya sea en estado líquido, gaseoso (vapor) o sólido (congelamiento). Este fenómeno representa una de las principales preocupaciones en el ámbito de la ingeniería vial, debido a que la humedad incide directamente en las propiedades mecánicas del material, debilitando su estructura y acelerando procesos de deterioro severo. La infiltración de agua en la mezcla asfáltica suele generar pérdida

de adherencia en la zona de contacto entre el ligante y los áridos, así como una disminución de la cohesión interna del ligante. Estos fallos también pueden producirse por la combinación de la humedad y el paso de altas cargas de tránsito. (Brown y otros, 2001).

La humedad puede interactuar con el ligante asfáltico y disminuir su cohesión, lo que reduce la rigidez y resistencia mecánica de la mezcla. Posteriormente, el agua puede infiltrarse en la interfaz entre el agregado y el ligante, debilitando el vínculo adhesivo y provocando el desprendimiento de las partículas del agregado. Este fenómeno ocurre con frecuencia porque la superficie del árido posee una mayor afinidad por el agua que por el ligante asfáltico, facilitando así la separación entre ambos materiales (Hicks, 1991).

Existen diferentes mecanismos de unión entre el asfalto y el agregado. Entre ellos encontramos la unión mecánica, que consiste en el entrelazamiento que se produce cuando el betún caliente entra en los poros y huecos de aire, y cubre las irregularidades de la superficie del árido, generando, al enfriarse, las fuerzas mecánicas (McBain & Hopkins, 1925). Debido a esto es que las características superficiales de los áridos, como una mayor cantidad de poros y textura rugosa con angularidad, dan lugar a un fuerte entrelazamiento mecánico (Kiggundu & Roberts, 1988).

También se ha estudiado la unión química, que se refiere a la reacción química entre los grupos funcionales activos del asfalto y los sitios activos de la superficie de los áridos. Debido a la variación de sus componentes, el tipo de asfalto y agregado son relevantes en la formación de este tipo de unión (Curtis y otros, 1993). Cuando el asfalto se mezcla con los áridos, los grupos químicos que contienen oxígeno, presentes en los asfaltenos del asfalto, tienden a adherirse primero a la superficie de los áridos (Scott, 1978). Entre los componentes del asfalto, los ácidos carboxílicos y sulfóxidos son mejor adsorbidos por todos los tipos de áridos, pero a la vez, son

los más fáciles de desplazar en presencia de agua. En cambio, las cetonas y los compuestos de nitrógeno se adsorben menos, pero resisten mejor las condiciones de humedad (Plancher y otros, 1977).

La forma en que el asfalto se adhiere o se desprende del árido está influenciada tanto por su composición química como por las propiedades químicas y superficiales del propio agregado (Curtis y otros, 1993). Los áridos no son iguales entre sí, están compuestos por uno o varios minerales, y cada uno con una composición química distinta (Tarbuck y otros, 2005). En su superficie, los áridos tienen sitios polares, zonas con carga eléctrica que pueden atraer sustancias que también tienen carga, como las moléculas orgánicas del asfalto (ej.: asfaltenos y resinas), agua y contaminantes. Las superficies químicas de los áridos pueden tener distintos elementos que influyen en cómo se une el betún a estos. Elementos como el aluminio, hierro, magnesio y calcio tienden a generar una fuerte adhesión con el betún (Jamieson y otros, 1995). Sin embargo, estas uniones se verán debilitadas ante la presencia de contaminantes en la superficie del agregado como polvo y materia orgánica (Hefer y otros, 2005). Además, dependiendo del pH del agua que entre en contacto con la superficie del árido provocará la disolución de las capas superficiales de estos: en carbonatos se producirá con niveles de pH inferiores a 6 (ácido), y en el caso de áridos silíceos se producirá con valores de pH superiores a 8 (alcalino) (Jamieson y otros, 1995).

El asfalto es un material de naturaleza ácida. El índice de acidez del asfalto es una medida de la cantidad de compuestos ácidos presentes en el asfalto y se expresa como la cantidad de hidróxido de potasio (mg KOH) que hay que añadir a 1 g de asfalto para neutralizar sus constituyentes ácidos libres. Este índice refleja la acidez natural del asfalto, determinada por el

tipo de crudo y su refinación. Los asfaltos nafténicos suelen ser más ácidos que los parafínicos (Asphalt Institute, 2007).

Otro enfoque utilizado para explicar la adhesión entre estos materiales establece que al ponerse en contacto el asfalto con el árido, se generan fuerzas intermoleculares en la interfaz, como Van der Waals y ácido-base de Lewis, cuya magnitud se puede calcular usando las energías libres superficiales de cada material (Schultz & Nardin, 1999). De este modo, un árido de naturaleza básica y un asfalto de naturaleza ácida generarán una fuerte adhesión entre sus moléculas (Bhasin, 2007). Sin embargo, estudios advierten que el agua, por tener menor viscosidad y tensión superficial, puede adherirse con mayor facilidad a la superficie del árido que el asfalto, desplazándolo y reduciendo la efectividad de la adhesión en ambientes húmedos (Hicks, 1991).

Existen cinco mecanismos que pueden provocar la pérdida de adhesión y/o cohesión entre el asfalto y el árido. El desprendimiento es uno de ellos y ocurre cuando el betún que recubre los áridos del pavimento se separa sin romperse visiblemente, debido a la presencia de una fina capa de agua. Esta reduce la fuerza con la que el betún se adhiere al árido, ya que se une más fácilmente gracias a su tensión superficial más baja y su alta polaridad. En cambio, el betún tiene poca polaridad y sus moléculas grandes se unen débilmente a la superficie del árido. Como resultado, el agua termina desplazando al betún, provocando una pérdida de adhesión que puede afectar la durabilidad del pavimento (Tarrer & Wagh, 1991).

Luego tenemos el desplazamiento, que se produce cuando el agua logra penetrar hasta la superficie del árido porque la capa de betún que lo recubre está dañada o es incompleta. Esto puede pasar si el agregado tiene bordes afilados que rompen el recubrimiento con el paso de los vehículos, o si hay aire atrapado por la presencia de polvo, lo que dificulta una cobertura

uniforme. Al ingresar el agua por esas zonas vulnerables, se rompe la adherencia y el betún se desplaza (Fromm, 1974).

Otro mecanismo que puede provocar la separación entre el ligante y el árido es la emulsificación espontánea. Esto ocurre cuando el agua o humedad se mezcla con el asfalto, formando una emulsión invertida donde el agua está dispersa dentro del betún. Esto provoca que las partículas de asfalto se separen entre sí, provocando la falla interna del material o también llamada falla de cohesión. Si la emulsión llega a la superficie del árido, esto provocará la falla de adhesión entre el asfalto y el árido. Este fenómeno es más común cuando el asfalto permanece mucho tiempo en contacto con agua, especialmente si contiene ciertos aditivos o partículas finas como arcillas que aceleran el proceso de emulsificación (Fromm, 1974).

Estudios hablan de la presión interporosa (o intersticial) como otro mecanismo que induce la separación entre el ligante y el árido en las mezclas asfálticas. Esto ocurre cuando el agua atrapada en los poros genera esfuerzos internos bajo cargas repetidas del tráfico. En un rango crítico de vacíos de aire en la mezcla compactada (8 % - 10 %), el agua entra, pero no puede salir fácilmente. La densificación de la mezcla bajo carga (del tránsito) desconecta los poros y retiene la humedad, que se comprime con cada paso vehicular, causando presiones cíclicas. Además, los ciclos de congelamiento y descongelamiento expanden y contraen el agua, amplificando el deterioro. Este proceso debilita la cohesión y adhesión interna, generando microfisuras en la mezcla asfáltica y acelerando el daño por humedad en el pavimento (Terrel & Al-Swailmi, 1994).

También se ha estudiado la erosión hidráulica, que ocurre cuando los vehículos circulan sobre pavimentos mojados, presionando el agua hacia los huecos superficiales, lo que luego genera su absorción dentro del pavimento. Esta acción repetida provoca ciclos de compresión y

tensión que debilitan el ligante asfáltico y favorecen el desprendimiento. Se ve agravado por la presencia de arcilla o limo, que actúan como abrasivos (Terrel & Al-Swailmi, 1994).

La evaluación de distintos tipos de polvo roca según su origen geográfico resulta relevante, ya que sus características mineralógicas y químicas influyen directamente en la interacción con el ligante asfáltico. Estas variaciones pueden afectar la formación de enlaces físicos, químicos e intermoleculares en la mezcla, condicionando su resistencia frente al daño por humedad. Algunos minerales poseen mayor afinidad por el agua que por el ligante, lo que facilita su separación en condiciones húmedas. En este sentido, la comparación entre los distintos polvos roca, permite identificar cuál de ellos ofrece mejores condiciones de adherencia frente a la presencia de humedad.

Método de Ensaye para Determinar la Resistencia al Daño por Humedad en Mezclas Asfálticas (TSR)

La reglamentación vigente en Chile para mezclas asfálticas en caliente contempla una serie de requisitos para carpetas, capas intermedias y bases asfálticas. Entre estos se establece que la relación de resistencia a la tracción (Tensile Strength Ratio) en carpetas asfálticas de rodadura debe ser superior al 75% (Dirección de Vialidad, 2023). Este método, presente en el Volumen 8 del Manual de Carreteras, es una adaptación de la norma ASTM D4867/4867M-09.

Para simular la compactación en obra, se preparan al menos seis muestras de mezcla asfáltica compactadas hasta alcanzar un 7,0 ± 1% de huecos de aire. Estas se dividen en dos subconjuntos con promedios equivalentes de vacíos: uno permanece seco, mientras que el otro se satura parcialmente con agua. Posteriormente, las muestras húmedas se sumergen en agua a 60 ± 1°C durante 24 horas. Antes del ensayo, ambos subconjuntos se estabilizan a una temperatura de 25 °C. Luego, se someten a una prueba de resistencia a la tracción indirecta, y se calcula la

relación entre la resistencia media del subconjunto húmedo y la del seco, conocida como TSR (Relación de Resistencia a la Tracción).

El nivel de saturación parcial de las probetas húmedas es relevante en la evaluación del comportamiento de las mezclas asfálticas frente al daño por humedad. Al aumentar el nivel de saturación, se reproducen condiciones más exigentes que permiten poner a prueba la capacidad real de cada diseño para resistir la pérdida de cohesión y adherencia. En esta investigación, se ensayarán probetas con niveles de saturación comprendidos entre el 55 % y el 60 %, así como entre el 70 % y el 75 %, con el objetivo de analizar el efecto que tiene una mayor o menor saturación en los pavimentos asfálticos.

Otros Métodos para Medir la Susceptibilidad a la Humedad

Los métodos para medir la susceptibilidad al daño por humedad se pueden dividir en dos grupos, los cualitativos y los cuantitativos. Los primeros se llevan a cabo generalmente sobre mezclas sueltas y no son capaces de tomar en cuenta factores como la acción del tráfico y propiedades mecánicas de las mezclas, por lo que su interpretación tiende a ser subjetiva. Por otro lado, los métodos cuantitativos sí toman en cuenta propiedades de la mezcla y el tráfico, al ensayarse sobre mezclas compactadas. A continuación, un breve resumen de los métodos cuantitativos más utilizados.

Ensayo de Lottman

Se compactan nueve probetas y se dividen en tres grupos. El primer grupo se mantiene sin acondicionamiento (grupo de control), el segundo es saturado con agua por 30 minutos y el tercero es saturado y sometido a congelamiento a -18 °C durante 16 horas, para luego ser descongelados y acondicionados a 60°C por 24 horas. La resistencia al daño por humedad se

calcula como la razón entre resistencia de los especímenes acondicionados y de control (AASHTO T 165, 2006).

Ensayo de Lottman Modificado

Su procedimiento es similar al Ensayo de Lottman. Se preparan al menos 6 muestras de mezcla asfáltica, que luego de ser mezcladas (en estado suelto), se deben curar por 16 horas a 60°C, para luego ser envejecidas por 2 horas a 135°C. Luego son compactadas a un contenido de vacíos entre 6,5% a 7,5%. Se dividen en dos grupos; el primero se mantiene en estado seco (grupo de control) y el segundo se satura hasta alcanzar entre un 70%-80% de saturación, para luego ser acondicionado a -18°C por 16 horas. Posteriormente son acondicionados a 60°C por 24 horas. Finalmente, los dos grupos se acondicionan a 25°C y son sometido a tracción indirecta. El cálculo se obtiene de la razón entre la resistencia del grupo saturado y acondicionado respecto al grupo de control (AASHTO T 283, 2011).

Ensayo Rueda de Carga de Hamburgo

Este ensayo permite evaluar tanto el daño por humedad como la deformación permanente de probetas de mezcla asfáltica en caliente. Se confeccionan probetas cilíndricas de 150 mm de diámetro y 62 mm de alto, compactadas hasta alcanzar un 7±1% de contenido de vacíos. Se ensayan 4 probetas, dos en condición seca y dos en condición húmeda. Estas se someten al paso repetido de una rueda metálica oscilante sobre su superficie hasta alcanzar 20.000 ciclos de carga o hasta alcanzar una deformación de 20 mm (AASHTO T 324, 2023).

Ensayo Tunnicliff-Root

Ensayo en el cual está basado el método usado en esta investigación. Su particularidad respecto a los ensayos Lottman y Lottman Modificado es que no requiere de un ciclo de

congelamiento previo, requiere saturar el subconjunto húmedo por 24 horas a 60°C y exige un TSR mínimo de 75% (ASTM D4867, 2014).

Metodología

Para la realización de esta investigación se fabricaron tres mezclas asfálticas en caliente compuestas por cemento asfáltico CA-24, suministrado por la empresa Productos Bituminosos S.A. (Probisa), y agregados pétreos provenientes de tres plantas de la empresa Bitumix S.A., ubicadas en la zona centro-sur de Chile. Los áridos empleados en el estudio provienen de depósitos fluviales y son sometidos a procesos de chancado con el fin de optimizar sus propiedades físicas.

El procedimiento experimental se desarrolló conforme a las especificaciones establecidas en el Volumen 8 del Manual de Carreteras (versión 2023), con el objetivo de evaluar la resistencia al daño por humedad de las mezclas con distinto polvo roca y considerando, además, la influencia de distintos niveles de saturación parcial.

La mezcla patrón fue diseñada siguiendo las especificaciones del Método Marshall, a través del cual se determinó el contenido óptimo de asfalto que garantiza los valores requeridos de estabilidad, fluencia, vacíos en el agregado mineral (VAM), porcentaje de huecos y densidad.

Posteriormente, se prepararon tres mezclas, cada uno con el contenido de asfalto óptimo obtenido por Método Marshall y el reemplazo de polvo roca correspondiente a cada planta. Estas mezclas se compactaron con distinto número de golpes del martillo Marshall con el objetivo de determinar la cantidad de golpes por cara que garantizará un 7±1% de vacíos en cada mezcla, tal como lo exige el procedimiento del ensayo TSR descrito en la sección 8.302.6 del Volumen 8 del Manual de Carreteras (versión 2023).

Obtenido el número de golpes por cara para cada una de las tres mezclas, se preparan tres conjuntos de probetas con el contenido óptimo de asfalto y número de golpes por cara respectivo

a cada mezcla con polvo roca diferente. Cada conjunto fue dividido en dos subconjuntos: uno que se acondicionará en seco (grupo de control) y otro que se acondicionará en agua. Este último, a su vez, se subdividió en dos grupos que se someterán a diferentes niveles de saturación parcial: uno entre 55–60% y otro entre 70–75%, logrados mediante el control del vacío aplicado.

Finalmente, se determinó la resistencia a la tracción indirecta de cada subconjunto utilizando la prensa Marshall. Con estos valores se calculó el índice de resistencia a la humedad (TSR), mediante la relación entre el promedio de resistencia en estado húmedo y la resistencia en estado seco de cada conjunto, expresada como porcentaje:

$$TSR = \left(\frac{Resistencia\ Húmeda}{Resistencia\ Seca}\right) * 100$$

A continuación, en la Figura 1, podemos observar gráficamente el procedimiento general que se siguió para la realización de esta investigación. Y luego, en la Figura 2, podemos ver la metodología general del informe.

