UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

Evaluación del comportamiento de mezclas asfálticas con contenido de escoria de cobre mediante ensayo TSR.

Memoria de Título presentada por

Luciano Fernando Alejandro Véliz Sepúlveda

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía
Guillermo Daniel Brante Lara

Noviembre de 2026

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

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

Título del trabajo: Evaluación del comportamiento de mezclas asfálticas con contenido de escoria de cobre mediante ensayo TSR

Nombre del candidato(a): Luciano Fernando Alejandro Véliz Sepúlveda

Carrera / Grado: Ingeniería Civil

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

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Guillermo Daniel Brante Lara, 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: 09-11-2026 **Firma:** _____

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 09-11-2026 **Firma:** _____

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

UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

TITULO DE LA MEMORIA:

Evaluación del comportamiento de mezclas asfálticas con contenido de escoria de cobre mediante ensayo TSR.

AUTOR:

Luciano Fernando Alejandro Véliz Sepúlveda

TRABAJO DE MEMORIA, presentado como requisito parcial para optar al título de la carrera de INGENIERIA CIVIL de la Universidad Técnica Federico Santa María.

	Nombre	Firma
Prof. Guía	Guillermo Brante Lara	.....
Miembro 1 Comisión	Rodrigo Delgadillo Sturla	.....

Valparaíso, Chile, Noviembre de 2026

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON CONTENIDO DE ESCORIA DE COBRE MEDIANTE ENSAYO TSR.

Luciano Fernando Alejandro Véliz Sepúlveda, Guillermo Daniel Brante Lara,

Universidad Técnica Federico Santa María

Resumen

Esta memoria evalúa mezclas asfálticas en caliente con escoria de cobre de División Ventanas como reemplazo volumétrico del árido natural del río Aconcagua. Su objetivo es identificar una dosificación con comportamiento mecánico favorable y resistencia adecuada al daño por humedad.

Se utilizó cemento asfáltico CA-24 y la dosificación IV-A-12 de rodadura proporcionada por Pavimentos Quilín Ltda. Se evaluaron reemplazos volumétricos de 20 %, 40 %, 60 %, 80 % y 100 %, ajustando las masas según las densidades de los materiales. Las mezclas se diseñaron mediante Marshall y se evaluaron mediante TSR.

Los resultados mostraron que el contenido óptimo de asfalto disminuyó de 5,1 % a 4,4 %, sin que ello implicara una disminución general de la masa de ligante requerida. Las estabilidades Marshall al óptimo superaron el mínimo exigido, la máxima observada entre los contenidos ensayados fue de 11,86 kN con 60 % de escoria, mientras que las fluencias cumplieron el intervalo normativo. Los TSR fueron de 84 %, 80 %, 78 %, 75 % y 61 % al aumentar el reemplazo. Los reemplazos parciales cumplieron el TSR mínimo, aunque el 80 % presentó un margen reducido y el reemplazo total incumplió TSR y VAM. Considerando los resultados, el 40 % se identificó como alternativa de equilibrio técnico, con estabilidad de 10,57 kN y TSR de 80 %..

Palabras clave: Escoria de cobre, mezclas asfálticas en caliente, reemplazo volumétrico, diseño Marshall, TSR.

Contenido

1 Introducción 7
2 Definición del problema 8
3 Objetivos 9
3.1 Objetivo General 9
3.2 Objetivos Específicos 9
4 Estado del arte 10
4.1 Antecedentes del uso de escoria de cobre en pavimentación 10
4.1.1 Antecedentes regionales 10
4.1.2 Antecedentes nacionales 10
4.1.3 Antecedentes internacionales 11
5 Marco teórico 12
5.1 Mezclas asfálticas en caliente y capa de rodadura 12
5.1.1 Mezcla semidensa IV-A-12 12
5.1.2 Exigencias técnicas para mezclas de rodadura 13
5.2 Origen y generación de la escoria de cobre 13
5.2.1 Cobre 13
5.2.2 Formación de la escoria de cobre 14
5.2.3 Enfriamiento de la escoria de cobre 14
5.2.4 Escoria de División Ventanas y valorización 14
5.2.5 Marco normativo nacional 15
5.3 Materiales componentes 16
5.3.1 Árido natural del río Aconcagua 16
5.3.2 Cemento asfáltico CA-24 16
5.4 Caracterización y reemplazo de agregados 17
5.4.1 Pétreos gruesos 17
5.4.2 Pétreos finos 18
5.4.3 Densidad real seca representativa y reemplazo volumétrico 19
5.5 Método Marshall 19
5.5.1 Densidad de la mezcla compactada y densidad máxima de la mezcla 19
5.5.2 Densidad efectiva, asfalto absorbido y asfalto útil 20
5.5.3 Huecos de aire, VAM y VLL 21
5.5.4 Estabilidad y fluencia 22
5.5.5 Contenido óptimo de asfalto 22
5.6 Ensayo TSR 22
5.6.1 Daño por humedad 23
5.6.2 Resistencia a tracción indirecta 23
5.6.3 Huecos de aire, saturación e hinchamiento 23
5.6.4 Razón de resistencia a tracción indirecta 24

6 Metodología 25
6.1 Diseño experimental 25
6.2 Caracterización de materiales 25
6.2.1 Cuarteo y preparación de las muestras 25
6.2.2 Densidad y absorción del árido natural 26
6.2.3 Densidad y absorción de la escoria de cobre 27
6.3 Granulometría adoptada y reconstitución de los agregados 28
6.3.1 Granulometría de trabajo IV-A-12 28
6.3.2 Reemplazo volumétrico 28
6.3.3 Pesaje y reconstitución por fracciones 29
6.4 Diseño Marshall 31
6.4.1 Preparación, mezclado y compactación 31
6.4.2 Control de altura y corrección de estabilidad 33
6.4.3 DMM y parámetros volumétricos 34
6.4.4 Determinación del contenido óptimo 34
6.5 Ensayo TSR 35
6.5.1 Preparación, compactación y control de huecos de aire 35
6.5.2 Saturación y acondicionamiento de las probetas 36
6.5.3 Tracción indirecta y cálculo de TSR 37
7 Resultados 38
7.1 Caracterización de los agregados 38
7.1.1 Densidad y absorción de agua 38
7.1.2 Densidades representativas para el reemplazo volumétrico 38
7.2 Granulometría y reconstitución de las mezclas 38
7.2.1 Granulometría IV-A-12 38
7.2.2 Reconstitución por equivalencia volumétrica 39
7.3 Resultados del diseño Marshall 40
7.3.1 Densidad de las mezclas compactadas 40
7.3.2 Estabilidad Marshall 41
7.3.3 Fluencia Marshall 42
7.3.4 Densidad máxima de la mezcla 43
7.3.5 Huecos de aire de las mezclas 43
7.3.6 Vacíos en el agregado mineral (VAM) 44
7.3.7 Determinación del contenido óptimo de asfalto 45
7.4 Resultados del ensayo TSR 45
7.4.1 Propiedades volumétricas iniciales 46
7.4.2 Saturación y acondicionamiento en humedad 46
7.4.3 Resistencia a la tracción indirecta 46
7.4.4 Índice TSR 46

8 Análisis de resultados....48
9 Conclusiones....51
10 Referencias....53
11 Anexos....56

1 Introducción

La minería del cobre mantiene una importancia central para Chile. Durante 2025, la minería del cobre representó 11,4 % del producto interno bruto nacional y la producción de cobre de mina alcanzó aproximadamente 5,42 millones de toneladas de cobre fino, equivalente a 22,9 % de la producción mundial (Banco Central de Chile, 2026; Comisión Chilena del Cobre, 2026). Esta actividad también genera materiales asociados al procesamiento metalúrgico, entre ellos la escoria de cobre, que se ha acumulado históricamente en depósitos y cuyo aprovechamiento ha motivado la búsqueda de nuevas aplicaciones.

En la producción de cobre a partir de minerales sulfurados, el mineral pasa por etapas de chancado y molienda para luego ser concentrado mediante flotación. Durante la fundición del concentrado se incorpora sílice como fundente para favorecer la separación del hierro, formando una fase rica en cobre y otra compuesta principalmente por hierro, sílice y otros óxidos que corresponde a la escoria. La composición y estructura de este material dependen de las características del concentrado, las condiciones de operación y el proceso de enfriamiento (Tian et al., 2021).

La construcción y conservación de pavimentos requieren grandes cantidades de áridos naturales provenientes de cauces y canteras. En particular, su extracción desde cauces puede modificar la dinámica fluvial y afectar los ecosistemas asociados. La utilización de escoria de cobre como árido artificial constituye una alternativa para aprovechar material acumulado y reducir parte de la demanda de agregados naturales destinados a obras viales.

En la Región de Valparaíso existe un interés directo por la valorización de este material debido al depósito histórico de División Ventanas y a las experiencias desarrolladas para su uso vial. Los estudios regionales han evaluado su incorporación en tratamientos superficiales, caminos básicos y mezclas asfálticas en caliente, mientras que durante los últimos años también se han ejecutado proyectos piloto que muestran el avance desde estudios de laboratorio hacia aplicaciones controladas en terreno (Boock Pantoja, 2017; Corporación Nacional del Cobre de Chile, 2025c; Pardo Vera, 2018; Pérez Mejías, 2017).

El escenario normativo se ha ampliado con la publicación de la NCh3894:2025 y la entrada en vigencia del Decreto N.° 46 del Ministerio de Salud, publicado en febrero de 2026. La norma establece criterios para la caracterización de escorias de cobre destinadas a su uso como áridos artificiales, mientras que el decreto exige autorización sanitaria previa y la acreditación de requisitos técnicos para su utilización en obras viales (Instituto Nacional de Normalización, 2025; Ministerio de Salud, 2026).

La presente investigación evalúa mezclas asfálticas en caliente IV-A-12 y reemplazos volumétricos de 20 %, 40 %, 60 %, 80 % y 100 % de árido natural por escoria de cobre, utilizando como referencia el diseño convencional de 0 % proporcionado por Pavimentos Quilín Ltda. El comportamiento de las mezclas confeccionadas se evalúa mediante diseño Marshall y ensayo TSR.

2 Definición del problema

Los antecedentes disponibles muestran que la escoria de cobre puede utilizarse en distintas aplicaciones viales. Sin embargo, los estudios no emplean necesariamente la misma procedencia de material, fracción granulométrica ni criterio de reemplazo. Algunos sustituyen árido fino o grueso, otros incorporan filler y también existen diferencias entre reemplazos expresados en masa y en volumen, por lo que un porcentaje considerado conveniente en una investigación no puede trasladarse directamente a otra mezcla.

La mayor densidad de la escoria respecto de los áridos naturales constituye una de las principales diferencias que deben considerarse durante la dosificación. Al sustituir masas iguales de ambos materiales, la escoria ocupa un volumen menor y modifica la proporción volumétrica de los componentes de la mezcla. El reemplazo por equivalencia volumétrica permite considerar esta diferencia y establecer una base de comparación entre dosificaciones con distintos contenidos de escoria (Orešković et al., 2023; Raposeiras et al., 2018) .

La literatura tampoco muestra una tendencia única respecto del comportamiento de las mezclas al aumentar el porcentaje de escoria. Se han reportado respuestas diferentes en estabilidad, contenido óptimo de asfalto, propiedades volumétricas (Nazer et al., 2021; Orešković et al., 2023), así como en la resistencia frente al daño por humedad (Chaubey & Mishra, 2024; Sharma et al., 2021), según el material y la configuración estudiada, por lo que no resulta suficiente asumir que una mayor densidad o angularidad producirá una mezcla superior. Tampoco basta con verificar estabilidad y fluencia debido a que una mezcla puede presentar una respuesta diferente luego del acondicionamiento con agua, por lo que es necesario realizar un análisis de las propiedades mecánicas, volumétricas y la susceptibilidad al daño por humedad bajo las condiciones específicas de cada estudio.

A partir de estas diferencias, resulta necesario evaluar cómo influye el reemplazo volumétrico de árido natural por escoria de cobre de División Ventanas en una mezcla asfáltica IV-A-12, manteniendo la misma granulometría de diseño y utilizando cemento asfáltico CA-24. La investigación considera las propiedades mecánicas y volumétricas obtenidas mediante el diseño Marshall junto con la susceptibilidad al daño por humedad evaluada mediante TSR, con el propósito de identificar los porcentajes de reemplazo que presentan un comportamiento adecuado considerando conjuntamente los criterios Marshall y TSR.

3 Objetivos

3.1 Objetivo General

Determinar el porcentaje óptimo de reemplazo volumétrico de árido natural por escoria de cobre de la Fundición Ventanas en mezclas asfálticas en caliente banda tipo IV-A-12, mediante criterios Marshall y TSR, para definir un rango de sustitución técnicamente viable bajo condiciones locales.

3.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar las propiedades físicas y granulométricas de la escoria de cobre y de los áridos naturales, estableciendo los parámetros requeridos para un reemplazo por equivalencia volumétrica.
- Diseñar mezclas asfálticas IV-A-12 con niveles de reemplazo de 20 %, 40 %, 60 %, 80 % y 100 %, determinando para cada nivel el contenido óptimo de ligante mediante criterios Marshall.
- Evaluar la susceptibilidad al daño por humedad de las mezclas mediante TSR, comparando la resistencia a tracción indirecta en condición seca y acondicionada.
- Analizar la relación entre el porcentaje de reemplazo y los resultados Marshall/TSR para identificar el porcentaje de sustitución que maximice el desempeño sin comprometer la durabilidad frente a humedad.

4 Estado del arte

4.1 Antecedentes del uso de escoria de cobre en pavimentación

4.1.1 Antecedentes regionales

En la Región de Valparaíso, la escoria de cobre proveniente de División Ventanas ha sido objeto de diversos estudios enfocados en evaluar su incorporación como material alternativo en obras de pavimentación, desarrollados en colaboración con el Laboratorio Regional de Vialidad. Uno de los primeros antecedentes corresponde a Herrera Bustos (2016), quien evaluó el material en diferentes soluciones de pavimentos flexibles, incluyendo una mezcla semidensa IV-A-12 confeccionada completamente con escoria mediante diseño Marshall. El estudio destacó su alta densidad y baja absorción y concluyó que el material cumplía con las exigencias técnicas evaluadas para su utilización en pavimentos flexibles.

Pérez Mejías (2017) continuó esta línea mediante el estudio de la escoria como reemplazo total del agregado en tratamientos superficiales asfálticos simples, comparándola con áridos provenientes del río Aconcagua y del estero La Patagua. Los resultados mostraron buena cubicidad, resistencia a la desintegración y adherencia con el ligante, cumpliendo las exigencias del Manual de Carreteras para esta aplicación.

En mezclas asfálticas en caliente, Boock Pantoja (2017) evaluó una mezcla IV-A-12 confeccionada con escoria y la comparó con una mezcla elaborada con áridos del río Aconcagua. Durante el diseño se evaluaron distintas proporciones de filler de aportación para mejorar la cohesión y adherencia entre las partículas de la mezcla, obteniéndose los resultados más favorables con un 1,4 %. La mezcla con escoria presentó mayor estabilidad y rigidez, mejor resistencia al desgaste superficial y al ahuellamiento, aunque mostró una menor resistencia a la fatiga respecto de la mezcla convencional.