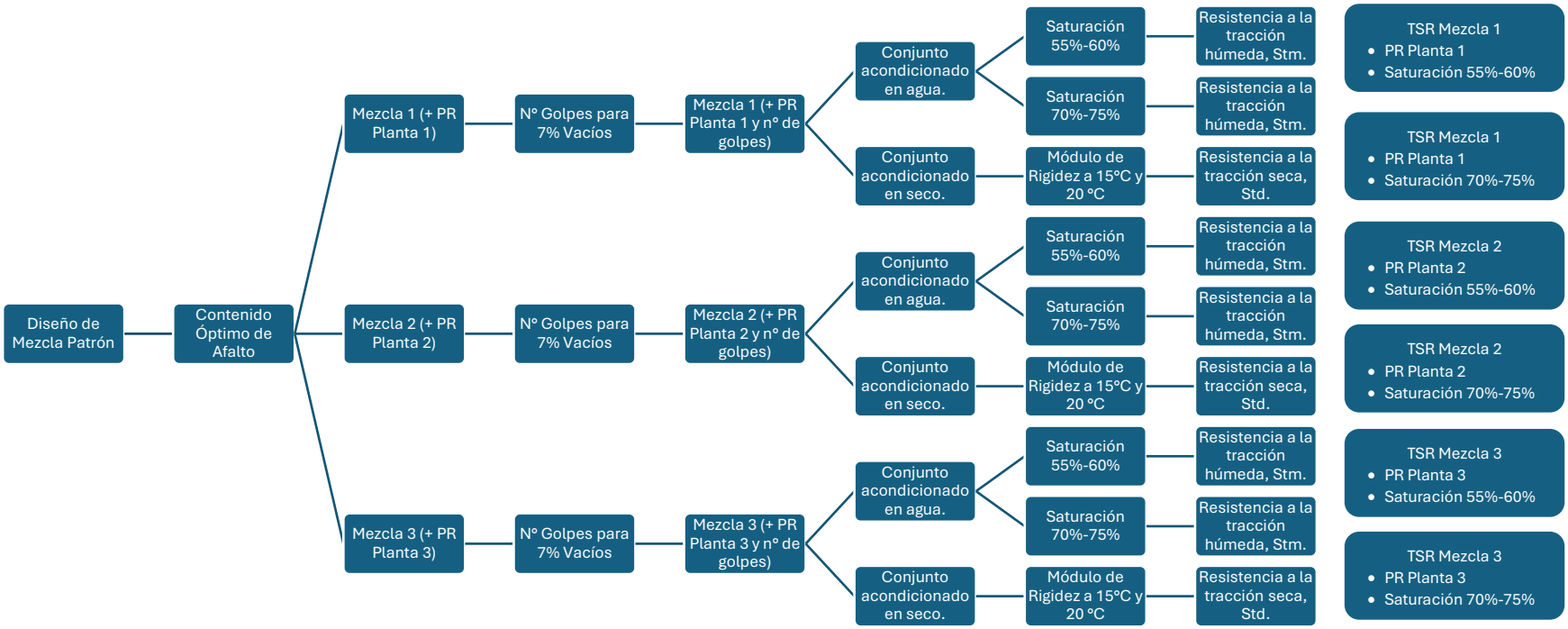


Figura 1

Procedimiento General Aplicado para el Desarrollo de la Investigación.

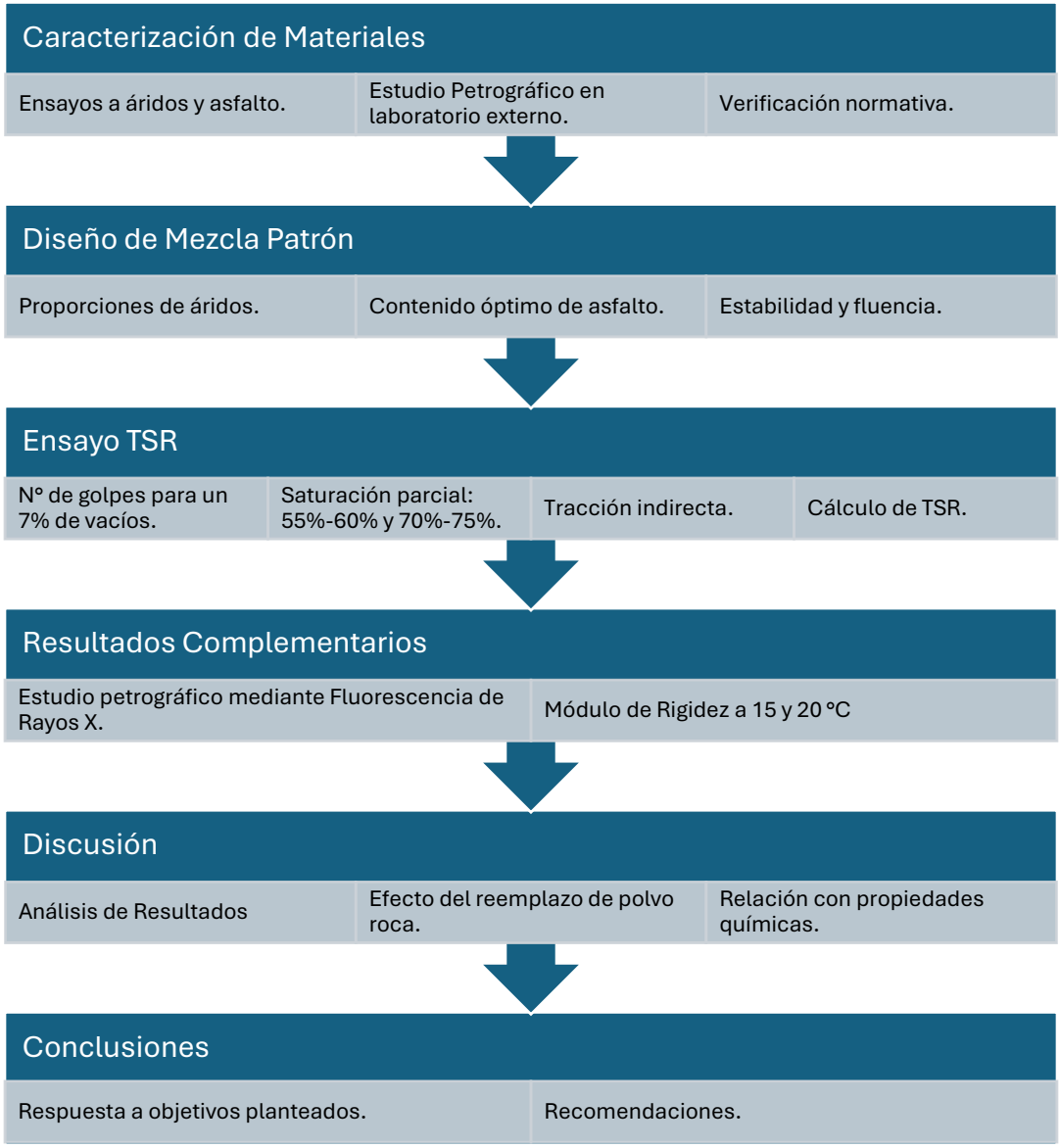


Figura 2

Metodología General Aplicada para el Desarrollo de la Investigación.

Procedimiento

Características de los Áridos

Una vez recepcionados por el CDI los áridos provenientes de tres plantas de Bitumix S.A., se procede a cuartear para obtener las cantidades necesarias de cada tipo de árido. Esto asegura que se disponga de suficiente material para realizar los diferentes ensayos a los que deben ser sometidos. Los ensayos realizados incluyen granulometría, densidad real seca, densidad aparente, porcentaje de partículas chancadas, y desgaste Los Ángeles. A continuación, en la Tabla 5 y Tabla 6 se presentan las granulometrías de los áridos provenientes de cada planta.

Tabla 5

Granulometría de los Áridos Provenientes de la planta 1.

Tamiz	Unidad	ASTM	Gravilla 3/4" Planta 1	Gravilla 1/2" Planta 1	Polvo Roca Planta 1	Arena Planta 1	Polvo Mineral Planta 1
19	mm	(3/4")	100				
12,5	mm	(1/2")	36	100			
9,5	mm	(3/8")	6	82	100	100	
4,75	mm	(N°4)	2	9	90	92	
2,36	mm	(N°8)	1	3	62	68	
1,18	mm	(N°16)	1	3	43	49	
0,6	mm	(N°30)	1	2	30	30	100
0,3	mm	(N°50)	1	2	21	15	99
0,15	mm	(N°100)	1	2	15	8	94
0,075	mm	(N°200)	1	2	11	4	78

Tabla 6

Granulometría de los Polvo Roca de la Planta 2 y Planta 3.

Tamiz	Unidad	ASTM	Polvo Roca Planta 2	Polvo Roca Planta 3
19	mm	(3/4")	100	100
12,5	mm	(1/2")	100	100

9,5	mm	(3/8")	100	100
4,75	mm	(N°4)	93	95
2,36	mm	(N°8)	61	65
1,18	mm	(N°16)	43	46
0,6	mm	(N°30)	30	31
0,3	mm	(N°50)	21	22
0,15	mm	(N°100)	15	15
0,075	mm	(N°200)	11	11

Según el tipo de mezcla asfáltica, existen diferentes requisitos para los parámetros mencionados anteriormente, tal como se detalla en la Tabla 2 y Tabla 3.

A continuación, en la Tabla 7 tenemos los resultados de los ensayos aplicados en los áridos a utilizar. Para efectos de esta investigación, al polvo roca proveniente de la planta 2 y 3 solo se les determinó su granulometría.

Tabla 7

Constantes Físicas e Hídricas de los Áridos Provenientes de la Planta 1.

Constantes Físicas e Hídricas	Unidad	Gravilla 3/4" Planta 1	Gravilla 1/2" Planta 1	Polvo Roca Planta 1	Arena Planta 1	Polvo Mineral Planta 1
Densidad aparente	(Kg/m^3)	1535	1484	1762	1740	0
Densidad real seca	(Kg/m^3)	2702	2680	2667	2660	2765
Densidad neta	(Kg/m^3)	2763	2750	2753	2750	2765
Partículas Chancadas (2c)	(%)	91	97	100	95	-
Partículas lajeadas	(%)	0,2	0,2	0,1	1,1	-
Índice de lajas	(%)	9,2	11,7	28,2	30	-
Desgaste Los Ángeles	(%)	-	-	-	-	-
Índice de plasticidad	(%)	N.P.[1]	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.

[1] N.P.= No Plástico

Una vez determinadas las características de cada uno de los áridos que se utilizarán, es necesario establecer la proporción en la que cada uno estará presente en la mezcla patrón. La granulometría de los áridos combinados se debe ajustar a la banda granulométrica seleccionada

para la investigación, en este caso, la banda IV-A-12 correspondiente a una granulometría semidensa.

Para obtener la granulometría de la combinación de áridos se siguen una serie de pasos sencillos en una hoja de cálculo. Primero, la granulometría obtenida de cada árido se organiza en columnas diferentes donde cada fila corresponde al porcentaje que pasa por un tamiz (3/4", 1/2", 3/8", N°4, N°8, N°16, N°30, N°50, N°100, N°200). Luego, determinamos el porcentaje de aportación inicial de cada árido con valores cercanos a lo esperado (Gravilla 3/4 ", Gravilla 1/2", Polvo Roca, Arena y Filler). Se multiplica el porcentaje de aportación de cada árido, por cada uno de los valores de su granulometría. Luego se suman los valores de cada fila para obtener la granulometría de los áridos combinados. Finalmente se ajustan los porcentajes de aportación de cada árido para obtener una granulometría que se encuentre dentro de la banda especificada (IV-A-12), como se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8

Dosificación de Áridos.

Tamiz		Gravilla 3/4	Gravilla 1/2	Polvo Roca	Arena	Filler	% Gravilla 3/4" 15%	% Gravilla 1/2" 38%	% Polvo Roca 30%	% Arena 16%	% Filler 1%	Granulometría de la mezcla de Áridos	Banda especificada IV-A-12	
19,0 mm	3/4"	100	100	100	100	100	15	38	30	16	1	100	100	100
12,5 mm	1/2"	36	100	100	100	100	5	38	30	16	1	90	80	95
9,50 mm	3/8"	6	82	100	100	100	1	31	30	16	1	79	70	85
4,75 mm	N° 4	2	9	90	92	100	0	3	27	15	1	46	43	58
2,36 mm	N° 8	1	3	62	68	100	0	1	19	11	1	32	28	42
1,18 mm	N° 16	1	3	43	49	100	0	1	13	8	1	23	-	-
0,60 mm	N° 30	1	2	30	30	100	0	1	9	5	1	16	13	24
0,30 mm	N° 50	1	2	21	15	99	0	1	6	2	1	11	8	17
0,15 mm	N° 100	1	2	15	8	94	0	1	5	1	1	8	6	12
0,075 mm	N° 200	1	2	11	4	78	0	1	3	1	1	5,6	4	8

A raíz de la información de la Tabla 8, obtenemos el porcentaje de aportación en peso de cada árido que se usará en la mezcla patrón, como se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9

Dosificación de Áridos en Peso de la Mezcla Patrón.

Agregado	**%**
Gravilla 3/4"	15
Gravilla 1/2"	38
Polvo Roca	30
Arena	16
Filler	1

Características de los Áridos Combinados

A continuación, en la Tabla 10, podemos ver los valores resultantes de los ensayos realizados a los áridos combinados.

Tabla 10

Resultados de Ensayos para Áridos Combinados de la Mezcla Patrón.

Ensayo	Valores	Especificación
Partículas chancadas (2 caras) (%)	97	Min. 90
Partículas lajeadas (%)	0,3	Máx. 10
Índice de Lajas	19	
Índice de plasticidad	N.P.	N.P.
Sales solubles (%)	1,1	Máx. 2

Adherencia Método Estático (%)	≥ 95	Mín. 95
Adherencia Método Dinámico (%)	≥ 95	Mín. 95
Equivalente de Arena (%)	66	Mín. 50
w	2677	
Densidad Efectiva (kg/m3)	2686	
Absorción de asfalto (%)	0,13	

Una vez calculadas las constantes físicas e hídricas de los áridos que se utilizarán en la mezcla patrón, y establecida la granulometría de los áridos combinados que cumple con la banda especificada, se confeccionará la banda de trabajo aplicando las tolerancias indicadas en el Método de Diseño Marshall, en el Volumen 8 del Manual de Carreteras (versión 2023).

A continuación, en la Tabla 11, podemos ver la banda de trabajo resultante, y en el

Gráfico 1, la curvas granulométrica de la combinación de áridos, además de la banda de trabajo y banda especificada.

Tabla 11

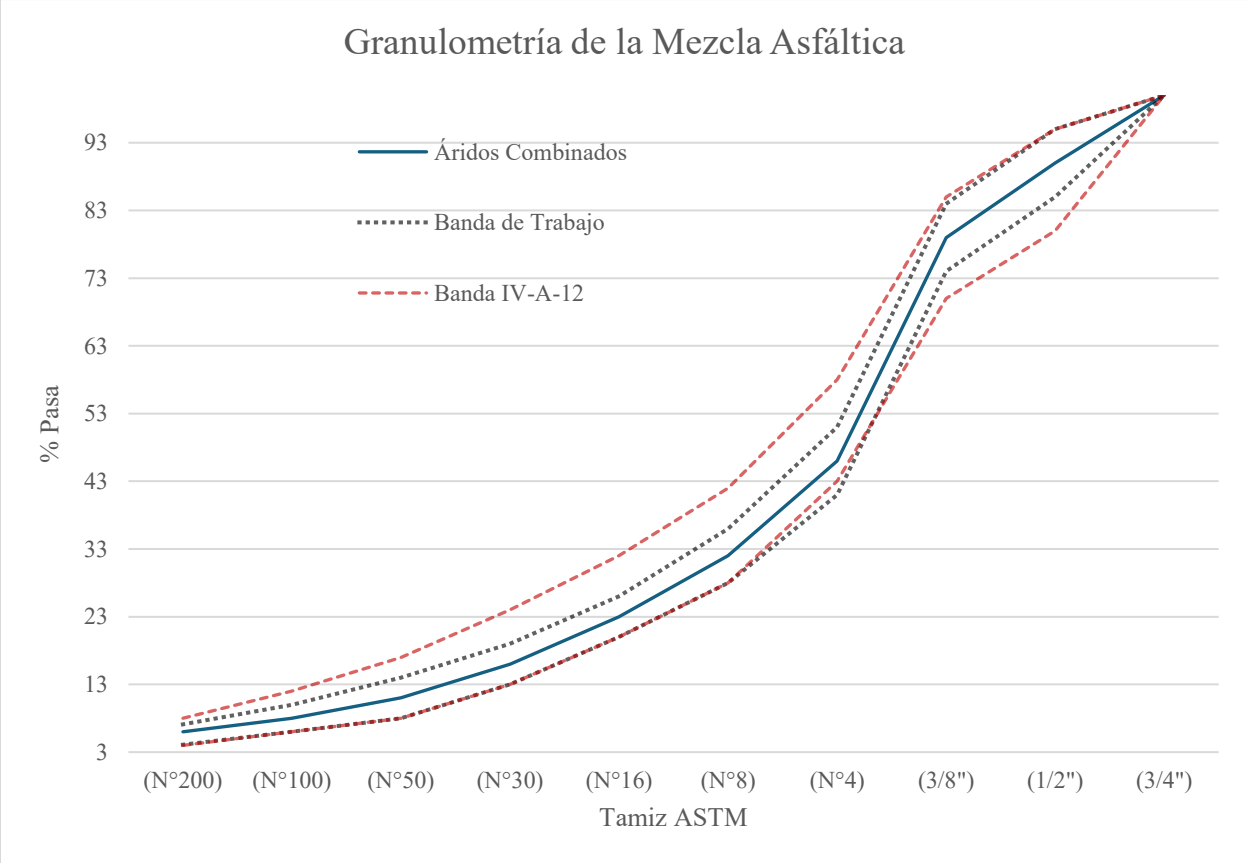
Banda de Trabajo de los áridos combinados.

Tamiz			Combinación de Áridos	Banda de Trabajo		
19,0	mm	(3/4")	100	100	-	100
12,5	mm	(1/2")	90	85	-	95
9,5	mm	(3/8")	79	74	-	84
4,75	mm	(N°4)	46	41	-	51
2,36	mm	(N°8)	32	28	-	36

1,18	mm	(N°16)	23		-	
0,6	mm	(N°30)	16	13	-	19
0,3	mm	(N°50)	11	8	-	14
0,15	mm	(N°100)	8	6	-	10
0,075	mm	(N°200)	5,6	4,1	-	7,1

Gráfico 1

Banda Especificada, Banda de Trabajo y Curva Granulométrica de los Áridos Combinados.



Características del Asfalto

Para esta investigación se utilizó cemento asfaltico clasificado por Grado de Viscosidad Original, CA-24. Este debe cumplir las especificaciones indicadas en la Tabla 1.

Una vez establecidas las especificaciones que el asfalto CA-24 debe cumplir, se debe verificar que el asfalto a utilizar en esta investigación cumple con estos requisitos. Para ello, se ha determinado la viscosidad, penetración, ductilidad, entre otros ensayos ya mencionados.

A continuación, en la Tabla 12 se presentan los resultados de estos ensayos. El asfalto cumple con las especificaciones establecidas y es adecuado para su aplicación en pavimentos asfálticos.

Tabla 12

Resultados de Ensayes al Cemento Asfáltico CA-24.

Parámetro	Valor	Especificación	Método
Viscosidad Original a 60°C, Poises	2.508	Mín. 2.400	MC 8.302.24
Penetración a 25°C, 100 gr, 5 s, 0,1 mm	55	Mín. 40	MC 8.302.3
Ductilidad 25°C, 5 cm/min, cm	>100	Mín. 100	MC 8.302.8
Ensaye de la mancha (heptano - xilol) 30% Xilol	Negativo	Negativo	MC 8.302.7
Solubilidad en tricloroetileno, %	>99	Mín. 99	MC 8.302.11
Punto de inflamación, Copa abierta Cleveland, °C	>232	Mín. 232	
Punto de ablandamiento, °C	50,6	Informar	MC 8.302.16
Índice de penetración	-0,8	Mín. -2 - Máx. 1	MC 8.302.18
Película Delgada Rotatoria (RTFOT)			
Variación de masa, %	-0,2	Máx. 0,8	MC 8.302.33

Viscosidad 60°C, Poises	8.643	Informar	MC 8.302.24
Ductilidad 25°C, 5 cm/min, cm	>100	Mín. 100	MC 8.302.24
Índice de durabilidad	3,5	Máx. 4,0	
Temperaturas para Laboratorio			
Temperatura de mezclado (2 Poises), °C	153 +- 5	Informar	
Temperatura de compactación de Probetas (3 Poises), °C	143 +- 5	Informar	
Densidad Picnómetro 25°C, kg/m3	1.015	Informar	MC 8.302.2

Método de Diseño Marshall

Una vez determinadas las características del árido y del asfalto, es importante analizar cómo estos materiales interactúan entre sí. El asfalto y el agregado son combinados en proporciones exactas para determinar las propiedades físicas y el desempeño que tendrá la mezcla en servicio.

El propósito del Método Marshall es determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados. Con este contenido de asfalto óptimo se deben lograr las especificaciones de estabilidad, porcentaje de huecos, fluencia y TSR indicados en la Tabla 13.

Tabla 13

Requisitos para Mezclas Asfálticas (Dirección de Vialidad, 2023).

Mezcla Asfáltica	Estabilidad (N) (mín.)	Fluencia (0,25 mm)	Huecos (%)	TSR (%) (mín.)
Rodadura	9.000	8 – 16	3 – 5	75
Intermedia	8.000	8 – 16	3 – 8	-

Base Gruesa	6.000	8 – 16	5 – 10	-
Superficie Fina	4.000	8 – 16	3 – 8	-

La preparación de las probetas se realizará de acuerdo con el método 8.302.40 del Volumen 8 del Manual de Carreteras (2023). En esta sección se indica que se deben confeccionar por lo menos tres probetas por cada contenido de asfalto a ensayar.

Se separan cada uno de los áridos (gravilla ¾", gravilla ½", gravilla 3/8", polvo roca y arena) provenientes de la planta 1 en las siguientes fracciones: 3/4" – 1/2", 1/2" - 3/8", 3/8" – N° 4, N° 4 – N° 8, bajo N° 8. Estos ya deben estar secos (masa constante).

El CDI proporciona las instrucciones que indican la cantidad de material, en gramos, que se usará de cada fracción y tipo de árido, lo que resultará en la granulometría que se obtuvo en la Tabla 11. Se preparan 15 bandejas con la combinación de estos áridos, correspondientes a cada probeta que se realizará, tres por cada contenido de asfalto (4,0%, 4,5%, 5,0%, 5,5%, 6,0%). El peso de los áridos en cada bandeja será de aproximadamente 1100 g, lo que permitirá obtener probetas con una altura cercana a los 65 mm. Antes de comenzar con el mezclado, las bandejas con árido se colocan en un horno a una temperatura entre 170 °C y 180 °C durante una hora y durante todo el proceso de mezclado y compactación. Además, el asfalto se calienta previamente hasta la temperatura de mezclado indicada en la Tabla 12, 153 ± 5 °C.

Sacamos del horno la primera bandeja de árido. Se pesa el contenido en un recipiente metálico y se calcula el porcentaje en peso de asfalto respecto al agregado, que corresponde a esa bandeja (4,0%). Luego, se mezclan rápidamente el asfalto y el árido hasta que este esté completamente cubierto.

Terminado de mezclar, y justo antes de que descienda la temperatura de la mezcla a la temperatura de compactación (143 ± 5 °C) se preparan el molde y martillo Marshall. Los moldes están compuestos por una placa base, el molde propiamente tal y un collar. Para realizar estos ensayos se utilizan 15 moldes, una placa base y un collar ya que estos últimos se reutilizan para cada probeta. Tanto los moldes como el collar y placa base se acondicionan en un horno a la temperatura de compactación (143 ± 5 °C). Por otro lado, el martillo Marshall debe estar limpio y lubricado con WD-40 en sus partes móviles. Además, se debe acondicionar el pie del martillo (pieza en contacto con la mezcla al compactar) en una cama de arena durante 15 minutos hasta que alcance una temperatura próxima a la de compactación. Finalmente, todos los instrumentos o equipos que estarán en contacto con la mezcla deben estar acondicionados a la temperatura de compactación.

Una vez preparado todo lo anterior, se coloca un disco de papel cortado a medida, idealmente aceitado, en la base del molde. Se vierte la mezcla en un embudo metálico con compuerta inferior posicionado sobre el molde de la probeta. Al abrir la compuerta, la mezcla cae en el molde manteniendo su homogeneidad. Con una espátula, se acomoda la mezcla 15 veces en el perímetro y 10 veces en el centro. Luego, se coloca otro disco de papel en la parte superior y se posiciona el molde en el pedestal de compactación del martillo Marshall, ajustando el sujetador para asegurar que el molde no se mueva durante la compactación.

Se coloca el martillo ya acondicionado en su posición, asegurándose de que esté bien sujeto a la correa y que pueda moverse hacia arriba y hacia abajo. Se aplican 75 golpes a cada cara de la probeta. Después de la compactación, se retiran la base y el anillo, y se deja el molde (con la mezcla compactada en un interior) enfriando con la ayuda de ventiladores. El mismo procedimiento se repite para las 14 bandejas de áridos restantes.

Una vez que las 15 probetas estén frías, se desmoldan utilizando un extractor equipado con un disco desplazador de 100 mm de diámetro y 10 mm de espesor. Luego, con un pie de metro se mide la altura y el diámetro de cada probeta. Para medir la altura, se marcan 4 puntos perpendiculares entre sí en una de las caras de la probeta, se mide la altura en cada punto y se promedian las 4 mediciones. Para medir el diámetro, se toman dos mediciones perpendiculares y se promedian.

Densidades Hidrostáticas

Determinada la altura y diámetro de las probetas se procede a obtener la densidad de acuerdo con el método 8.302.38 del Volumen 8 del Manual de Carreteras (2023).

Ya que las probetas no corresponden a mezclas de graduación abierta ni están cubiertas de parafina, debemos seguir el método A. Dejamos secar las probetas hasta masa constante a temperatura ambiente (25°C) y se pesan, se registra este peso como “masa de la probeta en aire”, (A). Luego se sumergen en agua a 25°C durante 3 a 5 minutos y se pesan sumergidas, se registra como “masa de la probeta en agua” (C). Finalmente, se retira la probeta del agua y se seca con una toalla húmeda, se pesa y se registra como “masa de la probeta superficialmente seca” (B), en este paso es importante no realizar movimientos bruscos con la probeta para no eliminar el agua dentro de los poros accesibles.

Se calcula la densidad hidrostática (G) de cada probeta con la siguiente fórmula:

$$G = \frac{A}{(B - C)} * \rho w * 1000 \left[\frac{kg}{m^3}\right]$$

Estabilidad y Fluencia

Calculada la densidad hidrostática de cada probeta, estas se colocan en un baño de agua a 60 °C durante 30 minutos. Previo a comenzar el ensayo se deben limpiar las mordazas de la prensa Marshall, y sumergir en un baño de agua para acondicionar a temperaturas entre 21 y 38 °C. Se deben lubricar las barras de modo que la parte superior de la mordaza deslice suavemente.

Después del tiempo de acondicionamiento, se saca la primera probeta del baño de agua y se seca su superficie con una toalla o paño húmedo. Luego, se coloca la mordaza inferior en el pedestal de carga y se centra la probeta de forma diametral en ella. A continuación, se coloca la mordaza superior y se asegura que el conjunto mordazas-probeta esté bien centrado. Se aplica una carga a una velocidad de 50 ± 1 mm/min hasta que la probeta falle. La estabilidad Marshall se define como la carga máxima (N) necesaria para producir la falla de la probeta a una temperatura de 60 °C.

El ensaye no termina al alcanzar el valor de estabilidad ya que para obtener el valor de fluencia se mantiene la carga y se sujeta firmemente el medidor de flujo sobre la barra guía hasta que alcance la carga máxima correspondiente al valor de fluidez de la probeta expresada en unidades de 0,25 mm. Ambos procedimientos (estabilidad y fluencia) desde que se saca la probeta del baño de agua debe durar un tiempo máximo de 30 segundos.

Densidad Máxima de la Mezcla sin Compactar

Una de las determinaciones previas que pide el diseño Marshall es obtener la densidad máxima de la mezcla sin compactar de acuerdo con el método 8.302.37 del Volumen 8, Manual de Carreteras (2023). Este valor servirá más adelante para calcular el porcentaje de huecos de la mezcla.

Para realizar el ensayo de densidad máxima de la mezcla sin compactar de una mezcla tipo carpeta de 19 mm, necesitamos dos muestras de 2500 g. Este procedimiento se puede realizar en paralelo con el mezclado de las 15 probetas anteriores.

Para ello, debemos preparar dos bandejas adicionales de mayor tamaño. El CDI nos proporciona las instrucciones sobre la cantidad de árido en gramos para cada tipo y fracción de árido, lo que nos dará la granulometría indicada en la Tabla 11.

Se determina un porcentaje de asfalto próximo al óptimo previsto, en este caso un 5,5%. A partir del valor de Dmm que resulte del ensayo se podrá calcular la densidad efectiva del agregado y, por consiguiente, podremos calcular el Dmm para cualquier contenido de asfalto.

Una vez mezclado el árido con el asfalto (con un 5,5 % de asfalto), se deja enfriar a temperatura ambiente, removiendo manualmente con una espátula para separar las partículas, teniendo cuidado de no fracturar el árido. Se pesa y se registra su masa como Mm (masa de la muestra).

A continuación, se coloca la muestra en un recipiente de vacío metálico, que está sobre un dispositivo de agitación mecánica. Se agrega agua a 25 °C hasta cubrir la mezcla dentro del recipiente. Se coloca la tapa del recipiente (de vidrio), la cual está conectada a una línea de vacío.

Se inicia la agitación mecánica y, al mismo tiempo, se comienza a eliminar el aire atrapado en la muestra, aumentando gradualmente la presión de vacío hasta que el manómetro de presión residual indique 27,5 ± 2,5 mm de Hg (milímetros de mercurio). El vacío debe alcanzarse dentro de 2 minutos.

Una vez logrado el vacío, se mantiene la agitación y la aplicación de vacío durante al menos 10 minutos, cuidando de mantener los 27,5 ± 2,5 mm de Hg, ya que este puede variar

rápidamente durante el ensayo. Pasado el tiempo, se apaga el sistema de agitación mecánica y se libera gradualmente la presión.

Se retira la tapa de vidrio y se llena el recipiente con agua a 25 °C hasta que rebose, asegurándose de no introducir aire en el proceso. A continuación, se coloca la tapa metálica del recipiente y se seca cuidadosamente con un paño húmedo o una toalla, evitando derramar el agua del interior. Finalmente, se pesa el recipiente lleno de agua, con la tapa y la muestra, y se registra como MPam. Previamente se registra el peso del recipiente lleno con agua y se registra como MPa.

Se calcula el Dmm de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$Dmm = \frac{Mm}{Mm + MPa - MPam} * \rho_T$$

Donde:

Mm= masa de la muestra disgregada seca.

MPam= masa del recipiente lleno con agua, la tapa y la muestra.

MPa= masa del recipiente lleno con agua.

ρ_T = densidad del agua a 25 °C, 0,9971 g/cm³.

Se repite el mismo procedimiento para la otra mezcla de 2500 g.

Después de calcular Dmm para un contenido de asfalto próximo al óptimo (5,5 %), calculamos la densidad efectiva del agregado. Finalmente se calcula el Dmm para cada contenido de asfalto según la siguiente fórmula:

$$D_{mm} = \frac{100 + P_b}{\frac{100}{\rho_E} - \frac{P_b}{\rho_b}}$$

Donde:

Dmm = densidad máxima de la mezcla (kg/m3).

Pb = porcentaje de asfalto referido al agregado (%).

ρE = densidad efectiva del agregado (kg/m3).

ρb = densidad del asfalto (kg/m3).

Continuando con los parámetros Marshall, calculamos los vacíos del agregado mineral para cada contenido de asfalto, con la siguiente fórmula:

$$VAM = 100 * \left(1 - \frac{G}{\rho_{RS}} * \frac{100}{100 + P_b}\right)$$

Donde:

VAM = vacíos en el agregado mineral.

G = densidad hidrostática de la mezcla compactada.

ρ_{RS} = densidad real seca ponderada.

P_b = porcentaje de asfalto referido al agregado.

A continuación, la Tabla 14 resume los resultados obtenidos de las 15 probetas, incluyendo los valores de estabilidad, fluencia, densidad, V.A.M. y porcentaje de huecos, para un promedio de 3 probetas por contenido de asfalto.

Tabla 14

Parámetros Marshall de la Mezcla Patrón.

Parámetros	Unidad	% de asfalto					Rangos
CA-24	(% ref. ag.)	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	
Asfalto Total	(% ref. ag.)	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	
Asfalto Total	(% ref. m.)	3,8	4,3	4,8	5,2	5,7	
DMM	(Kg/m3)	2528	2511	2493	2477	2460	
Densidad Hidrostática	(Kg/m3)	2351	2366	2380	2394	2387	
Huecos	(%)	7,0	5,8	4,5	3,3	3,0	3-5
V.A.M	(%)	15,6	15,4	15,3	15,2	15,9	Mín. 14
Huecos Llenos	(%)	54,9	62,7	70,4	78,1	81,3	
Estabilidad	(N)	14038	14896	14020	12989	12262	Mín. 9555
Fluencia	(0,01")	12,4	13,4	14,1	14,5	14,5	8-16
Relac. Estab. /Fluencia	(Kg/cm)	4608	4530	4044	3660	3437	
Razón Filler/Asfalto		1,4	1,24	1,12	1,02	0,93	

De acuerdo con el método de diseño Marshall, se confeccionan 5 gráficos:

1. Estabilidad v/s porcentaje de asfalto. Ver Gráfico 2.
2. Fluencia v/s porcentaje de asfalto. Ver Gráfico 3.
3. Densidad v/s porcentaje de asfalto. Ver Gráfico 4.
4. Huecos en la mezcla v/s porcentaje de asfalto. Ver Gráfico 5.
5. VAM v/s porcentaje de asfalto. Ver Gráfico 6.

El contenido óptimo de asfalto deberá coincidir con la máxima estabilidad, máxima densidad, y 4% de huecos en los gráficos mencionados anteriormente.

De acuerdo con lo anterior tenemos:

Óptimo por densidad: 5,5 % asfalto.

Óptimo por estabilidad: 4,5 % asfalto.

Óptimo para un 4,0 % de huecos: 5,2 % asfalto.

Al promediar los tres valores obtenidos, se determina que el contenido óptimo de asfalto para esta mezcla es de 5,1 % con una tolerancia de ± 0,3 %.

Gráfico 2

Estabilidad vs % de Asfalto.