Posteriormente, Pardo Vera (2018) estudió la utilización de escoria en soluciones de caminos básicos de la Región de Valparaíso. El trabajo mostró que el material proveniente del acopio no cumplió con las bandas granulométricas, por lo que debió ser chancado, clasificado y reconstituido. Más recientemente, Brante Lara (2024) publicó los resultados de esta línea de investigación, reafirmando la factibilidad de utilizar escoria de División Ventanas como reemplazo total del agregado en tratamientos superficiales simples.

A estos antecedentes de laboratorio se han sumado aplicaciones a escala real desarrolladas por CODELCO División Ventanas junto con organismos públicos y Pavimentos Quilín. Entre ellas se encuentran el pavimento del andén de buses de División Ventanas, un tramo experimental de la Ruta F-30E y proyectos posteriores ejecutados en Quintero y Puchuncaví, como el camino costero de Loncura y el camino Los Pescadores. En estas experiencias se han utilizado distintos porcentajes de escoria tanto en capas granulares como en mezclas asfálticas, ampliando progresivamente la experiencia regional desde estudios de laboratorio hacia aplicaciones en terreno (Corporación Nacional del Cobre de Chile, 2025a, 2025b, 2025c).

4.1.2 Antecedentes nacionales

Fuera de la Región de Valparaíso, también se han desarrollado investigaciones orientadas a evaluar la escoria de cobre en mezclas asfálticas. Nazer et al. (2021) estudiaron escoria proveniente de un depósito histórico ubicado en Caldera, Región de Atacama, como reemplazo parcial del árido grueso en mezclas asfálticas en caliente. Mediante diseño Marshall se evaluaron reemplazos en masa, concluyendo que sustituciones de hasta un 30 % del árido grueso resultaban adecuadas dentro de las condiciones estudiadas.

Por otra parte, Raposeiras et al. (2021) analizaron la influencia del tamaño de las partículas de escoria sobre el comportamiento de mezclas asfálticas frente a humedad y envejecimiento, realizando reemplazos volumétricos de fracciones granulométricas específicas entre 0,08 y 2,5 mm y manteniendo constante el contenido de asfalto. Los resultados mostraron un mejor comportamiento frente a la

humedad y al envejecimiento para las fracciones de mayor tamaño evaluadas, mientras que las más finas presentaron una respuesta menos favorable, evidenciando la importancia del tamaño de partícula en el desempeño de la mezcla.

4.1.3 Antecedentes internacionales

A nivel internacional, Đorđević et al. (2018) estudiaron la incorporación de escoria de cobre como reemplazo parcial de distintas fracciones de árido natural en proporciones de 25 % y 50 % en masa en mezclas asfálticas para capas de rodadura. Mediante diseño Marshall y ensayos de sensibilidad al agua, observaron que las mezclas con escoria presentaron una mayor resistencia frente a la humedad respecto de la mezcla convencional, aunque disminuyó su resistencia a las deformaciones permanentes.

Sharma et al. (2021) evaluaron mezclas asfálticas en caliente con reemplazos parciales del agregado fino, utilizando diseño Marshall y ensayo TSR. Los resultados mostraron un aumento de la resistencia retenida hasta 15 % de escoria, seguido de una estabilización y ligera disminución para porcentajes mayores. Todas las mezclas superaron el 80 % de TSR, identificándose el 15 % como el reemplazo más favorable dentro de las condiciones estudiadas.

Orešković et al. (2023) estudiaron mezclas asfálticas para capas de rodadura y base, incorporando escoria mediante reemplazo volumétrico de 15 % y 30 % y utilizando diseño Marshall y ensayos de susceptibilidad al agua. Los resultados mostraron que el contenido óptimo de asfalto fue similar o inferior al de referencia con 15 % de reemplazo, mientras que aumentó ligeramente con 30 % de escoria. La resistencia relativa frente a la humedad no presentó variaciones importantes entre las mezclas evaluadas.

Más recientemente, Chaubey & Mishra (2024) estudiaron mezclas asfálticas en caliente con reemplazo parcial en masa del agregado fino natural por escoria de cobre. Mediante diseño Marshall y evaluación TSR, observaron un aumento del contenido óptimo de asfalto y una disminución de la estabilidad y resistencia a tracción indirecta al incrementar la escoria. En cambio, el TSR aumentó progresivamente, por lo que los autores recomendaron un reemplazo de hasta 20 % dentro de las condiciones evaluadas.

5 Marco teórico

En este capítulo se presentan las características de los materiales y las relaciones necesarias para comprender el diseño Marshall y la evaluación de susceptibilidad a la humedad mediante TSR.

5.1 Mezclas asfálticas en caliente y capa de rodadura

Los pavimentos flexibles están conformados por una estructura de capas que trabajan en conjunto para recibir, distribuir y disipar las cargas de tránsito progresivamente hasta el suelo natural. Dentro de esta estructura, la capa de rodadura corresponde a la que se encuentra expuesta directamente al tránsito y a las condiciones climáticas. Esta capa debe proporcionar una superficie regular y resistente, además de limitar el ingreso de la humedad a las capas inferiores (Dirección de Vialidad, 2025a, 2025b).

Las mezclas asfálticas en caliente corresponden a una combinación de áridos, cemento asfáltico y cierto porcentaje de vacíos, dentro de la cual los áridos conforman la estructura que aporta resistencia y estabilidad, mientras que el ligante recubre las partículas y contribuye a la cohesión y al comportamiento viscoelástico de la mezcla. Propiedades como la granulometría, forma, textura, densidad y absorción influyen en el comportamiento de la mezcla y en la cantidad de ligante requerida (Asphalt Institute, 2011).

Luego de la compactación permanece una determinada cantidad de huecos de aire. Un contenido elevado puede facilitar el ingreso de agua y aire, por otro lado una cantidad demasiado baja puede favorecer la exudación y la inestabilidad de la mezcla (Asphalt Institute, 2011). La presencia de agua también puede afectar la adherencia entre el ligante y el agregado, por lo que la estructura de vacíos debe considerarse junto con la respuesta mecánica (Guo et al., 2020).

5.1.1 Mezcla semidensa IV-A-12

Dentro de las mezclas asfálticas en caliente, el Volumen N.° 5 del Manual de Carreteras establece distintas bandas granulométricas según la distribución de tamaños del árido. Entre ellas se encuentra la IV-A-12, correspondiente a una mezcla de granulometría semidensa, cuyas fracciones deben combinarse para que la granulometría final cumpla con los límites definidos para cada tamiz. Estos límites se presentan en la Tabla 1:

Tabla 1: Banda granulométrica semidensa IV-A-12.

Tamiz (mm)	ASTM	% que pasa
20	3/4"	100
12,5	1/2"	80–95
10	3/8"	70–85
5	N.° 4	43–58
2,5	N.° 8	28–42
0,63	N.° 30	13–24
0,315	N.° 50	8–17
0,16	N.° 100	6–12
0,08	N.° 200	4–8

Fuente: Dirección de Vialidad (2025a), Tabla 5.408.201.F.

La banda IV-A-12 ha sido utilizada anteriormente en investigaciones regionales con escoria de cobre (Boock Pantoja, 2017; Herrera Bustos, 2016). En esta investigación se adopta porque corresponde al

diseño de referencia proporcionado por Pavimentos Quilín Ltda. y al mantener granulometría constante se logra evaluar el efecto de la incorporación de escoria sobre el comportamiento de la mezcla.

El Método 8.201.1 define el tamaño máximo absoluto como el menor tamiz por el cual pasa el 100 % de la masa del árido y el tamaño máximo nominal corresponde al tamiz inmediatamente menor cuando por este pasa un 90 % o más del material. En caso contrario, coincide con el tamaño máximo absoluto (Dirección de Vialidad, 2025b).

5.1.2 Exigencias técnicas para mezclas de rodadura

Para las mezclas asfálticas destinadas a capas de rodadura, la Sección 5.408 establece requisitos mecánicos y volumétricos que permiten evaluar su comportamiento frente a las cargas de tránsito y las condiciones de servicio. La Tabla 2 reúne los límites:

Tabla 2: Criterios de referencia para mezclas asfálticas de rodadura.

Parámetro	Criterio
Estabilidad Marshall	≥ 9.000 N
Fluencia	8–16 unidades de 0,25 mm
Huecos de aire, Va	3–5 %
TSR	≥ 75 %

Fuente: Dirección de Vialidad (2025a), Tabla 5.408.203.A.

Los parámetros establecidos permiten evaluar distintos aspectos del comportamiento de la mezcla. La estabilidad representa la carga máxima soportada durante el ensayo Marshall, mientras que la fluencia corresponde a la deformación asociada a dicha carga. Los huecos de aire permiten evaluar la condición volumétrica de la mezcla y el índice TSR expresa la proporción de resistencia retenida después del acondicionamiento con humedad.

Además, se debe cumplir un contenido mínimo de vacíos en el agregado mineral (VAM). Este parámetro representa el espacio entre las partículas que puede ser ocupado por aire y asfalto. El valor mínimo depende del tamaño nominal de la mezcla, como se presenta en la Tabla 3:

Tabla 3: VAM mínimo según tamaño nominal.

Tamaño nominal (mm)	VAM mínimo (%)
25	12,0
20	13,0
12,5	14,0
10	15,0
5	17,0
2,5	20,0
1,25	22,5

Fuente: Dirección de Vialidad (2025a), Tabla 5.408.203.B.

5.2 Origen y generación de la escoria de cobre

5.2.1 Cobre

El cobre se encuentra en la naturaleza asociado a distintas especies minerales, agrupadas principalmente en sulfuradas y oxidadas. Entre los sulfuros se distinguen los primarios, como la calcopirita y la bornita, y los secundarios, como la calcosina y la covelina. Los minerales oxidados suelen encontrarse cerca de la superficie de los yacimientos, donde la acción del agua y el oxígeno favorece la alteración de los sulfuros y la formación de especies oxidadas. A mayor profundidad predominan generalmente los sulfuros primarios. La naturaleza del mineral determina la ruta utilizada para recuperar el cobre (Ávila Cortés et al., 2023).

Los minerales sulfurados primarios son sometidos a extracción, chancado y molienda para reducir el tamaño de la roca y liberar los minerales de interés. Luego, durante la flotación, se incorporan reactivos que favorecen la adhesión de las partículas con contenido de cobre a burbujas de aire, provocando que asciendan y se separen de gran parte de la ganga, correspondiente al material sin interés económico que acompaña al mineral. El concentrado obtenido continúa hacia fundición, conversión y refinación electrolítica, hasta obtener cobre de alta pureza (Ávila Cortés et al., 2023).

En cambio, los minerales oxidados y parte de los sulfuros secundarios siguen una ruta hidrometalúrgica, comenzando con la lixiviación, donde una solución ácida permite disolver el cobre presente en el mineral. La solución obtenida pasa por extracción por solventes, donde el cobre se concentra y purifica, para finalmente pasar por un proceso de electroobtención, etapa en que se recupera mediante corriente eléctrica. Esta ruta no requiere fundición convencional, por lo que no genera escoria de cobre de origen pirometalúrgico (Ávila Cortés et al., 2023).

5.2.2 Formación de la escoria de cobre

La escoria de cobre corresponde a un material generado durante la fundición de concentrados sulfurados. En este proceso se busca separar el cobre de otros componentes presentes en el concentrado, obteniéndose una fase sulfurada rica en cobre y otra fase oxidada formada principalmente por hierro, sílice y otros óxidos denominada escoria. Para favorecer esta separación se incorpora sílice como fundente, que permite combinar el hierro oxidado con la sílice y formar compuestos ferrosilicatados que pasan a constituir parte de la escoria (Tian et al., 2021).

La separación entre ambas fases no es completa y parte del cobre puede permanecer retenido en la escoria como partículas metálicas o asociado a sulfuros, por lo que el material puede someterse posteriormente a etapas de limpieza destinadas a recuperar parte del cobre contenido en ella (Tian et al., 2021). Entre las fases más comunes se encuentra la fayalita, acompañada generalmente por magnetita y otras fases silicatadas, cuya proporción depende del concentrado procesado y de las condiciones de operación y enfriamiento (Raposeiras et al., 2018).

La cantidad generada puede ser considerable, reportándose como orden de magnitud aproximadamente 2,2 toneladas de escoria por cada tonelada de cobre producido en procesos de fundición (Gorai et al., 2003). La magnitud de su generación explica el interés por recuperar metales remanentes y desarrollar alternativas de utilización capaces de consumir cantidades relevantes de material (Klaffenbach et al., 2023).

5.2.3 Enfriamiento de la escoria de cobre

Una vez se genera, la escoria se encuentra en estado líquido y debe ser enfriada hasta alcanzar su solidificación, proceso que influye en su posterior estructura interna. Un enfriamiento lento favorece la formación de fases cristalinas generando masas sólidas de mayor tamaño que pueden requerir trituración posterior. En cambio, un enfriamiento rápido mediante agua o aire limita el proceso de cristalización y da origen a una mayor proporción de material amorfo o vítreo, generalmente en forma de partículas granuladas (Klaffenbach et al., 2023).

Las condiciones de enfriamiento influyen en la estructura y el tamaño de las partículas obtenidas, mientras que la composición depende también del concentrado procesado y de los fundentes incorporados. Estas diferencias permiten comprender por qué las características de una escoria deben asociarse a su procedencia y no extrapolarse directamente a materiales de otras fundiciones (Klaffenbach et al., 2023; Tian et al., 2021).

5.2.4 Escoria de División Ventanas y valorización

La escoria utilizada en esta investigación proviene del depósito histórico de División Ventanas, ubicado en la comuna de Puchuncaví, Región de Valparaíso. La fundición comenzó a operar en 1964 y cesó sus operaciones en mayo de 2023, después de 58 años de actividad (Corporación Nacional del Cobre de Chile, 2023). Durante este periodo se procesaron concentrados de distintas procedencias, generándose escoria que fue acumulada en el depósito de la división. En febrero de 2026, CODELCO informó que

el escorial contenía aproximadamente 4,5 millones de toneladas de material (Corporación Nacional del Cobre de Chile, 2026).

Este depósito fue generado durante distintos periodos de operación y no corresponde a un único lote con propiedades necesariamente uniformes. Esta condición se observa en la información entregada por CODELCO al presentar su composición mediante rangos referenciales (Corporación Nacional del Cobre de Chile, 2018). La Tabla 4 reúne los porcentajes estimativos de hierro, sílice y cobre informados para los lotes históricos del escorial.

Tabla 4: Composición química referencial de la escoria de División Ventanas.

Componente	Rango (%)
Fe	36-44
SiO_2	25-32
Cu	0,8-1,2

Fuente: Corporación Nacional del Cobre de Chile (2018, p.2).