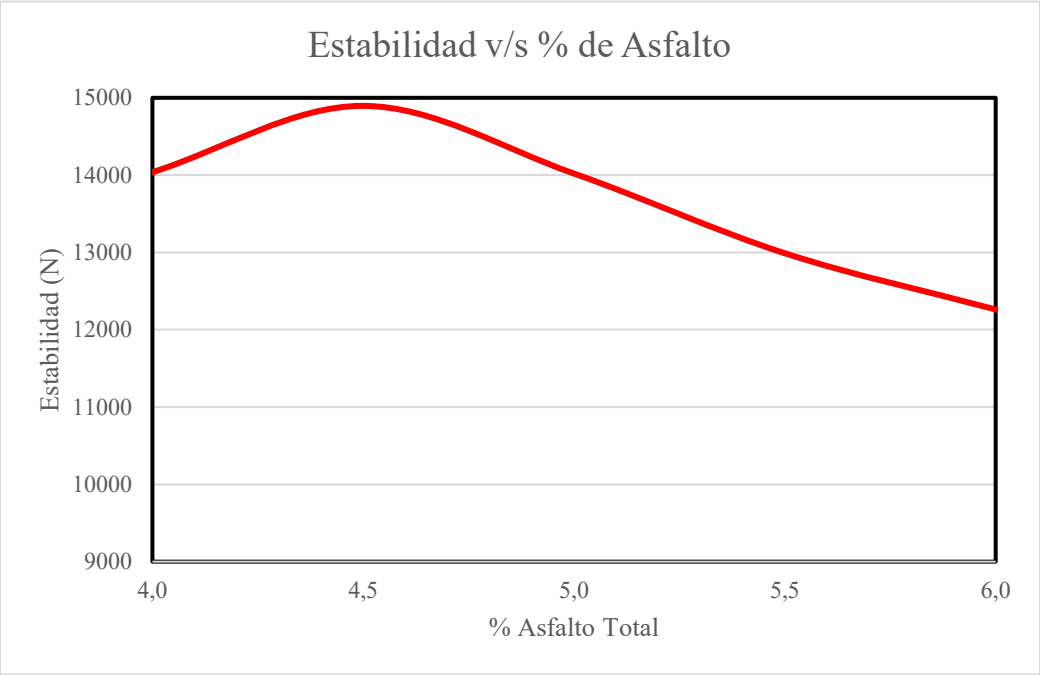


Gráfico 3

Fluencia vs % de Asfalto.

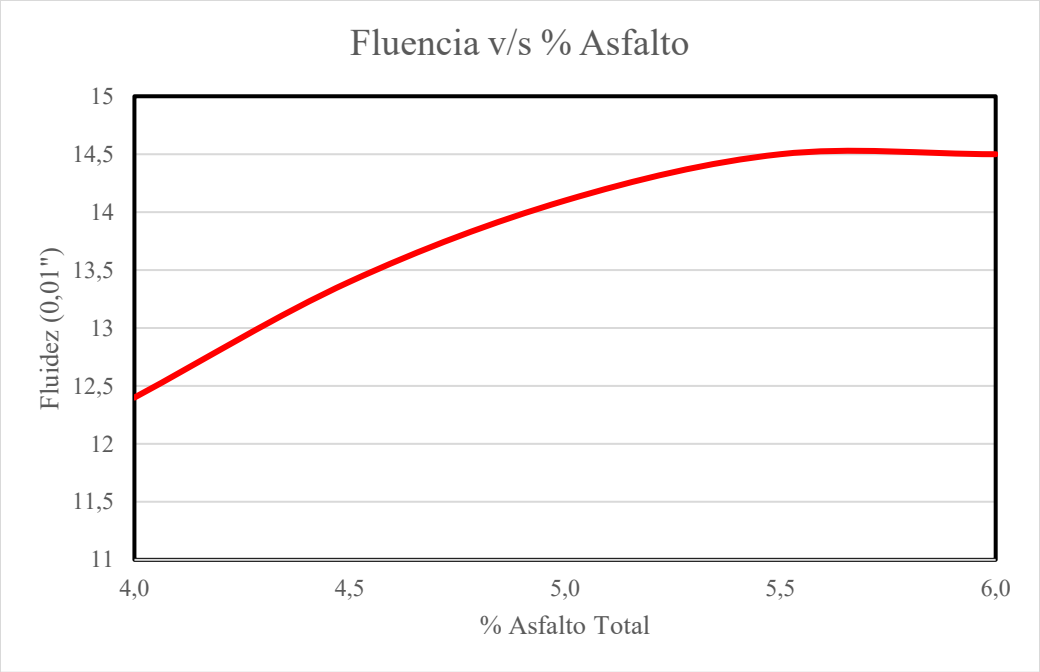


Gráfico 4

Densidad vs % de Asfalto.

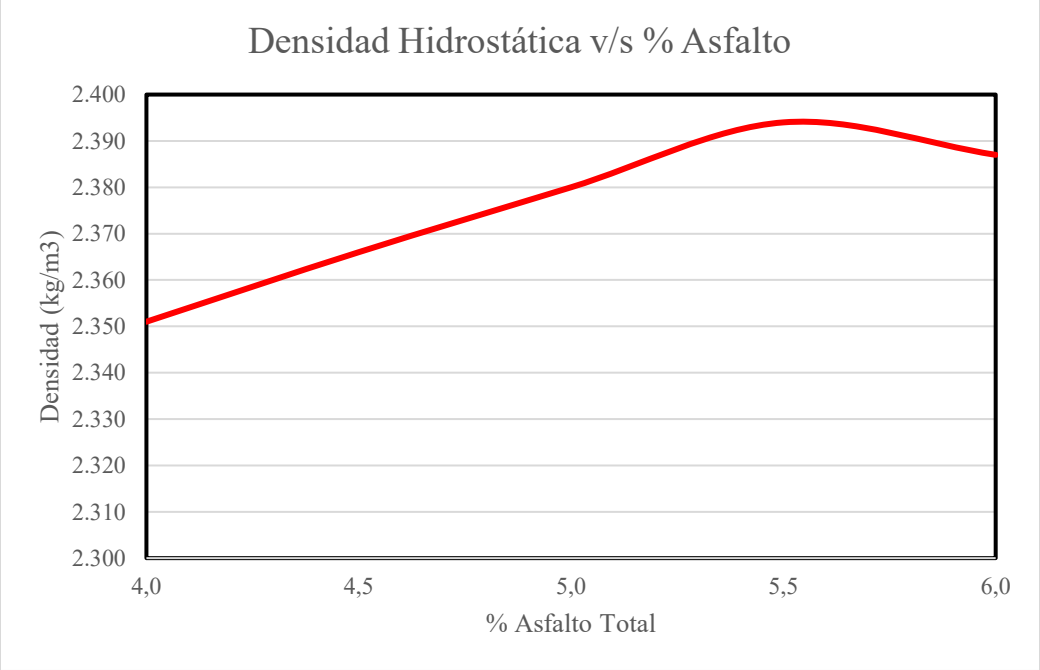


Gráfico 5

% Huecos vs % de Asfalto.

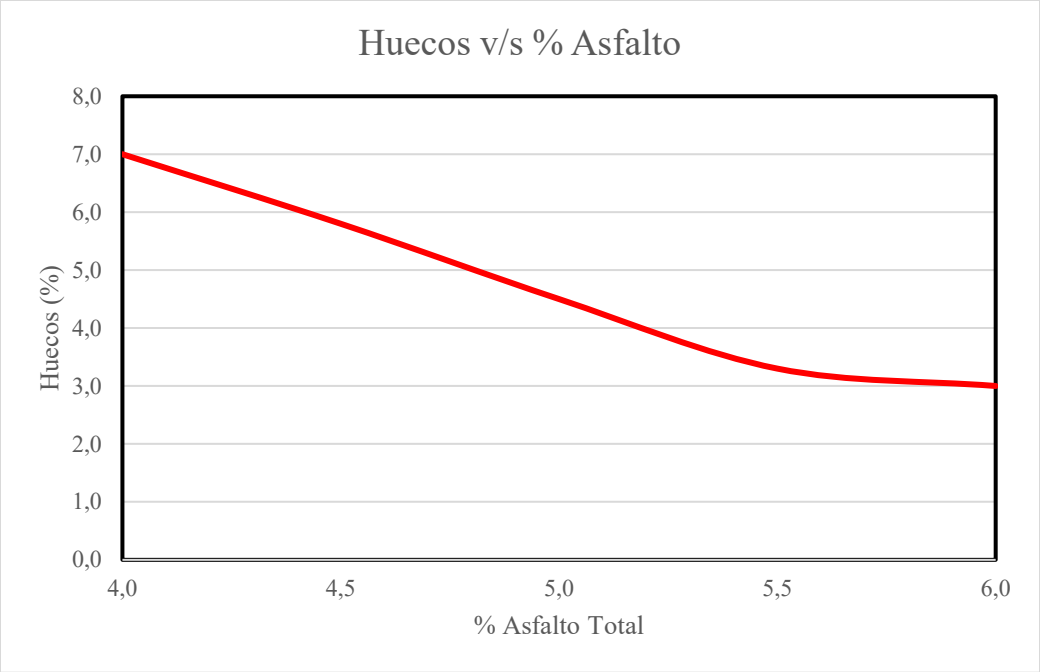
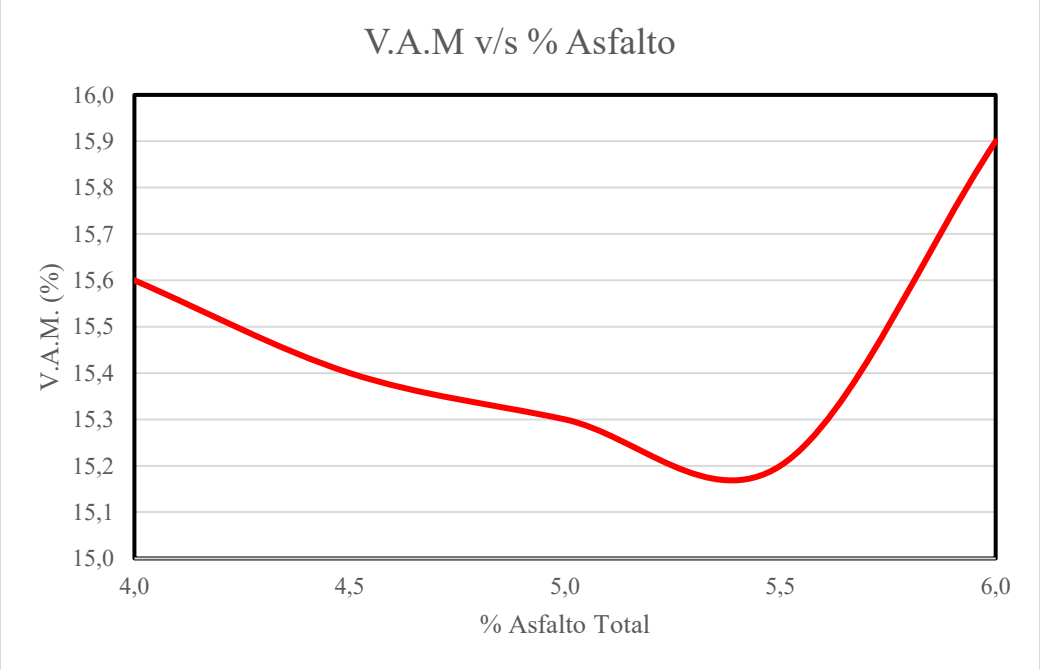


Gráfico 6

V.A.M vs % de Asfalto.



Método para Determinar la Resistencia al Daño por Humedad (TSR)

Según el método de diseño Marshall, para las capas de rodadura es necesario realizar el ensayo TSR de susceptibilidad a la humedad en las probetas asfálticas, utilizando el contenido óptimo de asfalto previamente determinado.

Este método permite evaluar cómo afecta el agua a la resistencia a la tracción del pavimento. Para ello, se elabora un nuevo conjunto de probetas con la misma granulometría indicada en la Tabla 11, todas con un contenido de asfalto fijo de 5,1 %. Las variables en este punto serán la cantidad de golpes por cara que permita obtener un contenido de huecos de 7 ± 1% y el polvo roca utilizado.

Para determinar la cantidad de golpes por cara que permita alcanzar un contenido de huecos entre 6 % y 8 %. Se preparan seis probetas por cada mezcla, siguiendo el método 8.302.40: dos se compactan con 15 golpes por cara, otras dos con 30 golpes y las últimas dos con 45 golpes por cara.

En esta etapa se deben elaborar tres tipos de mezcla: la primera únicamente con áridos provenientes de la planta 1, la segunda con áridos de la planta 1 pero reemplazando la fracción fina por polvo roca proveniente de la planta 2, y la tercera con áridos de la planta 1 pero reemplazando la fracción fina por polvo roca proveniente de la planta 3. Esto dará un total de 18 probetas. Además, para calcular el porcentaje de huecos, es necesario conocer el Dmm (densidad máxima de la mezcla suelta) de cada tipo de mezcla. Se puede utilizar el mismo valor de Dmm obtenido en la etapa de determinación del contenido de asfalto para la mezcla patrón, pero se deberán preparar dos muestras de mezcla adicionales tanto para la mezcla con PR de la planta 2 como para la mezcla con PR de la planta 3.

Para la dosificación de las bandejas de áridos en el caso de las mezclas 2 y 3, es necesario ajustar la combinación de áridos remplazando el polvo roca y la arena de la mezcla patrón por el polvo roca de cada planta, buscando la mayor similitud con la granulometría de la mezcla patrón.

La producción de mezcla asfáltica está condicionada por los materiales disponibles en cada zona. En el caso de la mezcla patrón, se emplean tanto polvo de roca como arena, ambos con una granulometría similar. El uso de arena en la mezcla patrón permite reemplazar parte del polvo de roca, generando un ahorro significativo de este material. En contraste, en la planta 1 y 2, solo se utiliza polvo de roca en las mezclas asfálticas, ya sea porque no hay suficiente arena disponible para su uso a nivel industrial, o porque simplemente no se dispone de este material. En cualquier caso, es necesario alcanzar una proporción de áridos que genere una granulometría similar entre las tres mezclas.

Para confeccionar las 18 bandejas de áridos, se siguieron las instrucciones especificadas en la Tabla 15.

Tabla 15

Dosificación de Áridos en Peso por Mezcla.

Agregado	Mezcla 1 (patrón), %	Mezcla 2, %	Mezcla 3, %
Gravilla 3/4"	15	16	16
Gravilla 1/2"	38	38	38
Polvo Roca	30	45	45
Arena	16	0	0
Filler	1	1	1

A continuación, la Tabla 16, la Tabla 17 y la Tabla 18 y presentan las dosificaciones de áridos para las bandejas de cada tipo de mezcla, de acuerdo con los porcentajes de la Tabla 15.

Tabla 16

Dosificación de Bandejas con Áridos de la Planta 1.

Material	Fracciones, mm	% retenido	% Mezcla	Peso Parcial	Peso Total (6 bandejas)
Gravilla 3/4"	20 - 12,5	64	15%	108,5	650,88
	12,5 - 10	30	15%	50,9	305,1
	10 - 5	4	15%	6,8	40,68
	5 - 2,5	1	15%	1,7	10,17
	bajo 2,36	1	15%	1,7	10,17
Gravilla 1/2"	20 - 12,5	-	-	-	-
	12,5 - 10	18	38%	77,3	463,752
	10 - 5	73	38%	313,5	1880,772
	5 - 2,5	6	38%	25,8	154,584
	bajo 2,36	3	38%	12,9	77,292
Polvo Roca Planta 1	20 - 12,5	-	-	-	-
	12,5 - 10	-	-	-	-
	10 - 5	10	30%	33,9	203,4
	5 - 2,5	28	30%	94,9	569,52
	bajo 2,36	62	30%	210,2	1261,08
Arena	20 - 12,5	-	-	-	-
	12,5 - 10	-	-	-	-
	10 - 5	8	16%	14,5	86,784
	5 - 2,5	24	16%	43,4	260,352
	bajo 2,36	68	16%	122,9	737,664
Polvo Mineral (Filler)	20 - 12,5	-	-	-	-
	12,5 - 10	-	-	-	-
	10 - 5	-	-	-	-
	5 - 2,5	-	-	-	-
	bajo 2,36	100	1%	11,3	67,8
Total				1130,0	6780,0

Tabla 17

Dosificación de Bandejas con PR de la Planta 2.

Material	Fracciones, mm	% retenido	% Mezcla	Peso Parcial	Peso Total (6 bandejas)
Gravilla 3/4"	20 - 12,5	64	16%	115,7	694,272
	12,5 - 10	30	16%	54,2	325,44
	10 - 5	4	16%	7,2	43,392
	5 - 2,5	1	16%	1,8	10,848
	bajo 2,36	1	16%	1,8	10,848
Gravilla 1/2"	20 - 12,5				
	12,5 - 10	18	38%	77,3	463,752
	10 - 5	73	38%	313,5	1880,772
	5 - 2,5	6	38%	25,8	154,584
	bajo 2,36	3	38%	12,9	77,292
Polvo Roca Planta 2	20 - 12,5				
	12,5 - 10				
	10 - 5	7	45%	35,6	213,57
	5 - 2,5	32	45%	162,7	976,32
	bajo 2,36	61	45%	310,2	1861,11
Arena	20 - 12,5				
	12,5 - 10				
	10 - 5	8	0%	0,0	0
	5 - 2,5	24	0%	0,0	0
	bajo 2,36	68	0%	0,0	0
Polvo Mineral (Filler)	20 - 12,5				
	12,5 - 10				
	10 - 5				
	5 - 2,5				
	bajo 2,36	100	1%	11,3	67,8
Total				1130,0	6780,0

Tabla 18

Dosificación de Bandejas con PR de la Planta 3.

Material	Fracciones, mm	% retenido	% Mezcla	Peso Parcial	Peso Total (6 bandejas)
Gravilla 3/4"	20 - 12,5	64	16%	115,7	694,272
	12,5 - 10	30	16%	54,2	325,44

Gravilla 1/2"	10 - 5	4	16%	7,2	43,392
	5 - 2,5	1	16%	1,8	10,848
	bajo 2,36	1	16%	1,8	10,848
	20 - 12,5				
	12,5 - 10	18	38%	77,3	463,752
	10 - 5	73	38%	313,5	1880,772
	5 - 2,5	6	38%	25,8	154,584
	bajo 2,36	3	38%	12,9	77,292
Polvo Roca Planta 3	20 - 12,5				
	12,5 - 10				
	10 - 5	5	45%	25,4	152,55
	5 - 2,5	30	45%	152,6	915,3
	bajo 2,36	65	45%	330,5	1983,15
Arena	20 - 12,5				
	12,5 - 10				
	10 - 5	8	0%	0,0	0
	5 - 2,5	24	0%	0,0	0
	bajo 2,36	68	0%	0,0	0
Polvo Mineral (Filler)	20 - 12,5				
	12,5 - 10				
	10 - 5				
	5 - 2,5				
	bajo 2,36	100	1%	11,3	67,8
Total				1130,0	6780,0

Las proporciones de áridos por bandeja resultarán en las granulometrías especificadas en la Tabla 19, con una diferencia máxima de dos puntos porcentuales en el tamiz N° 8.

Tabla 19

Granulometría de la Combinación de Áridos por Cada Tipo de Mezcla Asfáltica.

Tamiz	Mezcla 1 (patrón)	Mezcla 2	Mezcla 3	Banda Especificada IV-A-12	
3/4"	100	100	100	100	100
1/2"	90	90	90	80	95
3/8"	79	78	78	70	85
N° 4	46	47	47	43	58

N° 8	32	32	30	28	42
N° 16	23	23	22	-	-
N° 30	16	16	15	13	24
N° 50	11	12	11	8	17
N° 100	8	9	9	6	12
N° 200	5,6	6,7	6,7	4	8

Seguimos el mismo procedimiento de mezclado indicado en el Método de Diseño Marshall. Sin embargo, en lugar de compactar inmediatamente, vertemos la mezcla en una bandeja, la cubrimos con aluminio y la acondicionamos en el horno a la temperatura de compactación (entre 140 °C y 146 °C) durante 2 horas. Pasado el tiempo se procede a compactar la mezcla de cada una de las bandejas.

Una vez compactadas las 6 probetas de cada mezcla, con 15, 30 y 45 golpes, se miden sus dimensiones y su densidad mediante el método hidrostático. Con estos datos, y los valores de Dmm obtenidos por cada mezcla, se calcula el porcentaje de huecos de cada probeta, lo que permite determinar la cantidad de golpes por cara necesarios para alcanzar un contenido de huecos entre 6 % y 8 % en cada tipo de mezcla. En la Tabla 20 podemos ver los resultados.

Tabla 20

Número de Golpes por Cara de Cada Mezcla.

	N° de Golpes por Cara
Mezcla 1	30
Mezcla 2	26
Mezcla 3	34

Una vez definido el número de golpes por cara para cada tipo de mezcla, se procede finalmente a preparar las probetas que serán sometidas al ensayo de tracción indirecta con el fin de evaluar su susceptibilidad al daño por humedad.

Se prepara un nuevo conjunto para cada tipo de mezcla, este se divide en dos subconjuntos con contenidos de huecos similares: uno se mantiene en condiciones secas, mientras que el otro se somete a un proceso de saturación parcial y acondicionamiento con humedad.

Posteriormente, con la prensa Marshall se determina la resistencia a la tracción indirecta de ambos subconjuntos. El grado de daño por humedad se expresa como la relación entre la resistencia del subconjunto húmedo y la del seco, lo que permite cuantificar la pérdida de resistencia inducida por la presencia de agua.

Con el objetivo de analizar cómo la variación en el nivel de saturación parcial de las probetas influye en la resistencia al daño por humedad de las mezclas asfálticas, se conformarán tres subconjuntos: un subconjunto seco y dos subconjuntos acondicionados en agua, con distintos niveles de saturación entre sí, según lo especificado en la Tabla 21.

Tabla 21

Niveles de Saturación Parcial Para Subconjuntos Acondicionados en Agua.

	Mezcla 1		Mezcla 2		Mezcla 3	
Saturación, %	55~60	70~75	55~60	70~75	55~60	70~75
N° Probetas	4	4	3	3	3	3

El método indica que se deben preparar por lo menos 3 probetas para cada subconjunto. Estas se deben mezclar y compactar como indica el método 8.302.6 considerando el N° de golpes indicado en la Tabla 20.

Durante la preparación de las probetas, es fundamental disponer de un horno precalentado a la temperatura de compactación, entre 140 °C y 146 °C. Una vez mezclados el árido con el asfalto, se debe estabilizar su temperatura a la temperatura de compactación y colocarse en una bandeja metálica, cubrirse con papel de aluminio para evitar su oxidación y luego acondicionarse en el horno a temperatura de compactación durante un período de dos horas. Se repite el procedimiento por cada bandeja de áridos.

Pasado el tiempo de acondicionamiento, cada bandeja de mezcla asfáltica es compactada al número de golpes por cara que indica la Tabla 20. Se dejan enfriar las probetas a temperatura ambiente, y con ayuda de ventiladores. Ya frías se extraen de sus moldes.

Se determinan las dimensiones de las probetas, y su densidad mediante el método hidrostático (método 8.302.38). El volumen de la probeta se calculará como B-C.

Utilizando los valores de Dmm obtenidos durante la etapa de determinación del número de golpes, se procede a calcular tanto el porcentaje como el volumen de huecos de cada probeta de acuerdo con las siguientes fórmulas:

$$\%\, Huecos = \frac{Dmm - G}{Dmm} * 100$$

$$Volumen\ de\ Huecos = (B - C) * \%\, Huecos$$

Donde:

Dmm = densidad máxima de la mezcla suelta.

G = Densidad hidrostática de la probeta.

B = masa de la probeta superficialmente seca.

C = masa de la probeta en agua.

Las probetas se agrupan en tres subconjuntos, asegurando que cada uno presente un contenido promedio de vacíos de aire (huecos) similar entre sí. El subconjunto que se probará seco se debe guardar a temperatura ambiente.

El primer subconjunto que se ensayará húmedo se debe saturar parcialmente en una cámara de vacío, con agua destilada a 25 °C. Se aplica un vacío parcial de 525 mm Hg, durante 5 minutos, sin aplicar agitación mecánica. Para este primer grupo se debe alcanzar una saturación de entre el 55 % al 60 % de acuerdo con la Tabla 21.

Terminados los 5 minutos, se retira la probeta del recipiente de vacío y se calcula nuevamente su volumen (B' – C'). Calculamos el volumen de agua absorbida con la siguiente fórmula:

$$Volumen\ de\ Agua\ Absorbida = B' - A$$

Donde:

B' = masa superficialmente seca de la probeta parcialmente saturada.

C' = masa al agua de la probeta parcialmente saturada.

A = masa de la probeta al aire.

Calculamos el grado de saturación como:

$$Grado\ de\ Saturación, \% = \frac{Volumen\ de\ Agua\ Absorbida}{Volumen\ de\ Huecos} * 100$$

Calculamos el hinchamiento de la probeta como:

$$Hinchamiento, \% = \frac{(B' - C') - (B - C)}{(B - C)}$$

Si el grado de saturación está entre el 55 % al 60 % continuamos con el ensayo, en caso no alcanzar el nivel de saturación requerido, se debe volver a saturar la probeta, pero aumentando ligeramente el vacío. Se repite el procedimiento para el resto de las probetas que se ensayarán húmedas, en ambos rangos de saturación (55-60% y 70-75%).

Saturadas todas las probetas, se acondicionan en un baño de agua a 60 °C durante 24 horas. Luego acondicionamos nuevamente en un baño de agua a 25 °C durante 1 hora.

Se retira la primera probeta del baño de agua y se calcula su altura y volumen (B'' – C''). Se calcula el volumen de agua absorbida y grado de saturación, el que debe ser mayor al 80 %.

$$Volumen\ de\ Agua\ Absorbida = B'' - A$$

$$Grado\ de\ Saturación, \% = \frac{Volumen\ de\ Agua\ Absorbida}{Volumen\ de\ Huecos}$$

Calculamos el hinchamiento de la probeta como:

$$Hinchamiento, \% = \frac{(B'' - C'') - (B - C)}{(B - C)}$$

Donde:

B'' = masa superficialmente seca de la probeta parcialmente saturada y acondicionada.

C'' = masa en agua de la probeta parcialmente saturada y acondicionada.

A = masa de la probeta al aire.

Colocamos la primera probeta en la prensa Marshall con las tiras de carga paralelas y centradas en el plano diametral vertical. Se aplica una carga diametral de 50 mm/min hasta alcanzar la carga máxima (valor es estabilidad [N]). Para obtener el valor de fluencia se mantiene la carga hasta que la probeta se fracture.

Repetimos el mismo procedimiento para ambos subconjuntos húmedos.

Módulo de Rigidez

En paralelo al acondicionamiento de los subconjuntos húmedos, se mide el Módulo de Rigidez del subconjunto seco.

El ensayo de Módulo de Rigidez permite evaluar experimentalmente la rigidez de las mezclas asfálticas. Consiste en aplicar pulsos de carga sobre el plano diametral de una probeta cilíndrica alternados por periodos de descanso, midiendo la deformación axial que se genera en cada ciclo de carga.

Las probetas se acondicionan a la temperatura de ensayo por un periodo de al menos 4 horas. Las temperaturas de ensayo serán 15 °C y 20 °C (± 0,5 °C). Pasado el tiempo de acondicionamiento se marcan dos diámetros perpendiculares entre sí y se coloca la probeta en el equipo de forma diametral. El equipo debe contar con lo indicado en la Figura 3.

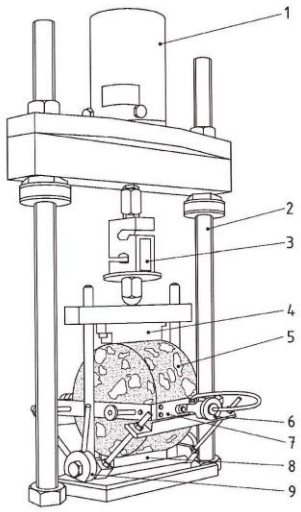


Figura 3

Equipo de ensayo.

Nota, figura tomada de (UNE-EN 12697-26, 2006).

1. Actuador neumático de carga
2. Estructura de carga de acero
3. Célula de carga
4. Pletina superior de carga
5. Probeta
6. Ajuste de LVDT
7. Bastidor de montaje de LVDT
8. Pletina inferior de carga
9. Soporte de alineación de LVDT

Posicionada la probeta, se debe aplicar 10 pulsos de acondicionamiento para permitir que el equipo se ajuste a la magnitud de la carga y a su duración, para obtener la deformación diametral horizontal y el tiempo de carga especificados. Luego se debe ajustar, de ser necesario, los dispositivos LVDT para que estos trabajen en la parte central de su rango de funcionamiento. Se aplican 5 pulsos de carga adicionales, donde se mide, para cada uno, la variación de carga aplicada, la deformación diametral horizontal en el tiempo, y el factor de superficie de carga.

Para cada pulso de carga se debe determinar el módulo de rigidez medido con la siguiente fórmula:

$$E = \frac{F * (v + 0{,}27)}{(z * h)}$$

Donde:

E = módulo de rigidez, Mpa.

F = carga máxima aplicada, N.

z = deformación horizontal, mm.

h = espesor de la probeta, mm.

v = coeficiente de Poisson (0,35).

Extraemos la probeta del equipo y giramos 90 ° en su eje horizontal. Repetimos el ensayo hasta obtener el valor de módulo de rigidez para los 5 pulsos. Si el valor medio de los 5 módulos de rigidez de este ensayo está comprendido entre el +10 % o el – 20 % del valor medio registrado para el primer ensayo, se debe calcular el promedio de los dos ensayos y registrar

como el módulo de rigidez de la probeta. En caso contrario, los resultados se deben rechazar. Los valores obtenidos se presentan más adelante en la sección de Resultados del Módulo de Rigidez.

Obtenidos los módulos de rigidez para los subconjuntos secos de las tres mezclas, se prosigue con el ensayo TSR. Las probetas se acondicionan en un baño de agua a 25 ± 1 °C durante 20 minutos.

Colocamos la primera probeta en el aparato de carga con las tiras de carga paralelas y centradas en el plano diametral vertical. Se aplica una carga diametral de 50 mm/min hasta alcanzar la carga máxima (valor es estabilidad [N]). Para obtener el valor de fluencia se mantiene la carga hasta que la probeta se fracture.

Se calcula la resistencia a la tracción de cada probeta con la siguiente fórmula:

$$S_t = \frac{2P}{\pi t D}\,(kPa)$$

Donde:

S_t = resistencia a la tracción, kPa.

P = carga máxima, N.

t = altura de la probeta justo antes del ensaye de tracción, mm.

D = diámetro de la probeta, mm.

Se calcula la relación de resistencia a la tracción de cada tipo de mezcla con la siguiente fórmula.

$$TSR = \frac{S_{tm}}{S_{td}} * 100$$

Donde:

TSR = relación de resistencia a la tracción, %.

S_{tm} = resistencia a la tracción promedio del subconjunto acondicionado en agua, kPa.

S_{td} = resistencia a la tracción promedio del subconjunto seco.

Resultados y Análisis

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de los ensayos realizados para evaluar el cambio en la resistencia a la humedad de probetas con polvo de roca proveniente de distintas zonas geográficas y con diferentes niveles de saturación parcial, según el ensayo TSR.

Para una revisión detallada de la información, se pueden consultar las tablas completas en Anexos

Anexo ***A***, Anexo B y Anexo C. A continuación, en la Tabla 22, tenemos un resumen de los resultados obtenidos.

Tabla 22

Resumen de Resultados de Ensayo TSR.

Dosificación	PR Planta 1		PR Planta 2		PR Planta 3	
Saturación, %	55~60%	70~75%	55~60%	70~75%	55~60%	70~75%
Saturación inicial, %	58	72	58	72	59	73
Vacíos, %	7,1	7,1	6,8	6,7	6,6	6,6
S1, kPa	779	648	703	601	810	742
S2, kPa	689	603	649	740	793	777
S3, kPa	689	659	667	572	828	715
S4, kPa	649	616				
Tracción húmeda, kPa	701	632	673	638	810	745
ds, kPa	55	26	27	90	18	31
IC 95%, kPa	54	26	31	101	17	30
Vacíos, %	7,1		6,7		6,6	
S1, kPa	902		849		945	
S2, kPa	903		804		947	
S3, kPa	932		832		907	
S4, kPa	855				921	
Tracción seca, kPa	898		829		930	
ds, kPa	32		23		19	
IC 95%, kPa	31		2		19	
TSR, %	78	70	81	77	87	80

Análisis por Nivel de Saturación Parcial

Saturación Parcial entre 55% y 60%

Tabla 23

Comparación de TSR de Probetas con Saturación Parcial del 55% al 60%.

Tipo de Mezcla	Saturación Parcial 55%-60%	Resistencia en Estado Húmedo, kPa	Resistencia en Estado Seco, kPa	TSR, %
PR Planta 1 (patrón)	58	701	898	78
PR Planta 2	58	673	829	81
PR Planta 3	59	810	930	87

En esta condición, se observa que la mezcla con PR proveniente de la planta 3 presenta el mayor valor de TSR, alcanzando un 87%, seguida de la mezcla con PR de la planta 2 con un 81%, mientras que la mezcla con PR proveniente de la planta 1 (mezcla patrón) muestra el valor más bajo con 78%. Esto indica que, bajo condiciones de saturación moderada, la mezcla 3 tiene una mejor resistencia a la humedad en comparación con las otras mezclas.

Saturación Parcial entre 70% y 75%

Tabla 24

Comparación de TSR de Probetas con Saturación Parcial del 70% al 75%.

Tipo de Mezcla	Saturación Parcial 70%-75%	Resistencia en Estado Húmedo, kPa	Resistencia en Estado Seco, kPa	TSR, %
PR Planta 1 (patrón)	72	632	898	70
PR Planta 2	72	638	829	77
PR Planta 3	73	745	930	80

Al aumentar la saturación parcial de las probetas del subconjunto húmedo, se observa una disminución general en los valores de TSR. La mezcla patrón obtiene un TSR de 70%, la mezcla

con PR de la planta 2 un 77%, y la mezcla con PR de la planta 3 un 80%. A pesar de esta reducción, la mezcla 3 mantiene el mejor desempeño frente a la humedad en condiciones más exigentes.

Análisis por Desempeño entre Mezclas

Tabla 25

Recopilación de Resultados TSR.

Tipo de Mezcla	TSR 55%-60%, %	TSR 70%- 75%, %	Δ TSR, %
Mezcla patrón	78	70	-8
Mezcla 2	81	77	-4
Mezcla 3	87	80	-7

La Tabla 25 recopila los valores de TSR obtenidos en ambas condiciones de saturación parcial. La mezcla 3 alcanzó un TSR de 87% con saturación entre 55–60% y de 80% con saturación entre 70–75%, mostrando una disminución de 7 puntos porcentuales. La mezcla patrón (mezcla 1) disminuyó de 78% a 70% (8 puntos), mientras que la mezcla 2 presentó la menor variación, pasando de 81% a 77% (4 puntos).

Al comparar los resultados de TSR de las mezclas 2 y 3 respecto a la mezcla patrón, se observa que el polvo roca de la planta 2 mejoró el TSR en 3 y 7 puntos porcentuales para las condiciones de saturación de 55–60 % y 70–75 %, respectivamente. Por su parte, el polvo roca de la planta 3 incrementó los valores de TSR en 9 y 10 puntos porcentuales bajo las mismas condiciones.