La valorización busca utilizar el material en una nueva aplicación en lugar de mantenerlo únicamente almacenado. Para su incorporación en obras viales, la escoria puede requerir trituración y clasificación por tamaños para cumplir las bandas granulométricas establecidas. Pardo Vera (2018) observó que el material extraído directamente del acopio de División Ventanas no cumplía las granulometrías requeridas para las soluciones de caminos básicos estudiadas, por lo que fue necesario chancarlo, clasificarlo y reconstituir las fracciones.

Las experiencias desarrolladas en División Ventanas muestran un avance desde ensayos de laboratorio hacia proyectos piloto de pavimentación. En marzo de 2025 se inauguró un andén de buses al interior de la división, cuya carpeta asfáltica incorporó un 20 % de escoria de cobre en reemplazo de áridos naturales, reutilizando aproximadamente 200 toneladas de este material (Corporación Nacional del Cobre de Chile, 2025a). Posteriormente, se realizó una prueba experimental en la Ruta F-30-E, comuna de Puchuncaví, donde se pavimentaron 100 metros con una mezcla asfáltica de 5 cm de espesor que incorporó un 20 % de escoria en la fracción gruesa del agregado. Para evaluar esta aplicación, se ejecutaron otros 100 metros con una mezcla tradicional, destinados a servir como tramo de comparación (Corporación Nacional del Cobre de Chile, 2025b).

A estas iniciativas se sumaron nuevas aplicaciones en caminos locales de las comunas de Quintero y Puchuncaví durante el segundo semestre de 2025, ampliando la utilización de escoria tanto a bases granulares como a carpetas asfálticas (Corporación Nacional del Cobre de Chile, 2025c). En el camino costero de Loncura, ubicado en Quintero, se pavimentaron aproximadamente 600 metros, utilizando un 40 % de escoria en la base granular y un 30 % en la carpeta asfáltica (Corporación Nacional del Cobre de Chile, 2025d). Por su parte, en Puchuncaví se intervino el camino Los Pescadores, que conecta La Chocota, Horcón y Campiche, con una extensión aproximada de 1,3 km (Corporación Nacional del Cobre de Chile, 2025d). Para esta obra, Chapple (2026) informó que ambos proyectos incorporaron entre un 40 % y un 50 % de escoria en sus bases granulares y un 30 % en sus carpetas asfálticas.

5.2.5 Marco normativo nacional

En Chile, la Ley N.° 20.920 establece el marco para la gestión de residuos y el fomento de su valorización, incorporando principios asociados a la economía circular. Entre ellos se encuentra la jerarquía en el manejo de residuos, que prioriza la prevención, reutilización, reciclaje y otras formas de valorización sobre su eliminación. Bajo este principio, el aprovechamiento de escoria de cobre como árido artificial representa una alternativa para valorizar un material proveniente de la industria minera, contribuyendo a reducir su acumulación en depósitos y el consumo de áridos naturales utilizados en pavimentación (Ministerio del Medio Ambiente, 2016).

En materia sanitaria, el D.S. N.° 148/2003 del Ministerio de Salud, que aprueba el Reglamento Sanitario sobre Manejo de Residuos Peligrosos, incluye las escorias dentro de los residuos mineros masivos que

no son considerados peligrosos bajo las condiciones establecidas en su artículo 23, siempre que su disposición final no se realice junto con residuos sólidos domésticos u otros similares. Sin embargo, la misma disposición permite que la Autoridad Sanitaria exija su caracterización en casos calificados, por lo que esta clasificación no equivale a una autorización automática para utilizar el material en una obra (Ministerio de Salud, 2004).

Posteriormente, la NCh3894:2025 estableció criterios para la clasificación y caracterización de áridos artificiales provenientes de escorias generadas durante el proceso pirometalúrgico del cobre, considerando tanto aquellas recién producidas como las almacenadas en depósitos. Esta norma no establece los requisitos técnicos específicos para su utilización en mezclas asfálticas. La normativa fue complementada por la NCh3895:2026, que establece requisitos de trazabilidad y exigencias técnicas para incorporar estos materiales en bases y subbases de pavimentos. Ambas normas representan avances en la regulación técnica de la escoria de cobre, aunque la segunda se encuentra orientada a capas granulares y no establece directamente los requisitos de diseño de mezclas asfálticas en caliente (Instituto Nacional de Normalización, 2025, 2026).

Como última actualización en términos normativos, el Decreto N.° 46 del Ministerio de Salud publicado en 2026, estableció los requisitos sanitarios y de seguridad para autorizar el uso de escorias de cobre como áridos artificiales en caminos, carreteras, autopistas y otras obras de infraestructura permitidas. El reglamento exige una autorización sanitaria previa de la Secretaría Regional Ministerial de Salud correspondiente, respaldada por antecedentes sobre la procedencia, características y destino del material. Entre los requisitos se encuentran análisis químicos, mediciones de radiactividad y ensayos de lixiviación por precipitación sintética, que permiten evaluar la posible liberación de sustancias presentes en la escoria al entrar en contacto con soluciones que simulan el efecto de las precipitaciones. Además, exige mantener registros de las cantidades transportadas y utilizadas, permitiendo conocer el recorrido del material desde su origen hasta la obra (Ministerio de Salud, 2026).

Para su utilización en caminos, carreteras y autopistas, el mismo decreto exige acreditar mediante una certificación que la escoria cumple con las características técnicas establecidas en el Manual de Carreteras vigente de la Dirección de Vialidad o en otras normas nacionales aplicables. Por lo tanto, la autorización sanitaria no acredita por sí sola que la escoria o la mezcla asfáltica cumplan los requisitos técnicos exigidos para su implementación en pavimentación (Ministerio de Salud, 2026).

5.3 Materiales componentes

Las mezclas evaluadas están constituidas por árido natural proveniente del río Aconcagua, escoria de cobre de División Ventanas y cemento asfáltico CA-24. Se mantuvieron constantes la granulometría y el tipo de ligante, modificando progresivamente el porcentaje de reemplazo volumétrico de árido natural por escoria de cobre para evaluar su influencia sobre las propiedades de las mezclas.

5.3.1 Árido natural del río Aconcagua

Los áridos naturales constituyen el componente mineral de las mezclas asfálticas y pueden provenir de depósitos fluviales o canteras. Se clasifican en fracciones gruesas y finas, cuya combinación permite obtener la distribución granulométrica requerida para cada tipo de mezcla. Sus propiedades dependen tanto de su origen como del procesamiento posterior, ya que los materiales provenientes de depósitos fluviales pueden ser chancados y clasificados antes de ser utilizados en pavimentación.

En esta investigación se utilizan áridos naturales del río Aconcagua, proporcionados por Pavimentos Quilín Ltda., los cuales forman parte del diseño de referencia IV-A-12 entregado por la empresa. Este material es reemplazado progresivamente por escoria de cobre, manteniendo la misma distribución granulométrica para comparar el comportamiento de las distintas mezclas.

5.3.2 Cemento asfáltico CA-24

El cemento asfáltico corresponde al ligante encargado de recubrir las partículas de agregado y mantenerlas unidas dentro de la mezcla. Se obtiene principalmente de la refinación del petróleo y

presenta un comportamiento viscoelástico, por lo que su consistencia depende de la temperatura y del tiempo de aplicación de las cargas. Durante el calentamiento disminuye su viscosidad, facilitando el mezclado y recubrimiento de los áridos. Al enfriarse adquiere mayor consistencia y contribuye a la cohesión de la mezcla compactada.

En Chile, el cemento asfáltico CA-24 se clasifica de acuerdo con su viscosidad absoluta a 60 °C y se utiliza en mezclas asfálticas en caliente (Dirección de Vialidad, 2025b). En esta investigación se utiliza cemento asfáltico CA-24 en todas las mezclas, manteniendo constante el tipo de ligante y su contenido se determina para cada porcentaje de reemplazo mediante el diseño Marshall.

5.4 Caracterización y reemplazo de agregados

Para comparar el árido natural y la escoria se requiere conocer las propiedades que relacionan masa y volumen. El Volumen N.° 8 distingue la densidad real del pétreo seco, densidad real del pétreo saturado superficialmente seco, densidad neta y absorción de agua, parámetros que posteriormente permiten establecer una base volumétrica común entre ambos materiales.

La densidad real seca relaciona la masa del agregado seco con el volumen de sus partículas, incluidos los poros accesibles e inaccesibles, mientras que la densidad real saturada superficialmente seca considera el mismo volumen, incorporando además la masa del agua contenida en los poros accesibles. La densidad neta excluye estos últimos del volumen considerado y la absorción corresponde al porcentaje de agua que puede incorporar el agregado respecto de su masa seca (Dirección de Vialidad, 2025b).

5.4.1 Pétreos gruesos

Para los pétreos gruesos, el Método 8.202.20 determina la densidad real, densidad neta y absorción de agua a partir de tres masas obtenidas durante el ensayo: la masa del pétreo saturado superficialmente seco, la masa del pétreo sumergido y la masa del pétreo seco (Dirección de Vialidad, 2025b).

La densidad real del pétreo saturado superficialmente seco se determina mediante:

$$\rho_{RT} = \frac{M_{SSS}}{M_{SSS} - M_{SUM}} \cdot 1000$$

donde:

- ρ_{RT}: Densidad real del pétreo saturado superficialmente seco (kg/m^3).
- M_{SSS}: Masa del pétreo saturado superficialmente seco (g).
- M_{SUM}: Masa del pétreo sumergido (g).

La densidad real del pétreo seco se calcula mediante:

$$\rho_{RS} = \frac{M_S}{M_{SSS} - M_{SUM}} \cdot 1000$$

donde:

- ρ_{RS}: Densidad real del pétreo seco (kg/m^3).
- M_s: Masa del pétreo seco (g).
- M_{SSS}: Masa del pétreo saturado superficialmente seco (g).
- M_{SUM}: Masa del pétreo sumergido (g).

La densidad neta se obtiene mediante:

$$\rho_N = \frac{M_S}{M_S - M_{sum}} \cdot 1000$$

donde:

- ρ_N: Densidad neta (kg/m^3).

- M_S: Masa del pétreo seco (g).
- M_{SUM}: Masa del pétreo sumergida (g).

Finalmente, la absorción de agua se determina mediante:

$$\alpha = \frac{M_{SSS} - M_S}{M_S} \cdot 100$$

donde:

- α: Absorción (%).
- M_{SSS}: Masa del pétreo saturado superficialmente seco (g).
- M_S: Masa del pétreo seco (g).

5.4.2 Pétreos finos

Para los pétreos finos, el Método 8.202.21 utiliza un matraz calibrado para determinar la densidad real, densidad neta y absorción de agua. Las densidades se calculan a partir de las masas de la muestra y del agua desplazada dentro del matraz (Dirección de Vialidad, 2025b).

La densidad real del pétreo saturado superficialmente seco se determina mediante:

$$\rho_{RT} = \frac{M_{sss}}{M_a + M_{sss} - M_m} \cdot 1000$$

donde:

- ρ_{RT}: Densidad real del pétreo saturado superficialmente seco (kg/m^3).
- M_{sss}: Masa de la muestra saturada superficialmente seca (g).
- M_a: Masa del matraz con agua hasta la marca de calibración (g).
- M_m: Masa del matraz con la muestra más agua hasta la marca de calibración (g).

Para la condición seca, la densidad real se obtiene mediante:

$$\rho_{RS} = \frac{M_s}{M_a + M_{sss} - M_m} \cdot 1000$$

donde:

- ρ_{RS}: Densidad real del pétreo seco(kg/m^3).
- M_s: Masa de la muestra seca (g).
- M_{sss}: Masa de la muestra saturada superficialmente seca(g).
- M_a: Masa del matraz con agua hasta la marca de calibración (g).
- M_m: Masa del matraz con la muestra más agua hasta la marca de calibración(g).

La densidad neta se obtiene mediante:

$$\rho_N = \frac{M_s}{M_s + M_a - M_m} \cdot 1000$$

donde:

- ρ_N: Densidad neta (kg/m^3).
- M_s: Masa de la muestra seca (g).
- M_a: Masa del matraz con agua hasta la marca de calibración (g).
- M_m: Masa del matraz con la muestra más agua hasta la marca de calibración(g).

Finalmente, la absorción de agua se calcula mediante:

$$\alpha = \frac{M_{sss} - M_s}{M_s} \cdot 100$$

donde:

- α: Absorción (%).
- M_s: Masa de la muestra seca (g).
- M_{sss}: Masa de la muestra saturada superficialmente seca(g).

5.4.3 Densidad real seca representativa y reemplazo volumétrico

Cuando una mezcla está compuesta por dos o más agregados con diferentes densidades reales, el Método 8.302.47 establece el cálculo de la densidad real seca de la mezcla de agregados de acuerdo con la participación en peso de cada material (Dirección de Vialidad, 2025b):

$$\rho_{RS} = \sum_{i=1}^{n} P_i \cdot \rho_{RS,i}$$

donde:

- ρ_{RS}: Densidad real seca de la mezcla de agregados (kg/m^3).
- P_i: Participación en peso del agregado i, expresada en forma decimal.
- ρ_{RSi}: Densidad real seca del agregado i (kg/m^3).

Debido a la mayor densidad de la escoria de cobre, una sustitución directa en masa modifica el volumen de agregado incorporado. Por ello, el reemplazo se establece mediante equivalencia volumétrica, ajustando las masas de ambos materiales según sus densidades. Este criterio es distinto del cálculo de la densidad real seca ponderada, que considera la participación en masa de cada agregado.

5.5 Método Marshall

El método Marshall se utiliza para el diseño de mezclas asfálticas en caliente mediante la evaluación de sus propiedades mecánicas y volumétricas frente a distintos contenidos de cemento asfáltico. En Chile, el procedimiento de diseño se establece en el Método 8.302.47 del Volumen N.º 8 del Manual de Carreteras, mientras que la confección y ensayo de las probetas se realiza mediante el Método 8.302.40 (Dirección de Vialidad, 2025b).

Para determinar el óptimo se analizan las curvas de estabilidad, densidad compactada y huecos de aire según los distintos contenidos de ligante. La fluencia y los demás parámetros volumétricos permiten verificar el cumplimiento de los requisitos establecidos para la mezcla diseñada.

5.5.1 Densidad de la mezcla compactada y densidad máxima de la mezcla

La densidad de la mezcla compactada G, representa la relación entre la masa y el volumen de una probeta después de la compactación, incluidos los huecos de aire que permanecen en su interior. El Método 8.302.38 establece su determinación mediante pesajes en condición seca, saturada superficialmente seca y sumergida en agua (Dirección de Vialidad, 2025b).

Para las probetas que presentan una absorción de agua igual o inferior al 2 %, se utiliza el Método A, correspondiente a la determinación de densidad con superficie saturada superficialmente seca, la cual se calcula mediante:

$$G = \frac{A}{\frac{B-C}{\rho_w}} \cdot 1.000$$

donde:

- G: Densidad de la mezcla compactada (kg/m^3).
- A: Masa seca de la probeta en aire (g).
- B: Masa de la probeta saturada con superficie seca en aire (g).
- C: Masa de la probeta sumergida en agua (g).
- ρ_w: Densidad del agua $(1\ g/cm^3)$.

La absorción de agua de la probeta se determina mediante:

$$A_{ab} = \frac{B - A}{B - C} \cdot 100$$

donde:

- A_{ab}: Absorción de agua de la probeta compactada (%).
- A: Masa seca de la probeta en aire (g).
- B: Masa de la probeta saturada con superficie seca en aire (g).
- C: Masa de la probeta sumergida en agua (g).

Cuando la absorción supera el 2 %, se debe utilizar el Método B, que contempla el recubrimiento de la probeta con parafina para evitar que el agua ingrese a los huecos superficiales durante la determinación de su volumen.

La densidad máxima de la mezcla sin compactar D_{mm}, corresponde a la densidad que tendría la mezcla de agregados y cemento asfáltico en ausencia de huecos de aire. Su determinación se realiza mediante el Método 8.302.37, utilizando una muestra de mezcla sin compactar a la cual se elimina el aire atrapado mediante la aplicación de vacío (Dirección de Vialidad, 2025b). Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$D_{mm} = \frac{M_m}{M_m + M_{Pa} - M_{Pam}} \cdot \rho_T$$

donde:

- D_{mm}: Densidad máxima de la mezcla sin compactar (kg/m^3).
- M_m: Masa seca de la muestra (g).
- M_{Pa}: Masa del recipiente lleno con agua (g).
- M_{Pam}: Masa del recipiente con agua y muestra (g).
- ρ_T: Densidad del agua a la temperatura de ensayo (kg/m^3).

Ambas densidades se utilizan para evaluar la condición volumétrica de la mezcla. Mientras que la densidad compactada representa la condición alcanzada por las probetas Marshall, la densidad máxima permite establecer una referencia sin huecos de aire.

5.5.2 Densidad efectiva, asfalto absorbido y asfalto útil

La densidad efectiva del agregado permite relacionar la densidad máxima de la mezcla con el contenido de asfalto y la densidad del ligante. El Método 8.302.47 establece su cálculo mediante la siguiente expresión (Dirección de Vialidad, 2025b):

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

donde:

- ρ_E: Densidad efectiva del agregado (kg/m^3).
- P_b: Contenido de asfalto referido a la masa del agregado (%).
- D_{mm}: Densidad máxima de la mezcla (kg/m^3).
- ρ_b: Densidad del cemento asfáltico (kg/m^3).

A partir de la densidad efectiva y la densidad real seca de los agregados se determina el contenido de asfalto absorbido mediante:

$$P_{ba} = 100 \cdot \rho_b \left(\frac{1}{\rho_{RS}} - \frac{1}{\rho_E} \right)$$

donde:

- P_{ba}: Contenido de asfalto absorbido referido al agregado (%).
- ρ_{RS}: Densidad real seca de la mezcla de agregados (kg/m^3).
- ρ_E: Densidad efectiva del agregado (kg/m^3).

- ρ_b: Densidad del cemento asfáltico (kg/m^3).

Cuando se dispone de una determinación de D_{mm} para un contenido de asfalto de referencia, el mismo método permite calcular la densidad máxima para otros contenidos de ligante, manteniendo la densidad efectiva correspondiente a esa combinación de agregados:

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

donde:

- D_{mm}: Densidad máxima calculada (kg/m^3).
- P_b: Contenido de asfalto referido al agregado (%).
- ρ_E: Densidad efectiva del agregado (kg/m^3).
- ρ_b: Densidad del cemento asfáltico (kg/m^3).

El contenido de asfalto útil corresponde a la fracción de ligante disponible después de descontar el asfalto absorbido por los agregados:

$$P_{bu} = P_b - P_{ba}$$

donde:

- P_{bu}: Contenido de asfalto útil referido al agregado (%).
- P_b: Contenido total de asfalto referido al agregado (%).
- P_{ba}: Contenido de asfalto absorbido referido al agregado (%).

Estas relaciones permiten diferenciar el ligante total de la fracción disponible para recubrir las partículas. En mezclas con escoria de cobre, la baja absorción del material puede modificar esta relación, aunque la demanda de asfalto también depende de la textura superficial, la distribución granulométrica y los huecos de la mezcla.

5.5.3 Huecos de aire, VAM y VLL

Los parámetros volumétricos permiten evaluar la distribución de los agregados, el asfalto y los espacios vacíos dentro de la mezcla compactada. Los vacíos en el agregado mineral VAM, representan el volumen comprendido entre las partículas, incluyendo los huecos de aire y el espacio ocupado por el asfalto efectivo. Según el Método 8.302.47 (Dirección de Vialidad, 2025b), se calculan mediante:

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

donde:

- VAM: Vacíos en el agregado mineral (%).
- G: Densidad de la mezcla compactada (kg/m^3).
- ρ_{RS}: Densidad real seca de la mezcla de agregados (kg/m^3).
- P_b: Contenido de asfalto referido al agregado (%).

Los huecos de aire V_a, corresponden al porcentaje del volumen total de la mezcla compactada que permanece sin ocupar. Se obtienen relacionando las densidades máxima y compactada:

$$V_a = 100 \cdot \left(1 - \frac{G}{D_{mm}}\right)$$

donde:

- V_a: Huecos de aire de la mezcla (%).
- D_{mm}: Densidad máxima de la mezcla (kg/m^3).
- G: Densidad de la mezcla compactada (kg/m^3).

Los huecos llenos con asfalto VLL, representan la proporción de los vacíos del agregado mineral ocupada por asfalto efectivo:

$$VLL = 100 \cdot \left(1 - \frac{V_a}{VAM}\right)$$

donde:

- VLL: Huecos llenos con asfalto (%).
- V_a: Huecos de aire de la mezcla (%).
- VAM: Vacíos en el agregado mineral (%).

5.5.4 Estabilidad y fluencia

En cuanto a las propiedades medidas, la estabilidad corresponde a la carga máxima que puede soportar la probeta durante el ensayo, mientras que la fluencia representa la deformación alcanzada para dicha carga. Estos valores, junto con la densidad y las propiedades volumétricas, son representados en función del contenido de asfalto para observar la variación que presenta la mezcla a medida que aumenta la cantidad de ligante.

Debido a que la altura de las probetas puede presentar pequeñas variaciones, la estabilidad medida debe corregirse cuando el espesor es distinto de 63,5 mm. Para ello se utilizan los factores de corrección establecidos en el Método 8.302.40, obteniendo una estabilidad equivalente que permite comparar las probetas bajo una misma condición de referencia.

$$E_c = E_m \cdot F_c$$

donde:

- E_c: Estabilidad Marshall corregida(N).
- E_m: Estabilidad Marshall medida (N).
- F_c: Factor de corrección según la altura de la probeta.

5.5.5 Contenido óptimo de asfalto

A partir de las curvas obtenidas para cada contenido de asfalto se determina el contenido óptimo de ligante. Para mezclas destinadas a capa de rodadura, el Método 8.302.47 considera el contenido asociado a máxima estabilidad, máxima densidad y 4 % de huecos de aire, obteniéndose el valor óptimo mediante la media aritmética de estas tres condiciones:

$$P_{b\ \text{óptimo}} = \frac{P_{b1} + P_{b2} + P_{b3}}{3}$$

Donde:

- $P_{b\ \text{óptimo}}$: Contenido óptimo de asfalto.
- P_{b1}: Contenido de asfalto asociado a la máxima estabilidad.
- P_{b2}: Contenido de asfalto asociado a la máxima densidad.
- P_{b3}: Contenido de asfalto correspondiente a 4 % de huecos de aire.

Una vez determinado el contenido óptimo, se verifica que la mezcla cumpla los requisitos de estabilidad, fluencia y propiedades volumétricas establecidos para la capa de rodadura

5.6 Ensayo TSR

El ensayo TSR (Tensile Strength Ratio) se utiliza para evaluar la susceptibilidad al daño por humedad de las mezclas asfálticas, mediante la comparación de la resistencia a tracción indirecta de probetas ensayadas en condición seca y después de un acondicionamiento con agua. En Chile, este procedimiento se encuentra establecido en el Método 8.302.6 del Volumen N.º 8 del Manual de Carreteras (Dirección de Vialidad, 2025b).

El ensayo permite determinar la proporción de resistencia que conserva una mezcla después del acondicionamiento. Para ello, se comparan dos subconjuntos de probetas de una misma dosificación,

manteniendo porcentajes de huecos de aire similares para que las diferencias de resistencia puedan asociarse principalmente al efecto de la humedad.

5.6.1 Daño por humedad

El daño por humedad corresponde al deterioro que experimenta una mezcla asfáltica cuando el agua afecta la unión entre el ligante y los agregados. Este fenómeno puede producirse por la pérdida de adherencia en la interfase asfalto-agregado o por una disminución de la cohesión del ligante, provocando una reducción de la resistencia mecánica de la mezcla.

Su magnitud depende de las propiedades del agregado, del cemento asfáltico y de la estructura de huecos desarrollada durante la compactación. Por esta razón, el comportamiento frente a la humedad no puede determinarse únicamente a partir de las propiedades individuales de los materiales, sino que requiere evaluar la respuesta de la mezcla bajo condiciones controladas.

5.6.2 Resistencia a tracción indirecta

La resistencia a tracción indirecta corresponde a la capacidad de una probeta asfáltica para soportar los esfuerzos de tracción generados mediante la aplicación de una carga de compresión diametral. Durante el ensayo, la carga produce esfuerzos de tracción en el interior de la probeta hasta alcanzar su resistencia máxima. El Método 8.302.6 establece su cálculo mediante la siguiente expresión

$$S_t = \frac{2000P}{\pi t D}$$

Donde:

- S_t: Resistencia a tracción indirecta (kPa).
- P: Carga máxima aplicada (N).
- t: Altura de la probeta inmediatamente antes del ensayo (mm).
- D: Diámetro de la probeta (mm).

La resistencia obtenida representa la capacidad mecánica de la mezcla bajo una condición determinada. Para evaluar el efecto de la humedad se requiere comparar las resistencias promedio de los subconjuntos seco y acondicionado, ya que la resistencia individual no permite establecer por sí sola la pérdida relativa provocada por el agua.

5.6.3 Huecos de aire, saturación e hinchamiento

El porcentaje de huecos de aire representa la proporción del volumen de la mezcla compactada que permanece sin ocupar por agregados o cemento asfáltico. Este parámetro definido anteriormente, resulta relevante en el ensayo TSR debido a que los huecos constituyen el espacio disponible para el ingreso de agua.

El Método 8.302.6 considera un contenido objetivo de huecos de aire de 7 ± 1 % para las probetas compactadas en laboratorio. Por su parte, el grado de saturación representa la proporción del volumen inicial de huecos que se encuentra ocupada por agua, calculándose mediante:

$$S = \frac{V_{\text{agua}}}{V_{\text{aire}}} \times 100$$

Donde:

- S: Grado de saturación $(\%)$.
- V_{agua}: Volumen de agua absorbida (cm^3).
- V_{aire}: Volumen inicial de huecos de aire (cm^3).

El método establece un intervalo de saturación inicial entre 55 % y 80 % para las probetas que serán sometidas al acondicionamiento con humedad. Este control permite establecer condiciones de saturación comparables antes de evaluar su resistencia (Dirección de Vialidad, 2025b).

El Método 8.302.6 establece que el hinchamiento se determina relacionando la variación de volumen de la probeta después del acondicionamiento con su volumen inicial. Esta relación se expresa mediante:

$$H = \frac{V_h - V_0}{V_0} \times 100$$

Donde:

- H: Hinchamiento $(\%)$.
- V_h: Volumen después del acondicionamiento (cm^3).
- V_0: Volumen inicial de la probeta (cm^3).

5.6.4 Razón de resistencia a tracción indirecta

El índice TSR corresponde a la relación entre la resistencia promedio a tracción indirecta del subconjunto acondicionado con humedad y la resistencia promedio del subconjunto seco. El Método 8.302.6 establece su cálculo mediante la siguiente expresión (Dirección de Vialidad, 2025b):

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

Donde:

- TSR: Razón de resistencia a tracción indirecta $(\%)$.
- S_{tm}: Resistencia promedio del subconjunto acondicionado con humedad (kPa).
- S_{td}: Resistencia promedio del subconjunto seco (kPa).

El resultado representa el porcentaje de resistencia que conserva la mezcla después del acondicionamiento. Una disminución del TSR indica una mayor pérdida relativa de resistencia frente a la acción del agua.

6 Metodología

En el presente capítulo se presenta la metodología experimental utilizada para evaluar el comportamiento de mezclas asfálticas en caliente con banda granulométrica IV-A-12 y reemplazo volumétrico del árido natural por escoria de cobre. El procedimiento comienza con la preparación y caracterización de los materiales, continúa con la equivalencia volumétrica y reconstitución granulométrica y finaliza con el diseño Marshall y la evaluación TSR.

6.1 Diseño experimental

El cemento asfáltico CA-24 y los áridos naturales fueron proporcionados por Pavimentos Quilín Ltda., mientras que la escoria de cobre fue facilitada por CODELCO División Ventanas, desde su depósito histórico. Como línea base se utilizó la dosificación IV-A-12 para capa de rodadura proporcionada por Pavimentos Quilín Ltda.



Figura 1: Acopio de escoria de cobre.

A partir del diseño de referencia sin escoria de cobre se establecieron reemplazos volumétricos para cada fracción granulométrica, considerando la razón de densidades entre ambos materiales. Este procedimiento permitió mantener la distribución granulométrica adoptada y evaluar las variaciones de comportamiento asociadas a la incorporación de escoria.

Se consideraron cinco niveles de reemplazo volumétrico: 20 %, 40 %, 60 %, 80 % y 100 %. La condición de 0 % correspondió al diseño de referencia proporcionado por Pavimentos Quilín Ltda., mientras que las mezclas con 20 % a 100 % de escoria fueron confeccionadas y ensayadas durante la campaña experimental.

6.2 Caracterización de materiales

6.2.1 Cuarteo y preparación de las muestras

Previo a la preparación de las mezclas, se realizó la homogeneización de los áridos naturales entregados en sacos, correspondientes a gravilla de 17 mm, gravilla de 13 mm y material fino. Las muestras fueron reducidas mediante cuarteo, secadas y separadas por tamices para disponer de las fracciones necesarias para reconstruir la granulometría.

Debido a la disponibilidad insuficiente de determinadas fracciones finas, parte de la escoria fue sometida a reducción de tamaño utilizando el tambor de la máquina de Los Ángeles. Esta operación se realizó exclusivamente para obtener material destinado a la reconstitución granulométrica y no correspondió a la ejecución del ensayo de desgaste.



Figura 2: Cuarteo del material fino.



Figura 3: Cuarteo del material grueso.



Figura 4: Materiales clasificados por fracción granulométrica.