Evaluación Respecto a la Normativa Vigente

En cuanto al cumplimiento normativo, las mezclas que incorporan polvo roca de las plantas 2 y 3 cumplen con el requisito de TSR ≥ 75% en ambas condiciones de saturación parcial

evaluadas (55–60% y 70–75%). En contraste, la mezcla patrón (planta 1) solo alcanza el valor mínimo exigido en la primera condición de saturación.

Estudio Petrográfico

Con el objetivo de caracterizar la composición química de los áridos y evaluar su influencia en la adhesión betún–árido y la susceptibilidad al daño por humedad, se realizó un análisis químico mediante fluorescencia de rayos X (XRF) a tres muestras de polvo de roca provenientes de la planta 1, planta 2 y planta 3.

La naturaleza química de los áridos incide directamente en su afinidad con el ligante asfáltico. En general, los materiales con alto contenido de sílice ($SiO_2 > 65\%$) presentan un carácter ácido e hidrófilo, lo que puede dificultar la adherencia con el betún. Por el contrario, los áridos con alto contenido de óxidos de calcio (CaO) y bajo contenido de sílice ($SiO_2 < 52\%$) tienden a ser más básicos e hidrófobos, favoreciendo la adhesión y reduciendo la susceptibilidad al desprendimiento (Valentín y otros, 2021).

Desde el punto de vista funcional, el SiO_2, presente principalmente como cuarzo, aporta dureza y resistencia al desgaste. El Al_2O_3 mejora la adherencia entre el árido y el ligante, contribuyendo a la resistencia al ahuellamiento. El CaO, por su carácter alcalino, refuerza la adhesión y disminuye la vulnerabilidad al daño por humedad, siendo la relación CaO/SiO_2 un indicador de la resistencia al desprendimiento. Asimismo, el Fe_2O_3 aporta rigidez y resistencia a la abrasión, influyendo en el desempeño mecánico de la mezcla. (Rondón Quintana y otros, 2018).

A continuación, en la Tabla 26 se detallan las concentraciones (%) de los óxidos presentes en las muestras de polvo roca correspondientes a las plantas 1, 2 y 3, según los resultados del análisis químico.

Tabla 26

Resultados de Análisis Químico a Polvos Roca.

Analito	Unidad	M-1 Polvo Roca Planta 1	M-1 Polvo Roca Planta 2	M-1 Polvo Roca Planta 3
Al2O3	%	12,11	12,41	11,60
As2O3	%	0,03	0,03	0,03
BaO	%	0,30	0,33	0,28
CaO	%	4,02	4,38	3,27
CdO	%	0,02	0,02	0,02
Cl	%	0,10	0,13	0,10
CoO	%	0,03	0,03	0,03
Cr2O3	%	0,03	0,03	0,03
CuO	%	0,03	0,03	0,04
Fe2O3	%	6,09	8,05	5,66
K2O	%	1,86	1,78	1,87
MgO	%	2,09	2,42	1,53
MnO	%	0,13	0,13	0,12
MoO3	%	0,03	0,03	0,03
Na2O	%	4,30	4,50	4,49
NiO	%	0,03	0,03	0,03
P2O5	%	0,14	0,18	0,14
PbO	%	0,05	0,05	0,05
SO3	%	0,12	0,05	0,22
SiO2	%	36,85	34,45	38,75
SnO2	%	0,04	0,04	0,04
SrO	%	0,06	0,06	0,05
Tl2O3	%	0,73	0,77	0,72
V2O5	%	0,04	0,05	0,04
ZnO	%	0,02	0,02	0,02
ZrO2	%	0,04	0,03	0,04

Como se observa en el Gráfico 7, Gráfico 8 y Gráfico 9, el óxido predominante en las tres muestras de polvo roca es el dióxido de silicio (SiO_2), mientras que los niveles de óxido de calcio (CaO) son relativamente bajos. Sin embargo, en todos los casos, el contenido de SiO_2 es inferior al 52%.

Gráfico 7

Concentraciones de Óxidos en Polvo Roca Proveniente de la Planta 1.

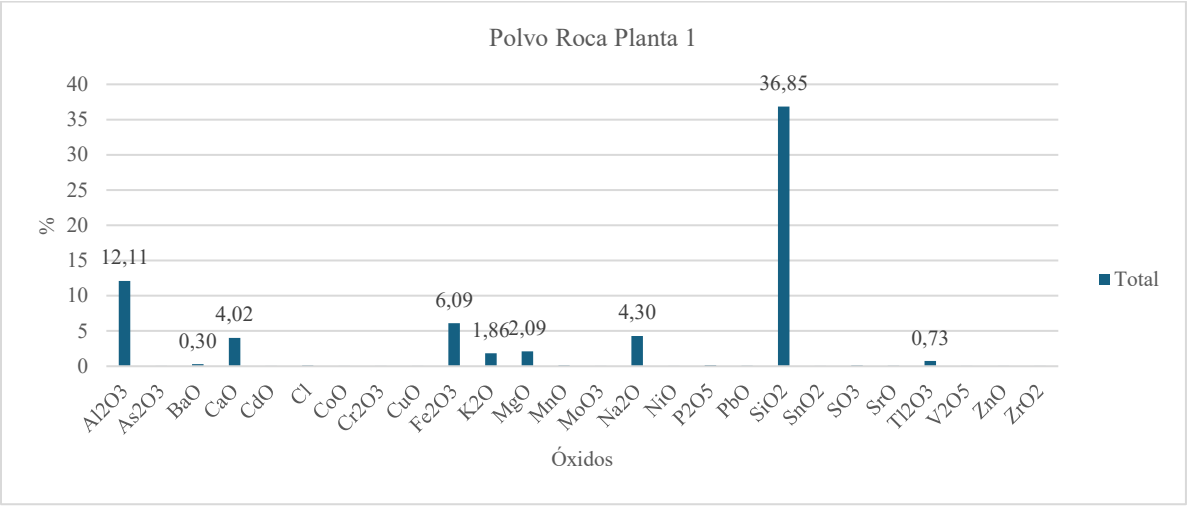


Gráfico 8

Concentraciones de Óxidos en Polvo Roca Proveniente de la Planta 2.

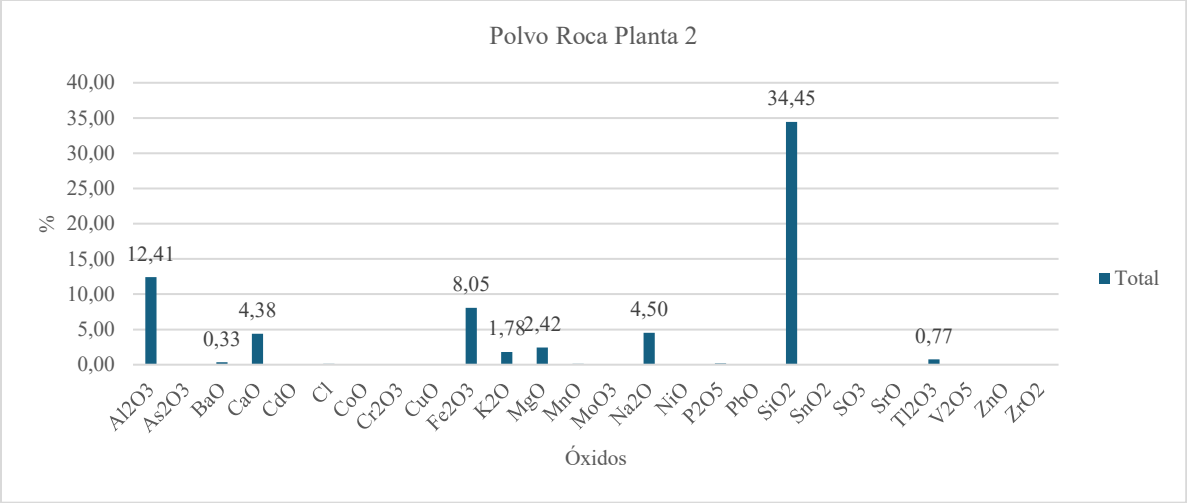


Gráfico 9

Concentraciones de Óxidos en Polvo Roca Proveniente de la Planta 3.

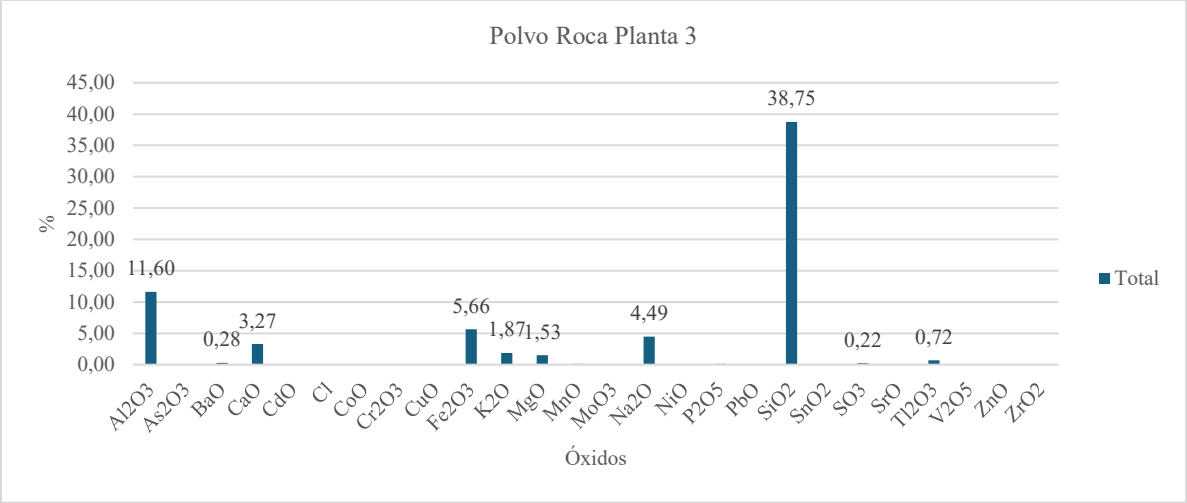
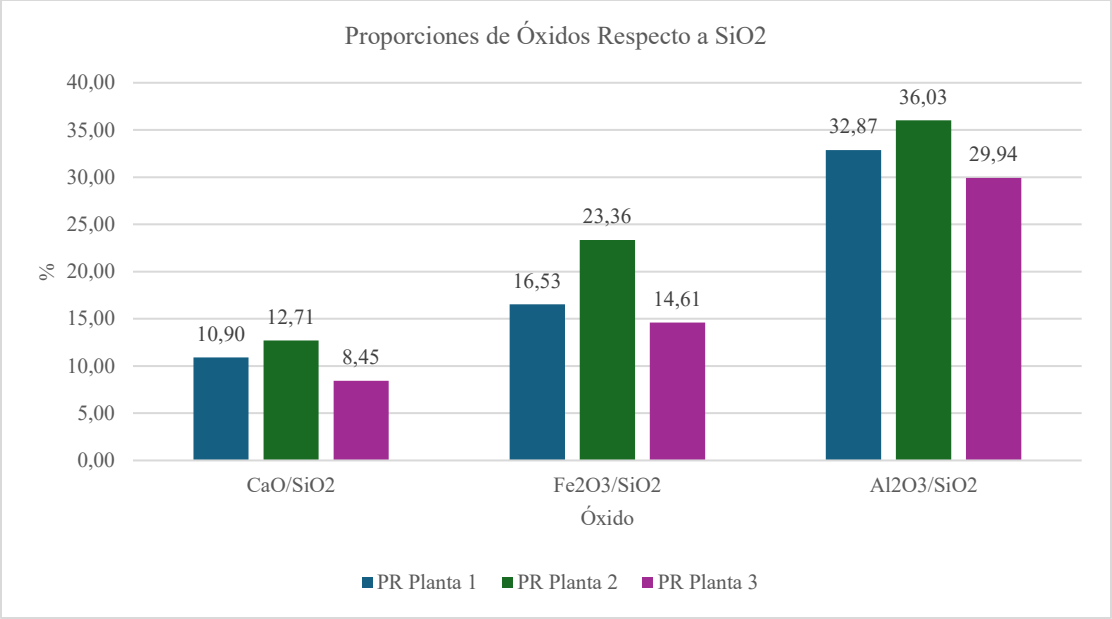


Gráfico 10

Proporciones de Óxidos con Respecto al Contenido de SiO2.



La muestra de polvo roca proveniente de la planta 3 presenta el mayor contenido de sílice (38,75%) entre las tres analizadas. Según el Gráfico 10, esta muestra también exhibe la menor proporción de CaO respecto al SiO_2 (8,45%), una proporción de Fe_2O_3/SiO_2 de 14,61%, y una proporción de Al2O3/SiO2 de 29,94%, todas inferiores a las observadas en las otras plantas.

En contraste, la muestra de polvo roca proveniente de la planta 2 presenta el contenido más bajo de dióxido de silicio (SiO_2), con un 34,45%. Además, exhibe las mayores proporciones relativas de CaO/SiO_2 (12,71%), Fe_2O_3/SiO_2 (23,36%) y Al_2O_3/SiO_2 (36,03%).

Finalmente, la muestra de polvo roca de la planta 1 presenta un contenido de dióxido de silicio de 36,85%. Sus proporciones relativas de óxidos son: CaO/SiO_2 de 10,91%, Fe_2O_3/SiO_2 de 16,53% y Al_2O_3/SiO_2 de 32,87%, valores intermedios en comparación con las otras dos muestras.

Resultados del Módulo de Rigidez

A continuación, en la Tabla 27, se presentan los resultados de Módulo de Rigidez para los subconjuntos secos de las tres mezclas. Las probetas fueron ensayadas a 15 °C y 20 °C.

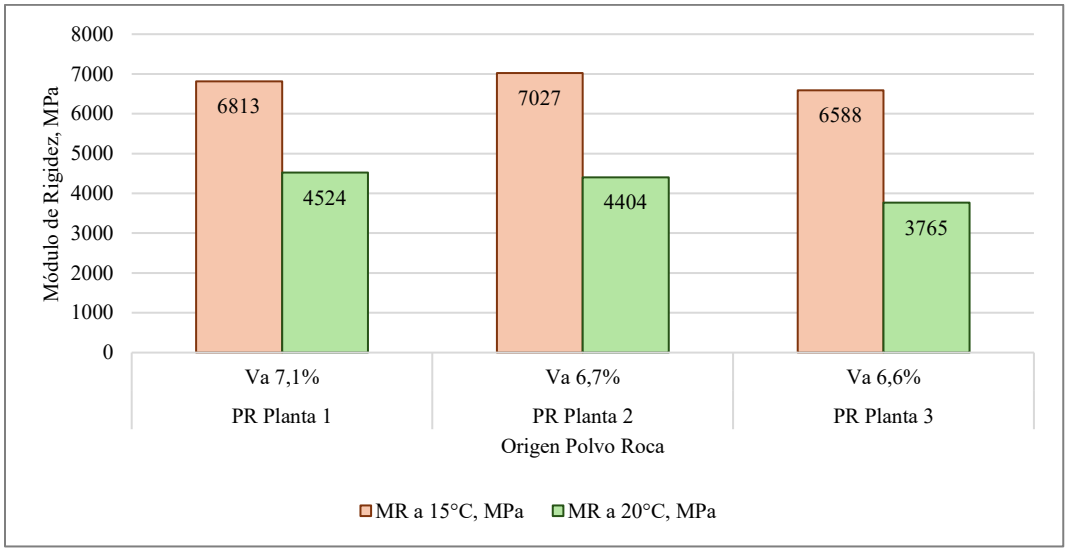
Tabla 27

Resultados de Ensayo de Módulo de Rigidez a Probetas del Subconjunto Seco.

Dosificación	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3
Vacíos, %	Va 7,1%	Va 6,7%	Va 6,6%
S1, kPa	6160	7277	6556
S2, kPa	6559	6809	6704
S3, kPa	6930	6996	5972
S4, kPa	7601		7120
MR a 15°C, MPa	6813	7027	6588
ds, MPa	613	236	475
IC 95%, MPa	600	267	466
S1, kPa	4394	4087	3301
S2, kPa	4264	4479	3832
S3, kPa	4606	4645	3606
S4, kPa	4832		4320
MR a 20°C, MPa	4524	4404	3765
ds, MPa	249	287	429
IC 95%, MPa	244	324	421

Gráfico 11

Resultados Módulos de Rigidez a 15 °C y 20 °C.



Como se aprecia en el Gráfico 11, a una temperatura de 15 °C, la mezcla 2 registró el mayor módulo de rigidez (7027 MPa), seguida por la mezcla 1 (6813 MPa) y la mezcla 3 (6588 MPa). Al aumentar la temperatura a 20 °C, se observó una disminución generalizada en los valores de rigidez para todas las mezclas, específicamente la mezcla 1 disminuyó un 34%, la mezcla 2 un 37% y la mezcla 3 un 43%, lo cual coincide con el comportamiento esperado de los materiales asfálticos ante el incremento de temperatura.

En cuanto a la variabilidad de los datos, la mezcla 2 presentó la mayor consistencia a 15 °C, con la desviación estándar e intervalo de confianza más bajos (236 MPa y 267 MPa, respectivamente). En contraste, la mezcla 1 mostró la mayor dispersión (613 MPa y 600 MPa). A 20 °C, la mezcla 1 fue la más estable, mientras que la mezcla 3 evidenció la mayor variabilidad.