6.2.2 Densidad y absorción del árido natural

La densidad y absorción del árido natural se determinaron separadamente para las fracciones gruesa y fina. La fracción gruesa se ensayó mediante el Método 8.202.20 y la fracción fina mediante el Método 8.202.21 (Dirección de Vialidad, 2025b)

Para la fracción gruesa, primero se lavó la muestra para remover polvo superficial o materia extraña adherida a las partículas, luego se secó en el horno a $110 \pm 5°C$ hasta alcanzar una masa constante, se dejó enfriar a temperatura ambiente durante $24 \pm 4\,h$ y después se mantuvo sumergida en agua a temperatura ambiente durante $24 \pm 4\,h$, transcurrido este periodo se retiró la muestra y se secaron superficialmente las partículas mediante un paño eliminando la película visible de agua adherida hasta alcanzar la condición saturada superficialmente seca, registrándose M_{SSS}. Posteriormente, la muestra se colocó en el canastillo portamuestra y se mantuvo completamente sumergida en agua a $20 \pm 3°C$ por un periodo de 3 min para determinar M_{SUM}. Finalmente, se secó en el horno a $110 \pm 5°C$ hasta masa constante para obtener M_S.

Para la fracción fina, se separó el material pasante por el tamiz de 2,5 mm. La muestra se redujo mediante cuarteo y posteriormente se secó en horno a $110 \pm 5°C$. Luego se cubrió completamente con agua a temperatura ambiente durante $24 \pm 4\,h$. Finalizado este periodo, se eliminó gradualmente el exceso de agua, revolviendo frecuentemente la muestra para obtener un secado uniforme procurando evitar la pérdida de partículas finas. Para verificar la condición saturada superficialmente seca, se llenó un molde cónico con material suelto y se aplicaron 25 golpes de pisón desde una altura de 5 mm, comprobando el estado posterior de la muestra al levantar el molde. El procedimiento se repitió eliminando humedad hasta que el material se desmoronara suavemente al retirar el molde, indicando que había alcanzado la condición requerida.

Alcanzada esta condición, se registró la masa saturada superficialmente seca M_{sss} y se introdujo la muestra en un matraz, agregando agua a $20 \pm 3°C$ hasta completar aproximadamente dos tercios de su volumen. Se agitó para eliminar las burbujas de aire y se dejó reposar durante 1 h a la misma temperatura. Luego se completó con agua hasta la marca de calibración y se registró la masa del conjunto M_m. Finalmente, se retiró la muestra y se secó en horno a $110 \pm 5°C$ hasta alcanzar masa constante, determinando su masa seca M_s. Para completar las mediciones, se llenó el matraz únicamente con agua a $20 \pm 3°C$ hasta la marca de calibración y se determinó su masa M_a.



Figura 5: Saturación del agregado.



Figura 6: Secado superficial del agregado



Figura 7: Molde cónico y pisón



Figura 8: Determinación de densidad y absorción

A partir de las masas obtenidas se calcularon las densidades reales, la densidad neta y la absorción de agua mediante las expresiones presentadas en el marco teórico. Las densidades reales secas de ambas fracciones se utilizaron para determinar una densidad representativa del árido natural, considerando su participación en la granulometría adoptada.

6.2.3 Densidad y absorción de la escoria de cobre

La densidad real seca, densidad neta y absorción de agua de la escoria de cobre se determinaron mediante el Método 8.202.20 del Manual de Carreteras, siguiendo el mismo procedimiento descrito para la fracción gruesa del árido natural (Dirección de Vialidad, 2025b). El material fino presente en la muestra era inferior al 15 %. No se realizó una determinación independiente para esta fracción, por lo que se adoptó la densidad real seca obtenida para la fracción gruesa como representativa de la escoria utilizada en la dosificación de las mezclas.

6.3 Granulometría adoptada y reconstitución de los agregados

6.3.1 Granulometría de trabajo IV-A-12

La granulometría de trabajo se obtuvo a partir del diseño IV-A-12 proporcionado por Pavimentos Quilín Ltda. Los porcentajes pasantes fueron transformados en porcentajes retenidos parciales y se mantuvo la misma distribución granulométrica para todos los niveles de reemplazo.

La granulometría adoptada se encuentra dentro de la banda semidensa IV-A-12 establecida en la Tabla 5.408.201.F del Volumen N.° 5 del Manual de Carreteras (Dirección de Vialidad, 2025a), cuyos límites se presentan en la Tabla 5:

Tabla 5: Banda IV-A-12 y granulometría de trabajo adoptada.

Tamiz (mm)	Banda IV-A-12 (% pasa)	Granulometría adoptada (% pasa)
20	100	100
12,5	80–95	88
10	70–85	74
5	43–58	54
2,5	28–42	36
0,63	13–24	18
0,315	8–17	13
0,16	6–12	9
0,08	4–8	6

Para la granulometría adoptada, el 100 % del material pasa por el tamiz de 20 mm y el 88 % por el de 12,5 mm. Según el criterio establecido se determinó un tamaño máximo nominal de 20 mm.

Este valor permitió identificar el requisito mínimo de VAM correspondiente a la mezcla de rodadura, establecido en 13 % por la Tabla 3.

6.3.2 Reemplazo volumétrico

Para determinar las masas de árido natural y escoria de cobre correspondientes a cada porcentaje de reemplazo, se utilizaron las densidades reales secas obtenidas durante la caracterización de ambos materiales. Para el árido natural se consideró una densidad representativa correspondiente a la participación de 64 % de material grueso y 36 % de material fino en la granulometría adoptada, mientras que para la escoria se utilizó la densidad real seca determinada experimentalmente. A partir de estos valores se estableció la siguiente razón de densidades:

$$R_d = \frac{\rho_{EC}}{\rho_{AN}}$$

donde:

- R_d: Razón de densidades entre la escoria de cobre y el árido natural.
- ρ_{EC}: Densidad real seca representativa de la escoria de cobre (kg/m³).
- ρ_{AN}: Densidad real seca representativa del árido natural (kg/m³).

Esta relación se utilizó para ajustar la masa de escoria incorporada en cada dosificación, aplicando una misma razón de densidades a todas las fracciones granulométricas.

Para la preparación de las mezclas se adoptó una masa base de 1.100 g de árido natural, valor consistente con el Método 8.302.40 del Manual de Carreteras, que indica que normalmente se requiere esta cantidad

de agregado para obtener una probeta Marshall compactada de aproximadamente 65 mm de altura (Dirección de Vialidad, 2025b).

A partir de la granulometría adoptada se calcularon los porcentajes retenidos parciales mediante la diferencia entre los porcentajes pasantes de dos tamices consecutivos:

$$R_i = P_{i-1} - P_i$$

- R_i: Porcentaje retenido parcial de la fracción i (%).
- P_{i-1}: Porcentaje pasante por el tamiz superior (%).
- P_i: Porcentaje pasante por el tamiz inferior (%).

Para la fracción pasante por 0,080 mm se consideró directamente el porcentaje pasante correspondiente a dicho tamiz. Con los porcentajes retenidos se determinaron las masas de referencia de cada fracción granulométrica a partir de los 1.100 g de árido natural:

$$M_{0,i} = M_0 \cdot \frac{R_i}{100}$$

- $M_{0,i}$: Masa de referencia correspondiente a la fracción i (g).
- M_0: Masa base de árido natural (g).

Una vez determinadas las masas de referencia, se calculó la cantidad de árido natural correspondiente a cada fracción según el porcentaje de reemplazo volumétrico establecido:

$$M_{AN,i} = M_{0,i}(1 - r)$$

- $M_{AN,i}$: Masa de árido natural correspondiente a la fracción i (g).
- r: Fracción de reemplazo volumétrico, expresada en forma decimal.

Por su parte, la masa de escoria de cobre se obtuvo considerando la proporción de árido natural reemplazada y la razón de densidades determinada anteriormente:

$$M_{EC,i} = M_{0,i} \cdot r \cdot R_d$$

- $M_{EC,i}$: Masa de escoria de cobre correspondiente a la fracción i (g).
- $M_{0,i}$: Masa de referencia correspondiente a la fracción i (g).
- r: Fracción de reemplazo volumétrico, expresada en forma decimal.
- R_d: - Razón de densidades entre la escoria de cobre y el árido natural.

De esta manera, se determinaron las masas de ambos materiales para cada intervalo granulométrico, manteniendo la distribución de tamaños adoptada y el porcentaje de reemplazo volumétrico correspondiente.

Finalmente, la masa total de agregado para cada dosificación se obtuvo mediante la suma de las masas de árido natural y escoria de cobre.

6.3.3 Pesaje y reconstitución por fracciones

Para la reconstitución de las mezclas, las masas de árido natural y escoria de cobre se calcularon de forma acumulativa, considerando las fracciones granulométricas desde las más gruesas hacia las más finas. Las masas acumuladas de cada material se determinaron mediante las siguientes expresiones:

$$A_{AN,i} = \sum_{j=1}^{i} M_{AN,j}$$

$$A_{EC,i} = \sum_{j=1}^{i} M_{EC,j}$$

donde:

- $A_{AN,i}$: Masa acumulada de árido natural hasta la fracción i (g).
- $A_{EC,i}$: Masa acumulada de escoria de cobre hasta la fracción i (g).
- $M_{AN,j}$: Masa de árido natural correspondiente a la fracción j (g).
- $M_{EC,j}$: Masa de escoria de cobre correspondiente a la fracción j (g).

La reconstitución de las mezclas se realizó mediante pesaje acumulativo, comenzando por las fracciones de mayor tamaño hasta llegar a las más finas. Para ello, se colocó un recipiente sobre la balanza y se incorporó el árido natural según las masas acumuladas calculadas para cada tamiz. Una vez completado el pesaje, el material se depositó en una bolsa y se repitió el procedimiento con la escoria de cobre. Finalmente, ambos materiales se reunieron en una bolsa, identificada con el porcentaje de reemplazo volumétrico.

Durante el proceso, las fracciones gruesas presentaron mayor dificultad para alcanzar las masas calculadas debido al tamaño individual de las partículas, mientras que las fracciones finas permitieron ajustar con mayor precisión las masas acumuladas.



Figura 9: Pesaje del árido natural.



Figura 10: Pesaje de la escoria de cobre.



Figura 11: Materiales preparados e identificados para las mezclas.

El control se realizó sobre las cantidades acumuladas de árido natural y escoria. La comparación entre masa calculada y masa efectivamente pesada permite registrar las desviaciones de preparación sin confundirlas con cambios de dosificación.

6.4 Diseño Marshall

Se evaluaron mezclas con 20 %, 40 %, 60 %, 80 % y 100 % de reemplazo volumétrico de árido natural por escoria de cobre. La condición de 0 % correspondió al diseño base proporcionado por Pavimentos Quilín Ltda. No se confeccionaron probetas de esta dosificación durante la campaña experimental.

Para cada porcentaje de reemplazo se prepararon tres probetas por contenido de cemento asfáltico CA-24. Las dosificaciones de 20 % y 40 % se evaluaron con contenidos de 4,5 %, 5,0 % y 5,5 %, mientras que para 80 % y 100 % se utilizaron 4,0 %, 4,5 % y 5,0 %. Para el 60 % de escoria se incorporó una serie adicional de 5,5 %, debido a que los tres contenidos iniciales no permitieron determinar el óptimo de asfalto. La distribución del diseño experimental se presenta en la Tabla 6:

Tabla 6: Distribución de probetas confeccionadas para el diseño Marshall.

Escoria	Contenidos de asfalto (%)	Probetas
20 %	4,5 – 5,0 – 5,5	9
40 %	4,5 – 5,0 – 5,5	9
60 %	4,0 – 4,5 – 5,0 – 5,5	12
80 %	4,0 – 4,5 – 5,0	9
100 %	4,0 – 4,5 – 5,0	9
Total		**48**

El contenido de asfalto se calculó respecto de la masa de los agregados utilizados en cada probeta, por lo que la cantidad de CA-24 incorporada dependió del porcentaje de ligante y de la masa correspondiente a cada dosificación.

6.4.1 Preparación, mezclado y compactación

Los agregados previamente secados y reconstituidos, almacenados en bolsas identificadas según el porcentaje de reemplazo, fueron depositados en pailas y calentados en horno junto con el cemento asfáltico CA-24. Una vez que el horno alcanzó la temperatura establecida, se esperó un tiempo adicional para asegurar que los materiales alcanzaran la temperatura requerida. También se precalentaron los moldes Marshall, la espátula y la cuchara junto al quemador. La confección de las probetas se realizó tomando como referencia el Método 8.302.40 del Manual de Carreteras (Dirección de Vialidad, 2025b).

Al retirar los agregados del horno, se depositaron en el recipiente de mezclado y se pesaron para determinar la cantidad de cemento asfáltico que debía incorporarse según su masa y el porcentaje de asfalto correspondiente. Una vez incorporado el ligante, se verificó la temperatura mediante un termómetro. Cuando esta se encontraba dentro del intervalo establecido, se realizó el mezclado hasta obtener un recubrimiento uniforme de las partículas. Si la temperatura era superior a la requerida, se dejó enfriar la mezcla antes de continuar.



Figura 12: Horno de laboratorio.



Figura 13: Recipiente de mezclado y quemador.



Figura 14: Mezclado y control de temperatura.



Figura 15: Moldes Marshall.

Finalizado el mezclado, se comprobó nuevamente la temperatura antes de colocar la mezcla en el molde Marshall. Luego se llenó el molde y se acomodó el material con una espátula, realizando 15 movimientos en el perímetro y 10 en el centro, procurando efectuar el procedimiento rápidamente para reducir la pérdida de temperatura. La compactación se realizó mediante 75 golpes del martillo Marshall sobre una cara de la probeta y otros 75 sobre la cara opuesta, dejando enfriar las probetas antes de retirarlas de los moldes.

Las condiciones utilizadas durante la elaboración de las probetas se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7: Condiciones de elaboración de las probetas Marshall.

Etapa	Condición utilizada
Secado de agregados	110 ± 5 °C
Calentamiento de agregados	170 ± 5 °C
Temperatura de mezclado	150 ± 5 °C
Temperatura de compactación	140 ± 5 °C
Compactación	75 golpes por cara

Fuente: Antecedentes cemento asfaltico Pavimentos Quilín Ltda.

6.4.2 Control de altura y corrección de estabilidad

Una vez enfriadas y desmoldadas las probetas, se midió su altura en cuatro puntos distribuidos alrededor del perímetro, utilizando el promedio como espesor representativo. Posteriormente, se determinó la densidad compactada mediante el Método 8.302.38, registrando para cada probeta su masa seca en aire, masa sumergida en agua y masa saturada superficialmente seca, con las cuales se calculó el volumen y la densidad compactada.

Las probetas fueron acondicionadas en agua a 60 ± 1 °C durante 30 a 40 minutos, para luego ser ensayadas en la prensa Marshall a una velocidad de deformación de 50 ± 1 mm/min, registrando la carga máxima y la deformación como estabilidad y fluencia, respectivamente. Debido a que las probetas presentaron diferencias respecto de la altura de referencia de 63,5 mm, la estabilidad registrada se corrigió mediante el factor correspondiente de la Tabla 8.302.40.A (Dirección de Vialidad, 2025b) , incluida en los anexos



Figura 16: Baño de agua.



Figura 17: Dispositivo pesaje sumergido.



Figura 18: Desmolde de probetas.



Figura 19: Prensa Marshall.

Con estos resultados se calcularon los promedios de densidad compactada, estabilidad corregida y fluencia para cada contenido de asfalto, elaborando las curvas que permitieron identificar los contenidos

asociados a máxima estabilidad y máxima densidad, además de orientar la selección del contenido de ligante utilizado para determinar la DMM.

6.4.3 DMM y parámetros volumétricos

La densidad máxima de la mezcla sin compactar se determinó mediante el Método 8.302.37 del Volumen N.º 8 del Manual de Carreteras. Este ensayo se realizó de manera independiente de las probetas Marshall, debido a que requiere una muestra sin compactar y una cantidad de material diferente de la utilizada en la confección de las probetas.

Para su preparación se reconstituyeron las fracciones de árido natural y escoria manteniendo la granulometría IV-A-12 y los porcentajes de reemplazo volumétrico definidos para cada mezcla. Se empleó el mismo criterio de equivalencia volumétrica, ajustando las masas a la cantidad de material destinada al ensayo.

El Método 8.302.37 establece una masa mínima de muestra según el tamaño máximo nominal del agregado. Para la granulometría adoptada, con tamaño máximo nominal de 20 mm, la Tabla 8.302.37.A indica una masa mínima de 2.500 g. El procedimiento permite analizar la muestra en porciones cuando su volumen supera dos tercios de la capacidad del recipiente, siempre que cada porción tenga una masa mínima de 1.250 g (Dirección de Vialidad, 2025b) .

Las mezclas destinadas a la determinación de DMM se prepararon con un contenido de asfalto próximo al óptimo previsto, tomando como referencia los resultados iniciales de estabilidad y densidad compactada. Para cada porcentaje de reemplazo se utilizó un contenido de asfalto de referencia, según se presenta en la Tabla 8:

Tabla 8: Contenidos de asfalto de referencia para DMM.

Reemplazo de escoria	Contenido de asfalto de referencia
20 %	5,0 %
40 %	5,0 %
60 %	5,0 %
80 %	4,5 %
100 %	4,5 %

Una vez preparada la mezcla asfáltica, se dejó enfriar a temperatura ambiente y se separaron cuidadosamente sus partículas, evitando fracturar los agregados. El material se colocó en un recipiente calibrado y se agregó agua a 25 ± 1 °C hasta cubrir la muestra, aplicando vacío hasta alcanzar una presión residual de 3,7 ± 0,3 kPa, con agitación durante al menos 10 minutos para retirar el aire atrapado. Finalizado el procedimiento se realizaron los pesajes necesarios para determinar la densidad máxima.

Para cada porcentaje de reemplazo se realizaron tres determinaciones, cuyo promedio se utilizó como densidad máxima de referencia. A partir de este valor y del contenido de asfalto utilizado se calculó la densidad efectiva del agregado, con la cual se obtuvieron las DMM correspondientes a los demás porcentajes de ligante de una misma dosificación.

Con las densidades máximas y compactadas se calcularon los huecos de aire V_a, los vacíos en el agregado mineral VAM, los vacíos llenos con asfalto VLL, el asfalto absorbido P_{ba} y el asfalto útil P_{bu}.

6.4.4 Determinación del contenido óptimo

A partir de los resultados mecánicos y volumétricos se identificaron los contenidos de asfalto asociados a máxima estabilidad corregida, máxima densidad compactada y 4 % de huecos de aire, utilizando las curvas elaboradas para cada porcentaje de reemplazo, según el método 8.302.47 (Dirección de Vialidad,

2025b). El contenido óptimo se obtuvo mediante la media aritmética de estos tres valores y se verificó considerando los requisitos de estabilidad, fluencia y VAM establecidos para mezclas de rodadura.

Para representar los valores de estabilidad Marshall, fluencia y VAM correspondientes al contenido óptimo de asfalto, se utilizaron ajustes cuadráticos de los resultados experimentales de cada dosificación cuando dicho contenido no coincidió con uno de los porcentajes ensayados. En los casos en que existía una determinación experimental para el contenido óptimo, se utilizó directamente el valor medido.

6.5 Ensayo TSR

El ensayo TSR se realizó para las mezclas con 20 %, 40 %, 60 %, 80 % y 100 % de reemplazo volumétrico de árido natural por escoria de cobre. Para cada porcentaje de reemplazo se confeccionaron seis probetas, tres destinadas al ensayo en condición seca y tres al acondicionamiento con humedad, completando un total de 30 probetas. La distribución y el número de golpes aplicados por cara se presentan en la Tabla 9:

Tabla 9: Distribución de probetas y compactación para el ensayo TSR.

Escoria (%)	Probetas secas	Probetas acondicionadas	Golpes por cara	Total
20	3	3	28	6
40	3	3	24	6
60	3	3	19	6
80	3	3	15	6
100	3	3	9	6
Total	15	15		30

6.5.1 Preparación, compactación y control de huecos de aire

La preparación de los materiales y el mezclado se realizaron siguiendo el mismo procedimiento utilizado en el diseño Marshall. Para cada porcentaje de reemplazo se empleó la dosificación de cemento asfáltico CA-24 correspondiente al contenido óptimo determinado previamente para esa mezcla.

A diferencia del diseño Marshall, no se mantuvo una compactación fija de 75 golpes por cara, debido a que el Método 8.302.6 establece un porcentaje objetivo de huecos de aire de 7 ± 1 % (Dirección de Vialidad, 2025b). Para determinar la energía de compactación necesaria, se realizaron ensayos preliminares con diferentes números de golpes por cara, calculando los huecos de aire obtenidos en cada prueba hasta alcanzar el intervalo requerido. Una vez establecido el número de golpes para cada dosificación, se confeccionaron las seis probetas correspondientes a ese porcentaje de reemplazo.

Después del enfriamiento y desmolde se determinó la altura de las probetas mediante el Método 8.302.41. Posteriormente, se registraron sus masas seca, sumergida y saturada superficialmente seca, calculando la densidad compactada según el Método 8.302.38. A partir de esta densidad y la densidad máxima correspondiente a cada mezcla se calcularon los porcentajes de huecos de aire, verificando que las probetas se encontraran dentro del intervalo establecido.



Figura 20: Comparación de probetas durante las pruebas de compactación.



Figura 21: Probetas de los subconjuntos húmedo y seco.

6.5.2 Saturación y acondicionamiento de las probetas

Una vez determinadas las propiedades volumétricas, las probetas de cada dosificación se dividieron en dos subconjuntos de tres probetas cada uno, procurando que ambos presentaran porcentajes promedio de huecos de aire similares. Uno de los subconjuntos se mantuvo como referencia en condición seca, mientras que el otro fue destinado al acondicionamiento con humedad.

Las probetas del subconjunto húmedo se sometieron a saturación parcial utilizando agua destilada y una cámara de vacío. Después de aplicar el vacío se determinó la masa saturada superficialmente seca, con la cual se calculó el volumen de agua absorbida y su relación con el volumen inicial de huecos de aire. El Método 8.302.6 establece un grado de saturación inicial entre 55 % y 80 %. Si el valor obtenido es inferior al 55 %, el método indica repetir la saturación aplicando un vacío parcial ligeramente mayor, mientras que, si supera el 80 %, la probeta se considera dañada y debe descartarse. Por lo tanto, se verificó el grado de saturación antes de continuar con el acondicionamiento (Dirección de Vialidad, 2025b)

Una vez alcanzado el intervalo de saturación, las probetas se mantuvieron sumergidas en agua destilada a 60 ± 1 °C durante 24 horas. Posteriormente, se trasladaron a un baño de agua a 25 ± 1 °C durante una hora. Finalizado el acondicionamiento, se registraron nuevamente las alturas y masas necesarias para determinar el volumen, grado de saturación posterior e hinchamiento volumétrico de las probetas.



Figura 22: Probetas del subconjunto húmedo durante acondicionamiento en agua.

Por su parte, las probetas del subconjunto seco se mantuvieron a temperatura ambiente y posteriormente fueron sumergidas en agua a 25 ± 1 °C durante 20 minutos antes del ensayo, permitiendo evaluar ambos subconjuntos bajo la misma temperatura.

6.5.3 Tracción indirecta y cálculo de TSR

Las probetas de ambos subconjuntos se ensayaron a tracción indirecta a una temperatura de 25 ± 1 °C, utilizando la prensa de ensayo con las bandas de carga centradas y paralelas al plano diametral. La carga se aplicó a una velocidad de deformación de 50 ± 1 mm/min, registrando la carga máxima alcanzada por cada probeta, según el Método 8.302.6 (Dirección de Vialidad, 2025b).

Con la carga máxima registrada, el diámetro y la altura de cada probeta inmediatamente antes del ensayo, se calculó su resistencia a tracción indirecta. Posteriormente, se determinaron las resistencias promedio de los subconjuntos seco y acondicionado, a partir de las cuales se obtuvo el TSR correspondiente a cada porcentaje de reemplazo.

7 Resultados

En este capítulo se presentan los resultados de caracterización de los materiales, dosificación volumétrica, diseño Marshall y evaluación de susceptibilidad al daño por humedad de las mezclas asfálticas IV-A-12 elaboradas con cemento asfáltico CA-24.

7.1 Caracterización de los agregados

7.1.1 Densidad y absorción de agua

La caracterización física del árido natural proveniente del río Aconcagua y de la escoria de cobre de División Ventanas permitió obtener las densidades y absorciones de agua de los materiales utilizados en la investigación. Los valores promedio obtenidos para cada agregado se presentan en la Tabla 10:

Tabla 10: Densidad y absorción de agua de los agregados utilizados.

Material	ρRS (kg/m³)	ρRT (kg/m³)	ρN (kg/m³)	α (%)
Árido natural grueso	2.632,5	2.665,2	2.721,4	1,24
Árido natural fino	2.640,9	2.701,5	2.811,5	2,30
Escoria de cobre	3.560,0	3.567,5	3.586,9	0,21

7.1.2 Densidades representativas para el reemplazo volumétrico

A partir de los resultados anteriores se determinaron las densidades reales secas representativas de ambos materiales. Para el árido natural se consideró una proporción de 64 % de material grueso y 36 % de material fino, mientras que para la escoria se utilizó la densidad real seca obtenida experimentalmente. Los valores utilizados y la razón de densidades resultante se presentan en la Tabla 11:

Tabla 11: Densidades reales secas representativas y razón de densidades de los agregados.

Parámetro	Valor
Densidad real seca del árido natural (kg/m³)	2.635,5
Densidad real seca escoria de cobre (kg/m³)	3.560,0
Razón de densidades	1,35

7.2 Granulometría y reconstitución de las mezclas

7.2.1 Granulometría IV-A-12

La granulometría de trabajo se adoptó a partir del diseño proporcionado por Pavimentos Quilín Ltda., manteniendo una misma distribución granulométrica para todas las mezclas. Los porcentajes pasantes adoptados y los límites correspondientes a la banda IV-A-12 del Manual de Carreteras se presentan en la Tabla 12:

Tabla 12: Banda granulométrica IV-A-12 y granulometría de trabajo adoptada.

Tamiz	Abertura (mm)	Diseño (% pasa)	Banda IV-A-12 (% pasa)
3/4"	20	100	100
1/2"	12,5	88	80–95
3/8"	10	74	70–85
N.º 4	5	54	43–58
N.º 8	2,5	36	28–42
N.º 30	0,63	18	13–24

N.º 50	0,315	13	8–17
N.º 100	0,16	9	6–12
N.º 200	0,08	6	4–8

La Figura 23 presenta la curva granulométrica adoptada junto con los límites superior e inferior de la banda IV-A-12.

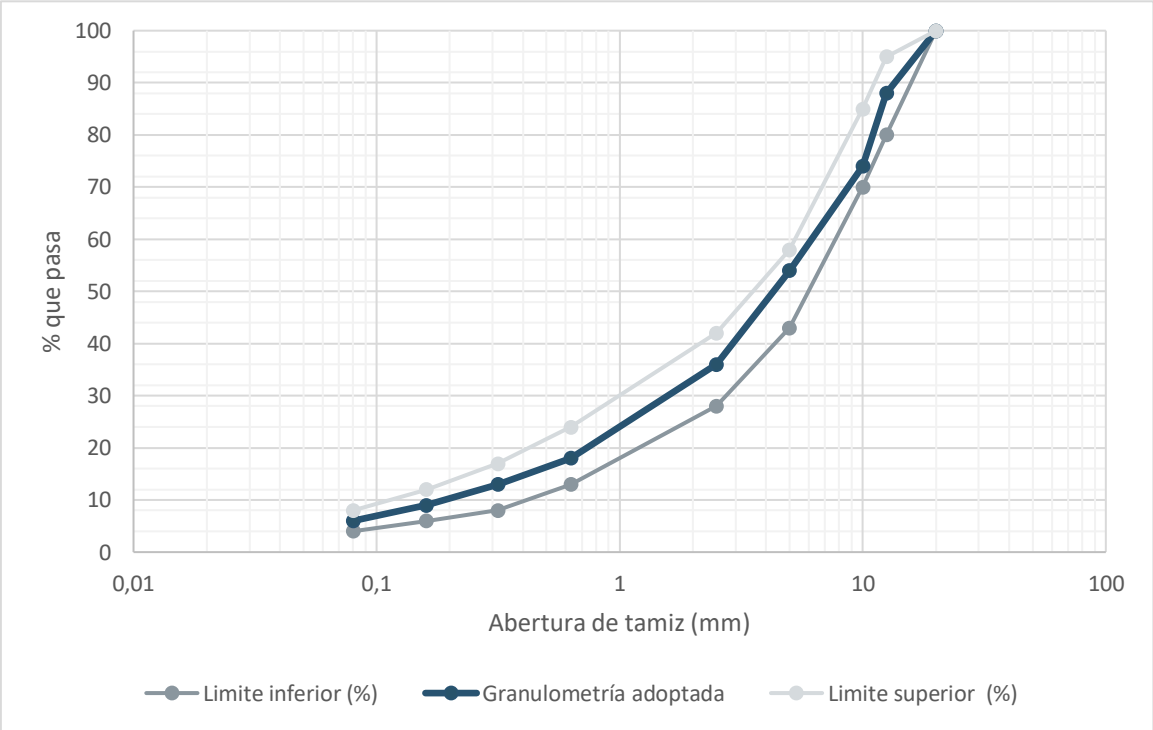


Figura 23: Granulometría de trabajo adoptada y límites de la banda IV-A-12.

7.2.2 Reconstitución por equivalencia volumétrica

A partir de la granulometría adoptada y de la razón de densidades obtenida entre los materiales se calcularon las masas correspondientes a cada porcentaje de reemplazo volumétrico, considerando una masa de referencia de 1.100 g de árido natural. Los resultados se presentan en la Tabla 13:

Tabla 13: Masas de árido natural y escoria de cobre según porcentaje de reemplazo volumétrico.