Con respecto a la relación que podría existir entre la resistencia a la tracción indirecta de los subconjuntos secos con los resultados del ensayo de Módulo de Rigidez, encontramos que la mezcla con polvo roca de la planta 3 presentó la mayor resistencia seca (930 kPa), pero tuvo el menor Módulo de Rigidez a 15°C (6588 Mpa), en cambio, la mezcla 2, con la menor resistencia seca (829 kPa) obtuvo el mayor Módulo de Rigidez a 15 °C (7027 Mpa). La mezcla con polvo roca proveniente de la planta 1 aunque no tuvo la mayor resistencia seca, mostró la mayor estabilidad térmica al presentar la menor caída de sus valores de rigidez (34%).

Conclusiones y Recomendaciones

En base al análisis de los resultados obtenidos y a los objetivos planteados, se pueden establecer las siguientes conclusiones respecto al comportamiento de las mezclas asfálticas frente al daño por humedad, considerando el reemplazo de polvo roca y la variación en los niveles de saturación parcial.

Objetivo General

El reemplazo de la fracción fina de la mezcla patrón (mezcla 1), por polvo roca proveniente de la planta 2 y planta 3 generó variaciones considerables en los valores de TSR. En particular, la mezcla 3 obtuvo la mayor resistencia a la humedad en las dos condiciones de saturación parcial analizadas. Mientras que la mezcla patrón (mezcla 1) obtuvo el menor desempeño en ambas condiciones de saturación parcial. Esto indica que las características del polvo roca en las mezclas influye significativamente en el comportamiento final que tendrá esta frente a la humedad, sugiriendo a la vez, la necesidad incorporar aditivos mejoradores de adherencia en el caso de la planta 1, o bien, evaluar el reemplazo a nivel industrial de la fracción fina por polvo roca proveniente de otras zonas geográficas de Chile.

Objetivo Específico 1

Al comparar los subconjuntos de probetas con saturación parcial entre 55-60 % y aquellas con saturación entre 70-75%, se observó una disminución en los valores de TSR en todas las mezclas. Por ejemplo, en la mezcla patrón, el TSR disminuyó de 78% a 70%, lo que representa una disminución de -8%, seguida por la mezcla 3 (-7%) y la mezcla 2 (-4%), siendo esta última la que presentó una mayor estabilidad frente al efecto de la humedad. Estos resultados confirman que un mayor nivel de saturación intensifica la susceptibilidad al daño por humedad de los pavimentos asfálticos. En otras palabras, pavimentos expuestos a mayores tasas

de precipitación o humedad ambiental serían más susceptibles a sufrir desprendimiento, debido a la pérdida de adhesión entre el ligante y los áridos.

Objetivo Específico 2

La caracterización física se enfocó principalmente en los áridos que componen la mezcla patrón, para los cuales se determinaron propiedades como su granulometría, densidad real seca, absorción de asfalto, vacíos en el agregado mineral (VAM), entre otros. En el caso de los áridos provenientes de la planta 2 y planta 3 únicamente se evaluó su granulometría debido a la disponibilidad de material, lo que limitó la comparación de sus propiedades físicas.

En cuanto al análisis químico de los polvos de roca, se identificaron como principales componentes los óxidos de silicio (SiO_2), calcio (CaO), aluminio (Al_2O_3) y hierro (Fe_2O_3). Destaca la mezcla 2, cuyo polvo de roca presentó el menor contenido de SiO_2 y la mayor relación CaO/SiO_2, lo que influye positivamente en su interacción con el ligante asfáltico. La mezcla 1, en tanto, mostró una composición más equilibrada, mientras que la mezcla 3 presentó una mayor proporción de sílice, lo que estaría asociado a una menor afinidad con el asfalto.

Objetivo Específico 3

El análisis del desempeño de las mezclas frente al daño por humedad evidenció diferencias atribuibles al origen geográfico del polvo roca incorporado. Todas las mezclas cumplieron con el requisito mínimo de 75% de resistencia al daño por humedad (TSR) en la primera condición de saturación (55%-60%), no así en la segunda (70%-75%), ya que la mezcla patrón no alcanzó el mínimo exigido. La mezcla 3 obtuvo los valores de TSR más altos, lo que indica una mayor resistencia a la separación entre el árido y el asfalto, aunque también presentó la mayor variación entre ambas condiciones de saturación sugiriendo una mayor susceptibilidad en ambientes con altos niveles de humedad. En contraste, la mezcla 2 mostró un comportamiento

estable, con una diferencia mínima entre ambas condiciones. Finalmente, la mezcla 1 fue la más afectada por el aumento de la saturación, siendo la mezcla más propensa a la pérdida de adherencia entre el asfalto y el agregado.

Además, se evaluó el módulo de rigidez de las mezclas a 15 °C y 20 °C como complemento al análisis del desempeño mecánico. A 15 °C, la mezcla 2 presentó el mayor valor de rigidez, seguida por las mezclas 1 y 3, lo que sugiere una mayor resistencia a la deformación en condiciones de baja temperatura. Al aumentar la temperatura a 20 °C, todas las mezclas mostraron una disminución en su rigidez, siendo la mezcla 3 la más afectada, con una caída del 43%, le sigue la mezcla 2 con una caída del 37% y la mezcla 1 con una caída de 34%, siendo esta última la mezcla más estable frente a los cambios de temperatura. Sin embargo, la mezcla 2 presentó el valor más alto de rigidez a 15°C, y a 20°C, alcanzó un valor intermedio.

Se concluyó, además, que existe una relación inversa entre el módulo de rigidez y la resistencia a la tracción indirecta de las probetas que se ensayaron secas, ya que la mezcla que tuvo la menor resistencia alcanzó valores de rigidez más elevados en comparación a las otras mezclas. Si bien esto quiere decir que la mezcla 2 es menos propensa a sufrir ahuellamiento debido a las cargas del tráfico, también significa que es una mezcla más frágil y, por lo tanto, propensa a la fatiga.

Si bien no se logró caracterizar completamente los polvo roca provenientes de la planta 2 y planta 3, el método de ensayo TSR permitió obtener la densidad máxima de la mezcla suelta (Dmm) para cada una de las mezclas, lo que, junto con la densidad hidrostática de las probetas, permitió calcular el porcentaje de vacíos alcanzado tras la compactación. Si bien todas las mezclas se ajustaron para cumplir con el rango normativo de vacíos (6%–8%), se observaron diferencias en el número de golpes necesarios para alcanzar dicho rango, lo que entrega

información indirecta sobre la trabajabilidad y compactabilidad de cada mezcla. En particular, la mezcla 2 requirió 26 para alcanzar un 6,8% de vacíos, mientras que la mezcla 3 necesitó 34 golpes para llegar a un 6,6%, lo que sugiere una mayor resistencia a la compactación. Estos resultados, nos entregan indicios sobre las diferencias físicas que presentan estos áridos. Partículas con formas angulosas y rugosas generan una mejor trabazón, aumentando la estabilidad de la mezcla y facilitando su compactación. En cambio, partículas más redondeadas y lisas generan una mezcla plástica donde las partículas se deslizan por la mezcla y dificultan el proceso de compactación.

Finalmente, tanto el origen del polvo roca como el nivel de saturación de las mezclas influyen de manera significativa en su desempeño frente al daño por humedad. En particular, el polvo roca proveniente de la planta 2 mejoró la resistencia de la mezcla patrón bajo condiciones normales y extremas de saturación, manteniendo un comportamiento relativamente estable en ambas situaciones.

Considerando la composición química de cada polvo roca y los resultados del ensayo de módulo de rigidez de las mezclas, se puede afirmar que la resistencia al daño por humedad no depende únicamente del origen geográfico del polvo roca y del nivel de humedad al que está expuesta la mezcla, sino que también influyen factores físicos, químicos y mecánicos, tanto de los materiales que la constituyen como de la mezcla en su conjunto. En este contexto, la mezcla asfáltica con polvo roca proveniente de la planta 2 presentó una composición química favorable (alta relación CaO/SiO_2), alta resistencia a la deformación, baja variabilidad de rigidez frente al aumento de temperatura, y buena compactación, lo que convierte a este polvo roca en un material con potencial para mejorar la adherencia betún-árido en mezclas asfálticas.

Ante la escasez de áridos de río en Chile, se recomienda considerar el uso de áridos de cantera y reciclados (como RAP y escorias mineras), para evaluar su impacto en la resistencia al daño por humedad de las mezclas asfálticas en caliente.

Se recomienda evaluar el uso de aditivos mejoradores de adherencia que mejoren la interacción árido- ligante en la mezcla asfáltica de la planta 1.

Se recomienda evaluar el impacto ambiental y económico del uso de polvo roca proveniente de distintas zonas geográficas de Chile, como mejorador de adherencia en mezclas asfálticas en caliente. Al mismo tiempo, se sugiere comparar la eficacia de dicho material frente a la de aditivos comerciales para determinar la viabilidad técnica y económica de optar por uno u otro en función de su desempeño y disponibilidad regional.

Se sugiere ampliar el análisis petrográfico a todos los áridos que conforman la mezcla asfáltica, con el fin de obtener una caracterización más completa de sus propiedades mineralógicas y su influencia en el comportamiento de la mezcla.

Referencias

AASHTO T 165. (2006). *Standad Method of Test for Effect of Water on Cohesion of Compacted Bituminous Mixtures.* American Association of State Highway and Transportation Officials.

AASHTO T 283. (2011). *Standard Method of Test for Resistance of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) to Moisture-Induced Damage.* American Association of State Highway and Transportation Officials.

AASHTO T 324. (2023). *Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA).*

Aphalt Institute. (2020). *MS-22: Construction of Quality Asphalt Pavements* (third edition ed.).

Asphalt Institute. (2007). *MS-24: Moisture Sensitivity.*

ASTM D4867. (2014). *Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures.*

Bhasin, A. (2007). *Development of Methods to Quantify Bitumen-Aggregate Adhesion and Loss of Adhesion due to Water (Doctoral Dissertation).* Texas A&M University.

Brown, E. R., S. Kandhal, P., & Zhang, J. (2001). *Performance Testing for Hot Mix Asphalt.* National Center for Asphalt Technology.

Curtis, C. W., Ensley, K., & Epps, J. (1993). *Fundamental properties of asphalt-aggregate interactions including adhesion and absorption*.

Dirección de Vialidad. (2023). Manual de Carreteras. En *Especificaciones y Métodos de Muestreo, Ensaye y Control.* (Vol. 8).

Dirección de Vialidad. (2023). Manual de Carreteras. En *Especificaciones Técnicas Generales de Construcción* (Vol. 5).

Dirección de Vialidad. (2023). *Red Vial Nacional 2023: Dimensionamiento y Características*. Subdirección de Desarrollo.

Fromm, H. J. (1974). The Mechanisms of Asphalt Stripping From Aggregate surfaces. *Association of Asphalt Technologists*.

Hefer , A., Lytton, R. L., & Little, D. (2005). *A Synthesis of Theories and Mechanisms of Bitumen-Aggregate Adhesion Including Recent Advances in Quantifying the Effects of Water.* Association of Asphalt Paving Technologists.

Hicks, R. G. (1991). *Moisture Damage in Asphalt Concrete.* National Cooperative Highway Research Program.

Jamieson, I. L., Moulthrop, J. S., & Jones, D. R. (1995). *SHRP Results on Binder-Aggregate Adhesion and Resistance to Stripping.* Institute of Asphalt Technology.

Kiggundu, B. M., & Roberts, F. L. (1988). *Stripping in HMA mixtures: State-of-the-art and critical review of test methods.* NCAT.

Laboratorio Nacional de Vialidad, Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas. (2000). *Curso de Laboratorista Vial, Ligantes Asfálticos y Sellos de Juntas* (Vol. Volumen IV).

McBain, J. W., & Hopkins, D. G. (1925). On Adhesives and Adhesive Action. *The Journal of Physical Chemistry, Vol.29(2)*.

Plancher, H., Dorrence, S. M., & Petersen, J. C. (1977). *Identification of Chemical Types in Asphats Strongly Adsorbed at the Asphalt-Aggregate Interface and Their Relative Displacement by Water.* Association of Asphalt Paving Technologists.

Rondón Quintana, H. A., Muniz de Farias, M., & Reyes Lizcano, F. A. (2018). Uso de escorias de alto horno y acero en mezclas asfálticas: revisión. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín, 17*. https://doi.org/https://doi.org/10.22395/rium.v17n33a4

Schultz, J., & Nardin, M. (1999). *Theories and Mechanisms of Adhesion.* L'Institut de Chimie des Surfaces et Interfaces.

Scott, J. (1978). Adhesion and disbonding mechanisms of asphalt used in highway construction and maintenance.

Servicio Nacional de Geología y Minería. (2024). *Recursos Minerales*. Obtenido de https://www.sernageomin.cl/recursos-minerales/#:~:text=Rocas%20y%20Minerales%20Industriales%20(RMI)&text=Entre%20los%20recursos%20de%20RMI,%2C%20apatita%2C%20zeolitas%20y%20perlita.

Tarbuck, E. J., Lutgens, F. K., & Tasa, D. (2005). *Ciencas de la Tierra: Una Introducción a la Geología Física*. Pearson Educación S.A.

Tarrer, A. R., & Wagh, V. (1991). *The Effect of the Physical and Chemical Characteristics of the Aggregate on Bonding*. Strategic Highway Research Program.

Terrel, R. L., & Al-Swailmi, S. (1994). *Water Sensitivity of Asphalt-Aggregate Mixes: Test Selecion*. Strategic Highway Research Program.

UNE-EN 12697-26. (2006). *Mezclas Bituminosas: Métodos de Ensayo para Mezcla Bituminosa en Caliente. Parte 26: Rigidez*.

Valentín, J., Trejbal, J., Nezerka, V., Valentová, T., & Faltus, M. (2021). Characterization of quarry dusts and industrial by-products as potential substitutes for traditional fillers and their impact on water susceptibility of asphalt concrete. *Elsevier*, 15. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124294

Anexos

Anexo A

Datos TSR Planta 1 + PR planta 1 (Mezcla Patrón).

N° BRIQUETAS	**7**	**10**	**12**	**14**	**6**	**15**	**16**	**21**	**11**	**18**	**19**	**20**	**6**	**15**	**16**	**21**
% asfalto T (ag.)	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10
% asfalto T (r.m.)	4,85	4,85	4,85	4,85	4,85	4,85	4,85	4,85	4,85	4,85	4,85	4,85	4,85	4,85	4,85	4,85
% asfalto inyectado	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10
Peso áridos (g)	1130,20	1130,40	1129,90	1130,00	1130,00	1129,70	1129,80	1129,50	1130,80	1130,00	1130,00	1129,70	1130,00	1129,70	1129,80	1129,50
Peso asfalto (g)	57,64	57,65	57,62	57,63	57,63	57,61	57,62	57,60	57,67	57,63	57,63	57,61	57,63	57,61	57,62	57,60
Total mezcla (g)	1187,84	1188,05	1187,52	1187,63	1187,63	1187,31	1187,42	1187,10	1188,47	1187,63	1187,63	1187,31	1187,63	1187,31	1187,42	1187,10
Diámetro (cm)	10,16	10,17	10,17	10,16	10,17	10,17	10,17	10,17	10,17	10,17	10,17	10,18	10,17	10,17	10,17	10,17
Altura (cm)	6,44	6,50	6,50	6,47	6,47	6,49	6,47	6,49	6,47	6,53	6,49	6,48	6,47	6,49	6,47	6,49
Peso aire (A) (g)	1179,20	1172,40	1179,50	1177,90	1179,00	1179,40	1179,30	1177,80	1177,00	1179,50	1178,50	1179,30	1179,00	1179,40	1179,30	1177,80
Peso agua (C) (g)	678,90	675,40	679,60	677,80	679,00	678,50	681,60	678,80	677,30	680,50	679,70	678,70	679,00	678,50	681,60	678,80
Peso s.s.s. (B) (g)	1185,90	1180,30	1185,50	1183,80	1184,40	1186,30	1186,90	1187,00	1182,60	1187,10	1186,00	1186,60	1184,40	1186,30	1186,90	1187,00
Volumen (B-C) (cm3)	507,00	504,90	505,90	506,00	505,40	507,80	505,30	508,20	505,30	506,60	506,30	507,90	505,40	507,80	505,30	508,20
Promedio	505,95				506,68				506,53				506,68			
% Absorción de agua	1,32	1,56	1,19	1,17	1,07	1,36	1,50	1,81	1,11	1,50	1,48	1,44	1,07	1,36	1,50	1,81
Densidad agua (g/cm3)	0,9971	0,9971	0,9971	0,9971	0,9971	0,9971	0,9971	0,9971	0,9971	0,9971	0,9971	0,9971	0,9971	0,9971	0,9971	0,9971
Volumen geométrico (cm3)	522,11	528,01	528,01	524,54	525,58	527,20	525,58	527,20	525,58	530,45	527,20	527,42	525,58	527,20	525,58	527,20
Volumen hídrico (cm3)	508,47	506,37	507,37	507,47	506,87	509,28	506,77	509,68	506,77	508,07	507,77	509,38	506,87	509,28	506,77	509,68
Área (mm2)	8107,32	8123,29	8123,29	8107,32	8123,29	8123,29	8123,29	8123,29	8123,29	8123,29	8123,29	8139,27	8123,29	8123,29	8123,29	8123,29
Densidad geométrica (g/cm3)	2,26	2,22	2,23	2,25	2,24	2,24	2,24	2,23	2,24	2,22	2,24	2,24	2,24	2,24	2,24	2,23
Promedio d. g (g/cm3)	2,24								2,24							
Densidad hidrostática (g/cm3)	2,32	2,32	2,32	2,32	2,33	2,32	2,33	2,31	2,32	2,32	2,32	2,32	2,33	2,32	2,33	2,31
Promedio d. h (g/cm3)	2,32								2,32							
N° GOLPES	**30 golpes / cara**				**30 golpes / cara**				**30 golpes / cara**				**30 golpes / cara**			
DMM	2498,00				2498,00				2498,00				2498,00			
% Huecos geométricos	9,57	11,10	10,56	10,09	10,18	10,43	10,16	10,55	10,33	10,97	10,49	10,47	10,18	10,43	10,16	10,55
Promedio	10,33				10,33				10,57				10,33			
% Huecos hidrostáticos	7,14	7,29	6,92	7,06	6,87	7,27	6,82	7,47	7,00	7,05	7,07	7,30	6,87	7,27	6,82	7,47
Promedio	7,10				7,11				7,11				7,11			
Volumen vacíos de aire	36,22	36,83	35,00	35,74	34,70	36,94	34,48	37,98	35,40	35,70	35,80	37,08	34,70	36,94	34,48	37,98
Promedio	35,95				36,02				35,99				36,02			
SATURACIÓN PARCIAL	**55 % ~ 60%**								**70 % ~ 75%**							
P. agua (C')	693,40	687,20	693,00	692,80					692,40	701,80	697,60	698,90				