Reemplazo volumétrico (%)	Árido natural (g)	Escoria de cobre (g)	Masa total (g)
0	1100,0	0,0	1100,0
20	880,0	297,2	1.177,2
40	660,0	594,4	1.254,4
60	440,0	891,6	1.331,6
80	220,0	1.188,8	1.408,8
100	0,0	1.486,0	1.486,0

La Figura 24 muestra cómo varían las masas calculadas de árido natural, escoria de cobre y agregado total según el porcentaje de reemplazo volumétrico.

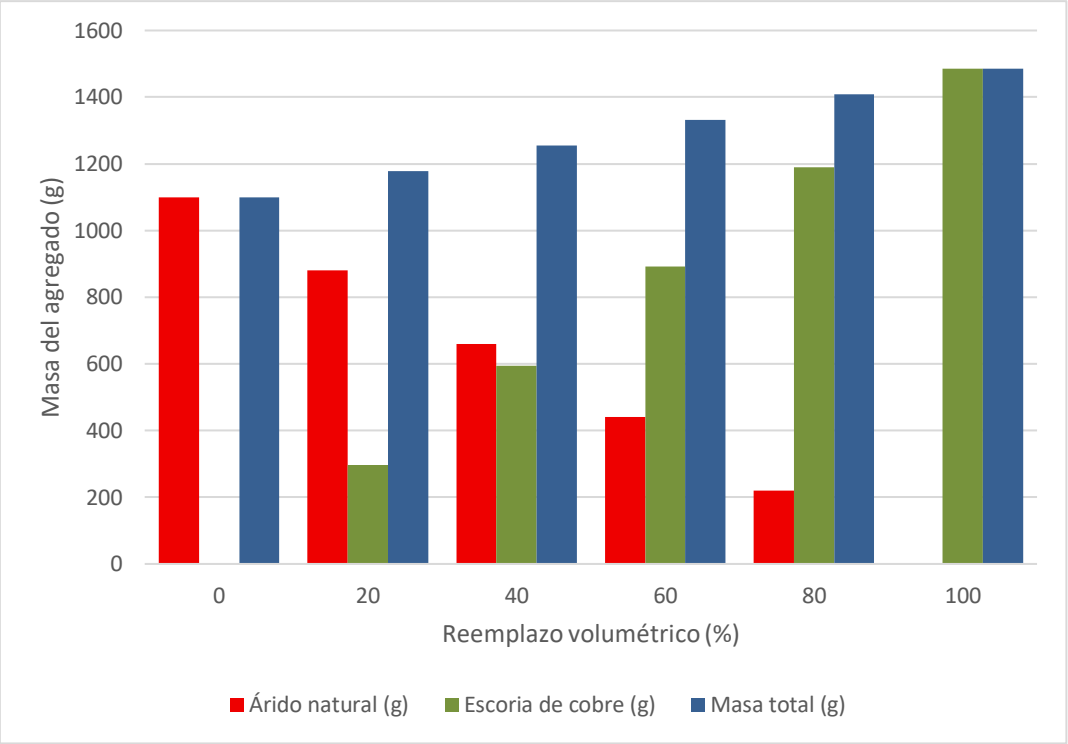


Figura 24: Masas de árido natural y escoria de cobre según porcentaje de reemplazo volumétrico.

7.3 Resultados del diseño Marshall

En este apartado se presentan los resultados del diseño Marshall de las mezclas asfálticas IV-A-12 con reemplazos volumétricos de 20 %, 40 %, 60 %, 80 % y 100 % de árido natural por escoria de cobre. Para cada dosificación se evaluaron distintos contenidos de cemento asfáltico CA-24, obteniéndose los valores de densidad compactada, estabilidad, fluencia y propiedades volumétricas utilizados para determinar el contenido óptimo de ligante.

Los resultados se presentan en función del contenido de asfalto para cada porcentaje de reemplazo. La mezcla convencional con 0 % de reemplazo corresponde al diseño de referencia proporcionado por Pavimentos Quilín Ltda. y se incluye en los gráficos comparativos al contenido óptimo de asfalto.

7.3.1 Densidad de las mezclas compactadas

La densidad de las probetas compactadas se determinó a partir de las masas seca, sumergida y saturada superficialmente seca registradas para cada contenido de asfalto. Las mediciones individuales de las tres probetas y sus respectivos resultados se presentan en los anexos, separados por porcentaje de reemplazo.

En la Tabla 14 se presentan las densidades compactadas promedio obtenidas para todos los contenidos de asfalto ensayados.

Tabla 14: Densidad compactada promedio según porcentaje de reemplazo y contenido de asfalto.

Reemplazo (%)	Contenido de asfalto (%)	Densidad compactada promedio (kg/m³)
20	4,5	2.545,7
20	5,0	2.557,5

20	5,5	2.573,8
40	4,5	2.723,7
40	5,0	2.732,6
40	5,5	2.725,2
60	4,0	2.898,9
60	4,5	2.902,5
60	5,0	2.902,9
60	5,5	2.890,8
80	4,0	3.126,9
80	4,5	3.053,8
80	5,0	3.141,6
100	4,0	3.253,5
100	4,5	3.299,1
100	5,0	3.253,0

7.3.2 Estabilidad Marshall

Los valores promedio de estabilidad Marshall corregida para cada contenido de asfalto se presentan en la Tabla 15:

Tabla 15: Estabilidad Marshall corregida promedio según porcentaje de reemplazo y contenido de asfalto.

Reemplazo (%)	Asfalto (%)	Estabilidad corregida promedio (kN)
20	4,5	9,09
20	5,0	9,90
20	5,5	9,48
40	4,5	9,51
40	5,0	10,57
40	5,5	9,70
60	4,0	10,61
60	4,5	11,30
60	5,0	11,86
60	5,5	9,30
80	4,0	9,32
80	4,5	11,78
80	5,0	9,24
100	4,0	10,52
100	4,5	11,44
100	5,0	8,53

La Figura 25 presenta los valores de estabilidad Marshall correspondientes al contenido óptimo de asfalto de cada dosificación, incluyendo la mezcla convencional de referencia y el mínimo normativo de 9 kN.

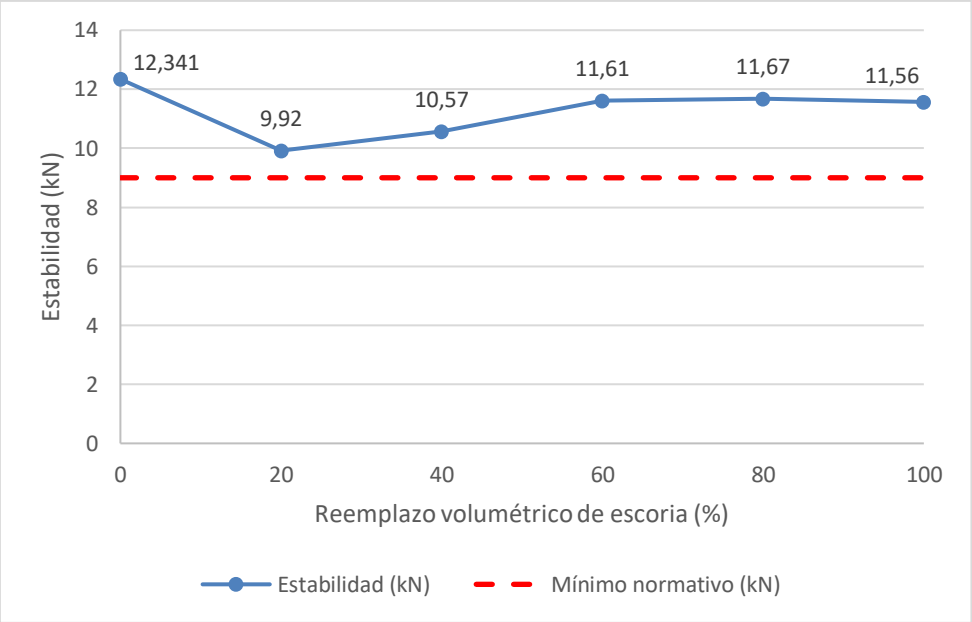


Figura 25: Estabilidad Marshall al contenido óptimo de asfalto según porcentaje de reemplazo volumétrico.

7.3.3 Fluencia Marshall

En la Tabla 16 se presentan los valores promedio de fluencia Marshall para las distintas dosificaciones, expresados en unidades de 0,25 mm.

Tabla 16: Fluencia Marshall promedio según porcentaje de reemplazo y contenido de asfalto.

Reemplazo (%)	Asfalto (%)	Fluencia promedio (0,25 mm)
20	4,5	13,47
20	5,0	14,21
20	5,5	14,41
40	4,5	13,74
40	5,0	14,60
40	5,5	14,91
60	4,0	12,13
60	4,5	12,98
60	5,0	14,82
60	5,5	13,71
80	4,0	11,89
80	4,5	14,18
80	5,0	14,83
100	4,0	14,12

100	4,5	12,93
100	5,0	11,81

La Figura 26 presenta los valores de fluencia Marshall correspondientes al contenido óptimo de asfalto de cada dosificación, junto con los límites normativos de 8 y 16 unidades de 0,25 mm.

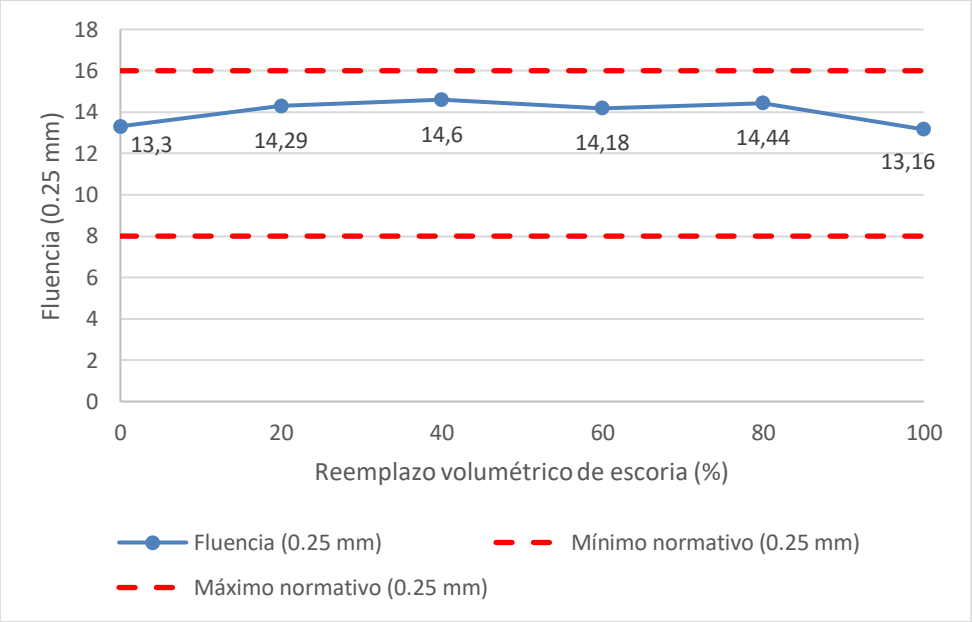


Figura 26: Fluencia Marshall al contenido óptimo de asfalto según porcentaje de reemplazo volumétrico.

7.3.4 Densidad máxima de la mezcla

En la Tabla 17 se presentan las tres determinaciones experimentales de densidad máxima de la mezcla (DMM) y el promedio correspondiente a cada porcentaje de reemplazo.

Tabla 17: Densidad máxima experimental y promedio de las mezclas asfálticas.

Reemplazo (%)	Asfalto (%)	DMM 1 (kg/m³)	DMM 2 (kg/m³)	DMM 3 (kg/m³)	DMM promedio (kg/m³)
20	5,0	2.636	2.646	2.648	2.643
40	5,0	2.803	2.884	2.863	2.850
60	5,0	3.005	3.030	2.995	3.010
80	4,5	3.172	3.237	3.216	3.208
100	4,5	3.402	3.406	3.412	3.407

7.3.5 Huecos de aire de las mezclas

En la Tabla 18 se presentan los porcentajes de huecos de aire obtenidos para cada contenido de asfalto, junto con el contenido de ligante correspondiente al 4 % de huecos de aire para cada dosificación.

Tabla 18: Huecos de aire y contenido de asfalto correspondiente al 4 % de huecos.

Reemplazo (%)	Asfalto ensayado (%)	Huecos de aire (%)	Asfalto para 4 % de huecos (%)

20	4,5	4,41	
20	5,0	3,23	4,70
20	5,5	1,88	
40	4,5	5,25	
40	5,0	4,12	5,00
40	5,5	3,57	
60	4,0	5,50	
60	4,5	4,47	
60	5,0	3,56	4,75
60	5,5	3,07	
80	4,0	3,53	
80	4,5	4,81	4,20
80	5,0	1,07	
100	4,0	5,58	
100	4,5	3,17	4,25
100	5,0	3,46	

7.3.6 Vacíos en el agregado mineral (VAM)

En la Tabla 19 se presentan los porcentajes de vacíos en el agregado mineral (VAM) obtenidos para cada contenido de asfalto y porcentaje de reemplazo.

Tabla 19: Vacíos en el agregado mineral según porcentaje de reemplazo y contenido de asfalto.

Reemplazo (%)	Asfalto (%)	VAM (%)
20	4,5	15,08
20	5,0	15,09
20	5,5	14,96
40	4,5	15,20
40	5,0	15,32
40	5,5	15,95
60	4,0	14,35
60	4,5	14,65
60	5,0	15,05
60	5,5	15,80
80	4,0	11,97
80	4,5	14,44
80	5,0	12,40
100	4,0	12,12
100	4,5	11,32

100	5,0	12,97

La Figura 27 presenta los valores de VAM correspondientes al contenido óptimo de asfalto de cada dosificación, junto con el mínimo normativo de 13 %.

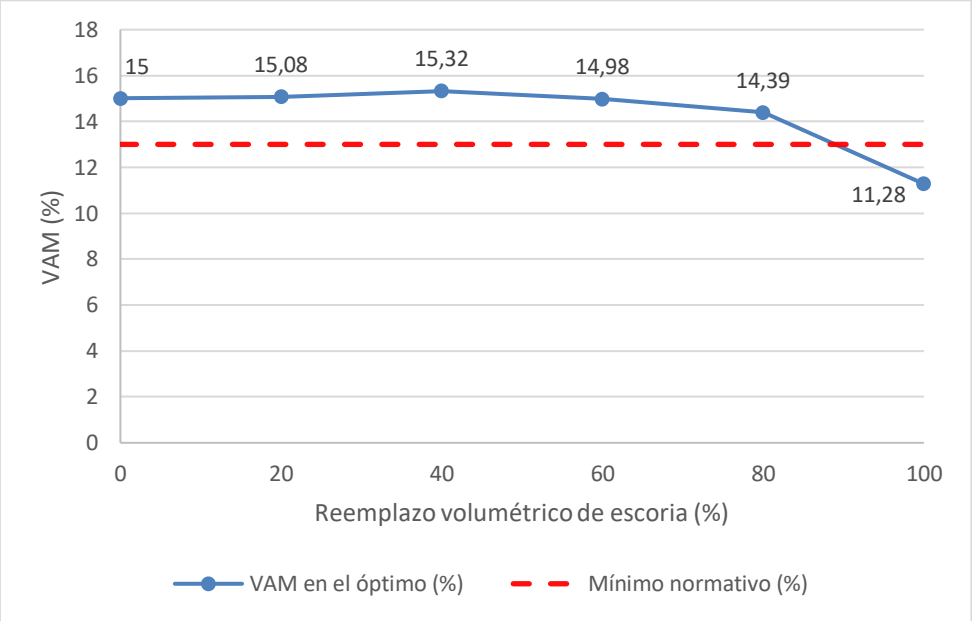


Figura 27: Vacíos en el agregado mineral al contenido óptimo de asfalto según porcentaje de reemplazo volumétrico.