P.s.s.s. (B')	1199,80	1194,10	1199,70	1198,50					1201,90	1206,50	1204,00	1205,30				
Volumen (B'-C')	506,40	506,90	506,70	505,70					509,50	504,70	506,40	506,40				
Volumen de agua absorbido	20,60	21,70	20,20	20,60					24,90	27,00	25,50	26,00				
% Saturación	56,88	58,92	57,72	57,64					70,35	75,64	71,24	70,12				
Promedio	**57,79**								**71,84**							
% Hinchamiento	-0,12	0,40	0,16	-0,06					0,83	-0,38	0,02	-0,30				
Promedio	0,09								0,05							
ACONDICIONAMIENTO	**AGUA A 60°C X 24 HORAS**				**AIRE A 25°C X 24 HORAS**				**AGUA A 60°C X 24 HORAS**				**AIRE A 25°C X 24 HORAS**			
Altura (cm)					6,47	6,49	6,47	6,49					6,47	6,49	6,47	6,49
Diámetro (cm)					10,17	10,17	10,17	10,17					10,17	10,17	10,17	10,17
P. agua (C")	698,50	692,70	699,20	698,60					701,40	703,70	701,80	704,30				
P.s.s.s. (B")	1207,80	1203,60	1207,40	1207,40					1208,60	1211,70	1209,00	1211,20				
Volumen (B"-C")	509,30	510,90	508,20	508,80					507,20	508,00	507,20	506,90				
Volumen absol. agua	28,60	31,20	27,90	29,50					31,60	32,20	30,50	31,90				
% Saturación	78,97	84,71	79,72	82,55					89,28	90,20	85,20	86,04				
Promedio	81,49								87,68							
% Hinchamiento	0,45	1,19	0,45	0,55					0,38	0,28	0,18	-0,20				
Promedio	0,66								0,16							
ACONDICIONAMIENTO	**AGUA A 25°C X 1 HORA**				**AGUA A 25°C X 20 MIN.**				**AGUA A 25°C X 1 HORA**				**AGUA A 25°C X 20 MIN.**			
Altura T Ind. (cm)	6,44	6,50	6,50	6,47	6,47	6,49	6,47	6,49	6,47	6,53	6,49	6,48	6,47	6,49	6,47	6,49
Diámetro T Ind. (cm)	10,16	10,17	10,17	10,16	10,17	10,17	10,17	10,17	10,17	10,17	10,17	10,18	10,17	10,17	10,17	10,17
Trac Ind. (kPa)	779,39	688,71	688,71	648,76	901,68	903,25	932,22	855,38	648,12	603,10	659,22	615,90	901,68	903,25	932,22	855,38
Promedio	701,39				898,14				631,59				898,14			
TSR (i/C)	**78,09**								**70,32**							

Anexo B

Datos TSR Planta 1 + PR Planta 2.

N° BRIQUETAS	**11**	**17**	**18**	**14**	**15**	**16**	**10**	**30 II**	**13**	**14**	**15**	**16**
% asfalto T (ag.)	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10
% asfalto T (r.m.)	4,85	4,85	4,85	4,85	4,85	4,85	4,85	4,85	4,85	4,85	4,85	4,85
% asfalto inyectado	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10
Peso áridos (g)	1128,50	1128,20	1128,70	1128,50	1128,50	1128,10	1129,40	1129,20	1128,20	1128,50	1128,50	1128,10
Peso asfalto (g)	57,55	57,54	57,56	57,55	57,55	57,53	57,60	57,59	57,54	57,55	57,55	57,53
Total mezcla (g)	1186,05	1185,74	1186,26	1186,05	1186,05	1185,63	1187,00	1186,79	1185,74	1186,05	1186,05	1185,63
Diámetro (cm)	10,19	10,19	10,17	10,16	10,17	10,17	10,19	10,17	10,18	10,16	10,17	10,17
Altura (cm)	6,48	6,49	6,50	6,51	6,55	6,50	6,49	6,47	6,48	6,51	6,55	6,50
Peso aire (g)	1178,10	1179,00	1180,70	1179,30	1178,80	1176,70	1177,10	1179,90	1176,50	1179,30	1178,80	1176,70
Peso agua (C) (g)	681,50	682,60	682,70	683,50	681,90	683,50	681,20	683,20	681,20	683,50	681,90	683,50
Peso s.s.s. (B) (g)	1184,10	1185,30	1186,90	1186,10	1186,10	1184,50	1183,30	1186,40	1183,20	1186,10	1186,10	1184,50
Volumen (B-C) (cm3)	502,60	502,70	504,20	502,60	504,20	501,00	502,10	503,20	502,00	502,60	504,20	501,00
Promedio	503,17			502,60			502,43			502,60		
% Absorción de agua	1,19	1,25	1,23	1,35	1,45	1,56	1,23	1,29	1,33	1,35	1,45	1,56
Densidad agua (g/cm3)	0,9971	0,9971	0,9971	0,9971	0,9971	0,9971	0,9971	0,9971	0,9971	0,9971	0,9971	0,9971
Volumen geométrico (cm3)	528,46	529,28	528,01	527,79	532,08	528,01	529,28	525,58	527,42	527,79	532,08	528,01
Volumen hídrico (cm3)	504,06	504,16	505,67	504,06	505,67	502,46	503,56	504,66	503,46	504,06	505,67	502,46
Área (mm2)	8155,27	8155,27	8123,29	8107,32	8123,29	8123,29	8155,27	8123,29	8139,27	8107,32	8123,29	8123,29
Densidad geométrica (g/cm3)	2,23	2,23	2,24	2,23	2,22	2,23	2,22	2,24	2,23	2,23	2,22	2,23
Promedio d. g (g/cm3)	2,23						2,23					
Densidad hidrostática (g/cm3)	2,34	2,34	2,33	2,34	2,33	2,34	2,34	2,34	2,34	2,34	2,33	2,34
Promedio d. h (g/cm3)	2,34						2,34					
N° GOLPES	**26 golpes / cara**			**26 golpes / cara**			**26 golpes / cara**			**26 golpes / cara**		
DMM	2506,50			2506,50			2506,50			2506,50		
% Huecos geométricos	11,06	11,13	10,79	10,85	11,61	11,09	11,27	10,43	11,01	10,85	11,61	11,09
Promedio	10,99			11,19			10,90			11,19		
% Huecos hidrostáticos	6,75	6,70	6,84	6,66	6,99	6,57	6,74	6,72	6,77	6,66	6,99	6,57
Promedio	6,77			6,74			6,74			6,74		
Volumen vacíos de aire	33,95	33,69	34,51	33,47	35,27	32,90	33,84	33,83	33,98	33,47	35,27	32,90
Promedio	34,05			33,88			33,88			33,88		
SATURACIÓN PARCIAL	**55 % ~ 60%**						**70 % ~ 75%**					
P. agua (C')	694,30	694,40	697,90				699,80	692,00	697,20			
P.s.s.s. (B')	1197,20	1199,10	1200,90				1201,00	1204,80	1201,20			
Volumen (B'-C')	502,90	504,70	503,00				501,20	512,80	504,00			

Volumen de agua absorbido	19,10	20,10	20,20				23,90	24,90	24,70			
% Saturación	56,27	59,67	58,53				70,62	73,61	72,69			
Promedio	**58,16**						**72,30**					
% Hinchamiento	0,06	0,40	-0,24				-0,18	1,91	0,40			
Promedio	0,07						0,71					
ACONDICIONAMIENTO	**AGUA A 60°C X 24 HORAS**			**AIRE A 25°C X 24 HORAS**			**AGUA A 60°C X 24 HORAS**			**AIRE A 25°C X 24 HORAS**		
Altura (cm)				6,51	6,55	6,50				6,51	6,55	6,50
Diámetro (cm)				10,16	10,17	10,17				10,16	10,17	10,17
P. agua (C")	701,10	700,50	703,00				702,40	697,60	702,90			
P.s.s.s. (B")	1203,90	1206,10	1207,00				1205,60	1208,90	1206,70			
Volumen (B"-C")	502,80	505,60	504,00				503,20	511,30	503,80			
Volumen absol agua	25,80	27,10	26,30				28,50	29,00	30,20			
% Saturación	76,01	80,45	76,21				84,21	85,73	88,87			
Promedio	77,55						86,27					
% Hinchamiento	0,04	0,58	-0,04				0,22	1,61	0,36			
Promedio	0,19						0,73					
ACONDICIONAMIENTO	**AGUA A 25°C X 1 HORA**			**AGUA A 25°C X 20 MIN.**			**AGUA A 25°C X 1 HORA**			**AGUA A 25°C X 20 MIN.**		
Altura T Ind (cm)	6,48	6,49	6,50	6,51	6,55	6,50	6,49	6,47	6,48	6,51	6,55	6,50
Diámetro T Ind (cm)	10,19	10,19	10,17	10,16	10,17	10,17	10,19	10,17	10,18	10,16	10,17	10,17
Trac Ind (kPa)	702,56	649,21	666,92	849,25	804,40	832,33	601,27	740,03	572,18	849,25	804,40	832,33
Promedio	672,90			828,66			637,83			828,66		
TSR (i/C)	**81,20**						**76,97**					

Anexo C

Datos TSR Planta 1 + PR Planta 3.

N° BRIQUETAS	**20**	**21**	**22**	**23**	**24**	**26**	**29**	**25**	**27**	**28**	**23**	**24**	**26**	**29**
% asfalto T (ag.)	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10
% asfalto T (r.m.)	4,85	4,85	4,85	4,85	4,85	4,85	4,85	4,85	4,85	4,85	4,85	4,85	4,85	4,85
% asfalto inyectado	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10
Peso áridos (g)	1129,60	1129,40	1128,90	1129,00	1129,40	1128,90	1129,00	1129,20	1129,20	1129,40	1129,00	1129,40	1128,90	1129,00
Peso asfalto (g)	57,61	57,60	57,57	57,58	57,60	57,57	57,58	57,59	57,59	57,60	57,58	57,60	57,57	57,58
Total mezcla (g)	1187,21	1187,00	1186,47	1186,58	1187,00	1186,47	1186,58	1186,79	1186,79	1187,00	1186,58	1187,00	1186,47	1186,58
Diámetro (cm)	10,19	10,20	10,17	10,19	10,17	10,20	10,18	10,16	10,16	10,18	10,19	10,17	10,20	10,18
Altura (cm)	6,49	6,45	6,50	6,52	6,52	6,60	6,51	6,57	6,57	6,49	6,52	6,52	6,60	6,51
Peso aire (g)	1170,10	1176,80	1178,40	1178,50	1179,20	1178,40	1181,70	1179,30	1181,20	1179,60	1178,50	1179,20	1178,40	1181,70
Peso agua (C) (g)	669,10	676,30	676,60	676,10	678,60	675,40	679,70	675,90	679,30	676,50	676,10	678,60	675,40	679,70
Peso s.s.s. (B) (g)	1175,10	1181,70	1183,10	1183,70	1184,60	1186,50	1186,70	1185,20	1187,30	1183,70	1183,70	1184,60	1186,50	1186,70
Volumen (B-C) (cm3)	506,00	505,40	506,50	507,60	506,00	511,10	507,00	509,30	508,00	507,20	507,60	506,00	511,10	507,00
Promedio	505,97			507,93				508,17			507,93			
% Absorción de agua	0,99	0,97	0,93	1,02	1,07	1,58	0,99	1,16	1,20	0,81	1,02	1,07	1,58	0,99
Densidad agua (g/cm3)	0,9971	0,9971	0,9971	0,9971	0,9971	0,9971	0,9971	0,9971	0,9971	0,9971	0,9971	0,9971	0,9971	0,9971
Volumen geométrico (cm3)	529,28	527,05	528,01	531,72	529,64	539,30	529,87	532,65	532,65	528,24	531,72	529,64	539,30	529,87
Volumen hídrico (cm3)	507,47	506,87	507,97	509,08	507,47	512,59	508,47	510,78	509,48	508,68	509,08	507,47	512,59	508,47
Área (mm2)	8155,27	8171,28	8123,29	8155,27	8123,29	8171,28	8139,27	8107,32	8107,32	8139,27	8155,27	8123,29	8171,28	8139,27
Densidad geométrica (g/cm3)	2,21	2,23	2,23	2,22	2,23	2,19	2,23	2,21	2,22	2,23	2,22	2,23	2,19	2,23
Promedio d. g (g/cm3)	2,22							2,22						
Densidad hidrostática (g/cm3)	2,31	2,32	2,32	2,31	2,32	2,30	2,32	2,31	2,32	2,32	2,31	2,32	2,30	2,32
Promedio d. h (g/cm3)	2,32							2,32						
N° GOLPES	**34 golpes / cara**			**34 golpes / cara**				**34 golpes / cara**			**34 golpes / cara**			
DMM	2478,50			2478,50				2478,50			2478,50			
% Huecos geométricos	10,80	9,91	9,96	10,58	10,17	11,84	10,02	10,67	10,53	9,90	10,58	10,17	11,84	10,02
Promedio	10,22			10,65				10,37			10,65			
% Huecos hidrostáticos	6,97	6,33	6,40	6,60	6,25	7,25	6,23	6,85	6,46	6,44	6,60	6,25	7,25	6,23
Promedio	6,57			6,58				6,58			6,58			
Volumen vacíos de aire	35,27	31,97	32,43	33,49	31,61	37,03	31,60	34,87	32,80	32,65	33,49	31,61	37,03	31,60
Promedio	33,22			33,43				33,44			33,43			
SATURACIÓN PARCIAL	**55 % ~ 60%**							**70 % ~ 75%**						
P. agua (C')	684,10	693,00	690,80					698,40	698,50	697,90				
P.s.s.s. (B')	1190,80	1195,70	1197,30					1204,50	1204,50	1203,80				
Volumen (B'-C')	506,70	502,70	506,50					506,10	506,00	505,90				

Volumen de agua absorbido	20,70	18,90	18,90					25,20	23,30	24,20				
% Saturación	58,69	59,11	58,28					72,27	71,03	74,13				
Promedio	**58,69**							**72,48**						
% Hinchamiento	0,14	-0,53	0,00					-0,63	-0,39	-0,26				
Promedio	-0,13							-0,43						
ACONDICIONAMIENTO	**AGUA A 60°C X 24 HORAS**			**AIRE A 25°C X 24 HORAS**				**AGUA A 60°C X 24 HORAS**			**AIRE A 25°C X 24 HORAS**			
Altura (cm)				6,52	6,52	6,60	6,51							
Diámetro (cm)				10,19	10,17	10,20	10,18							
P. agua (C")	689,70	696,90	695,50					700,50	702,10	701,80				
P.s.s.s. (B")	1196,30	1200,00	1201,60					1209,00	1208,60	1208,40				
Volumen (B"-C")	506,60	503,10	506,10					508,50	506,50	506,60				
Volumen absol agua	26,20	23,20	23,20					29,70	27,40	28,80				
% Saturación	74,29	72,56	71,54					85,18	83,53	88,22				
Promedio	72,79							85,64						
% Hinchamiento	0,12	-0,46	-0,08					-0,16	-0,30	-0,12				
Promedio	-0,14							-0,19						
ACONDICIONAMIENTO	**AGUA A 25°C X 1 HORA**			**AGUA A 25°C X 20 MIN.**				**AGUA A 25°C X 1 HORA**			**AGUA A 25°C X 20 MIN.**			
Altura T Ind (cm)	6,49	6,45	6,50	6,52	6,52	6,60	6,51	10,16	10,16	10,18	6,52	6,52	6,60	6,51
Diámetro T Ind (cm)	10,19	10,20	10,17	10,19	10,17	10,20	10,18	6,57	6,57	6,49	10,19	10,17	10,20	10,18
Trac Ind (kPa)	810,25	792,62	827,98	944,86	946,72	906,91	921,25	742,42	776,90	715,24	944,86	946,72	906,91	921,25
Promedio	810,28			929,93				744,85			929,93			
TSR (i/C)	**87,13**							**80,10**						