7.3.7 Determinación del contenido óptimo de asfalto

En la Tabla 20 se presentan los contenidos de asfalto correspondientes a la máxima estabilidad corregida, máxima densidad compactada y 4 % de huecos de aire, junto con el contenido óptimo aproximado y la masa calculada de CA-24 para cada dosificación.

Tabla 20: Determinación del contenido óptimo de asfalto para cada porcentaje de reemplazo.

Reemplazo (%)	Máx. estabilidad (%)	Máx. densidad (%)	4 % de huecos (%)	Asfalto óptimo (%)	Masa de CA-24 en el óptimo (g)
20	5,00	5,50	4,70	5,1 ± 0,3	59,7
40	5,00	5,00	5,00	5,0 ± 0,3	62,7
60	5,00	5,00	4,75	4,9 ± 0,3	65,5
80	4,50	5,00	4,20	4,6 ± 0,3	64,4
100	4,50	4,50	4,25	4,4 ± 0,3	65,7

7.4 Resultados del ensayo TSR

Se presentan los resultados del ensayo de resistencia a la tracción indirecta para las mezclas asfálticas con reemplazos volumétricos de 20 %, 40 %, 60 %, 80 % y 100 % de árido natural por escoria de cobre. Las probetas fueron confeccionadas utilizando los contenidos óptimos de asfalto determinados mediante el diseño Marshall.

Los resultados incluyen las propiedades volumétricas iniciales, los grados de saturación alcanzados durante el acondicionamiento y las resistencias obtenidas para los subconjuntos seco y húmedo. Los registros individuales de las seis probetas de cada dosificación se presentan en los anexos correspondientes.

7.4.1 Propiedades volumétricas iniciales

Las propiedades volumétricas de las probetas destinadas al ensayo TSR se resumen en la Tabla 21. Para cada porcentaje de reemplazo se considera la densidad máxima de mezcla (DMM) correspondiente al contenido óptimo de asfalto utilizado en la confección de las probetas.

Tabla 21: Propiedades volumétricas iniciales de las probetas TSR.

Reemplazo (%)	Asfalto óptimo (%)	Huecos de aire (%)
20	5,1	6,2–7,0
40	5,0	6,5–6,9
60	4,9	6,0–6,7
80	4,6	6,3–6,9
100	4,4	6,0–6,4

7.4.2 Saturación y acondicionamiento en humedad

Los resultados del acondicionamiento se presentan en la Tabla 22, considerando los grados de saturación inicial de las probetas húmedas. También se incluye el hinchamiento volumétrico registrado después del acondicionamiento.

Tabla 22: Resultados de saturación e hinchamiento de las probetas acondicionadas.

Reemplazo (%)	Huecos de aire (%)	Saturación inicial (%)	Hinchamiento (%)
20	6,2–7,0	57,5–62,6	0,2–0,3
40	6,5–6,9	56,9–60,8	0,5–1,2
60	6,0–6,7	66,5–72,9	0,7–1,1
80	6,3–6,9	57,9–63,0	0,2–0,5
100	6,0–6,4	58,8–63,3	0,5–0,9

7.4.3 Resistencia a la tracción indirecta

En la Tabla 23 se presentan las resistencias promedio a tracción indirecta calculadas para las probetas secas y acondicionadas de cada porcentaje de reemplazo.

Tabla 23: Resistencia promedio a tracción indirecta de los subconjuntos seco y acondicionado.

Reemplazo (%)	ITS seca promedio (MPa)	ITS húmeda promedio (MPa)
20	1,306	1,097
40	1,211	0,966
60	1,121	0,877
80	1,287	0,971
100	1,114	0,683

Los resultados individuales de carga máxima, altura, diámetro y resistencia a la tracción indirecta, junto con los registros de densidad, saturación e hinchamiento de las probetas, se presentan en los anexos correspondientes a cada porcentaje de reemplazo.

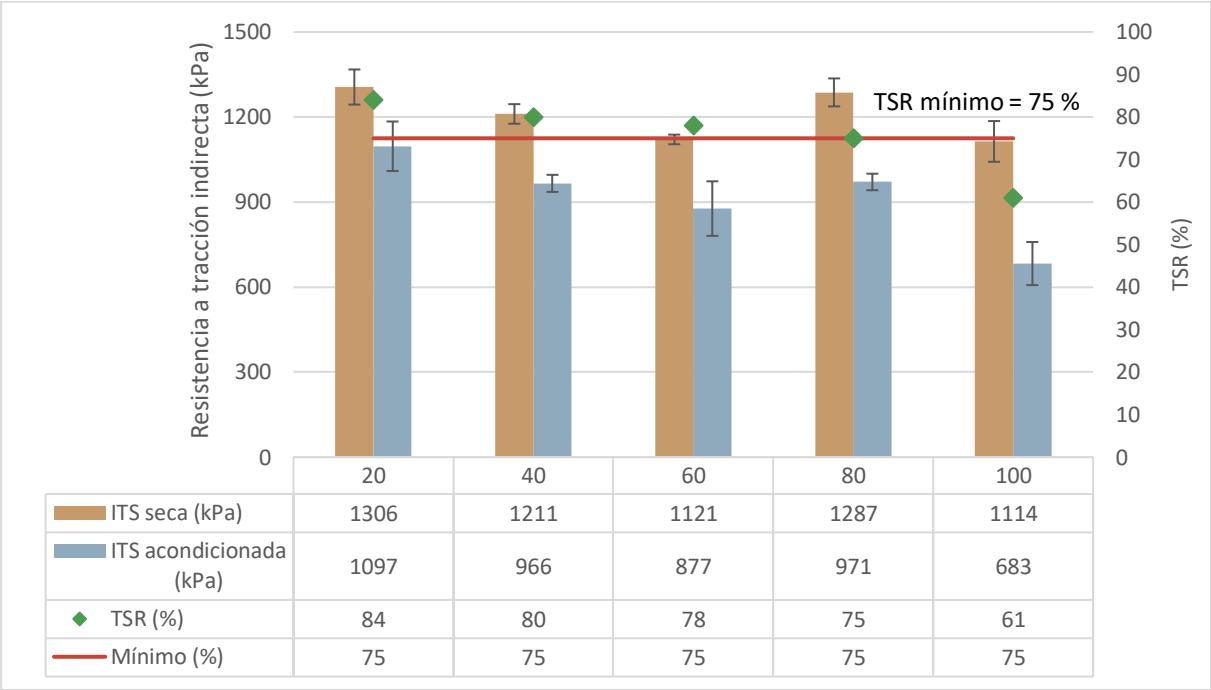
7.4.4 Índice TSR

A partir de las resistencias promedio de los subconjuntos seco y húmedo se calculó la relación TSR para cada porcentaje de reemplazo. Los resultados se presentan en la Tabla 24:

Tabla 24: TSR según reemplazo volumétrico.

Reemplazo (%)	TSR (%)
20	84
40	80
60	78
80	75
100	61

Complementariamente, en la Figura 28 se muestran las resistencias promedio a tracción indirecta en condición seca y acondicionada, junto con los valores de TSR y el valor mínimo de referencia considerado en la evaluación.



	20	40	60	80	100
ITS seca (kPa)	1306	1211	1121	1287	1114
ITS acondicionada (kPa)	1097	966	877	971	683
TSR (%)	84	80	78	75	61
Mínimo (%)	75	75	75	75	75

Figura 28: Resultados del ensayo TSR según porcentaje de reemplazo de escoria de cobre.

8 Análisis de resultados

La caracterización de los materiales permitió determinar que la escoria de cobre presenta una densidad real seca de 3.560 kg/m³, considerablemente superior a los 2.635,5 kg/m³ del árido natural. Los valores obtenidos son del mismo orden que los informados en investigaciones anteriores realizadas con escoria de División Ventanas, donde también se identificó una densidad mayor que la de los áridos naturales (Boock Pantoja, 2017; Herrera Bustos, 2016). Sin embargo, el aumento de densidad compactada no representa necesariamente una mejor compactación, debido a que también responde al mayor peso específico de las partículas incorporadas.

Los resultados del diseño Marshall muestran que la incorporación de escoria de cobre permitió obtener mezclas con estabilidades superiores al mínimo de 9 kN establecido para capas de rodadura por el Manual de Carreteras. La estabilidad máxima aumentó desde 9,90 kN para el reemplazo de 20 % hasta 11,86 kN para el 60 %, disminuyendo levemente posteriormente a 11,78 kN y 11,44 kN para las dosificaciones de 80 % y 100 %. Este comportamiento muestra que el aumento de escoria favoreció inicialmente la resistencia de las mezclas durante el ensayo, aunque no produjo una mejora continua al alcanzar los mayores porcentajes de reemplazo.

El comportamiento mecánico observado puede relacionarse con la forma de las partículas de escoria, que presentan una mayor proporción de caras fracturadas respecto del árido natural. Pérez Mejías (2017) identificó un 100 % de partículas chancadas en la escoria de Ventanas, mientras que el árido del río Aconcagua presentó aproximadamente un 93 %. Estos antecedentes fueron ratificados por los valores informados por Pavimentos Quilín Ltda. para los materiales proporcionados y utilizados en la presente investigación, con un 92 % de partículas chancadas en la gravilla de 17 mm, un 94 % en la de 13 mm y un 100 % en la escoria. Esta diferencia puede favorecer la trabazón entre partículas y aumentar la resistencia al desplazamiento cuando la mezcla es sometida a una carga. Por lo tanto, la angularidad de la escoria constituye una posible explicación del aumento de estabilidad registrado en los reemplazos intermedios.

En relación con la resistencia de las partículas, Boock Pantoja (2017) y Pérez Mejías (2017) registraron porcentajes de desgaste Los Ángeles superiores para la escoria respecto de los áridos naturales. Sin embargo, esta diferencia se ve influenciada por la mayor densidad de la escoria, que modifica las condiciones de impacto durante el ensayo. Para complementar esta evaluación, Pérez Mejías (2017) determinó índices de trituración de 3,8 % para la escoria y 3,6 % para el árido Aconcagua, obteniendo resultados cercanos frente a este tipo de solicitación. La resistencia individual de las partículas también podría contribuir al comportamiento Marshall, aunque la diferencia de apenas 0,2 puntos porcentuales entre los índices de trituración muestra una respuesta similar de ambos materiales. Por ello, el desgaste Los Ángeles no debe utilizarse como único indicador de su resistencia, más bien, el aumento de estabilidad observado en los reemplazos intermedios podría relacionarse principalmente con la forma y trabazón de las partículas dentro del esqueleto mineral, sin descartar la contribución de su resistencia individual.

Respecto de la fluencia Marshall, todas las dosificaciones presentaron valores dentro del intervalo normativo de 8 a 16 unidades de 0,25 mm. La mezcla convencional de 0 % proporcionada por Pavimentos Quilín Ltda. registró una fluencia de 13,3 unidades. En comparación, las mezclas con escoria presentaron un aumento progresivo hasta el reemplazo de 60 %, que alcanzó 14,82 unidades. Posteriormente, la fluencia disminuyó a 14,18 y 12,93 unidades para los reemplazos de 80 % y 100 %, respectivamente.

Para el contenido óptimo de asfalto, los resultados muestran una disminución progresiva desde 5,1 % para el reemplazo de 20 % hasta 4,4 % para el reemplazo total. Al comparar ambas dosificaciones, también se observa una reducción en los tres criterios utilizados para determinar el óptimo mediante el método Marshall. El contenido asociado a máxima estabilidad disminuyó de 5,0 % a 4,5 %, el correspondiente a máxima densidad de 5,5 % a 4,5 % y el de 4 % de huecos de aire de 4,70 % a 4,25 %. Aunque estos criterios no presentaron una disminución continua entre todas las dosificaciones, los resultados muestran que las mezclas con mayores porcentajes de escoria requirieron, en general, una menor proporción de ligante respecto de la masa de agregado.

Este comportamiento podría relacionarse con la baja absorción de la escoria y los cambios en la estructura volumétrica de las mezclas. Boock Pantoja (2017) obtuvo una absorción de asfalto de 0,2 % para la escoria y 0,7 % para el árido natural, lo que indica una menor penetración del ligante al interior de las partículas. Sin embargo, esta propiedad no determina por sí sola el contenido óptimo. Orešković et al. (2023) observaron un aumento al incorporar 30 % de escoria, que relacionaron con una posible mayor superficie específica y rugosidad de las partículas.

La disminución porcentual del contenido óptimo no significó un menor consumo de asfalto en masa. Debido a que el reemplazo se realizó por equivalencia volumétrica, la mayor densidad de la escoria incrementó la masa total de agregado utilizada en cada dosificación. Así, la cantidad calculada de CA-24 pasó de 59,7 g para el reemplazo de 20 % a 65,7 g para el 100 %. Por lo tanto, aunque disminuyó la proporción de ligante respecto de la masa mineral, aumentó la cantidad necesaria para el volumen de referencia. Como antecedente, Pavimentos Quilín Ltda. informó un contenido óptimo de asfalto de 5,0 % para su mezcla convencional sin escoria, de 5,2 % para el diseño con 20 % de escoria en masa y de 5,3 % para el diseño con 30 %. Sin embargo, estos diseños utilizaron una granulometría y un criterio de reemplazo distintos a los de esta investigación, por lo que sus resultados se consideran antecedentes de referencia y no permiten establecer una comparación directa.

Desde el punto de vista volumétrico, los vacíos en el agregado mineral presentaron una tendencia general a disminuir conforme aumentó el porcentaje de escoria. Las mezclas con reemplazos parciales superaron el mínimo de 13 % establecido para el tamaño máximo nominal de 20 mm, mientras que la dosificación con 100 % no cumplió este requisito. Los huecos de aire, por su parte, se mantuvieron dentro del intervalo de 3 % a 5 % para los contenidos de asfalto próximos al óptimo. Aunque se mantuvo la misma granulometría, las diferencias en las características físicas de las partículas y su disposición durante la compactación podrían explicar parte de la variación del VAM.

El VAM comprende el espacio ocupado por el asfalto efectivo y los huecos de aire dentro de la mezcla compactada, por ello un valor reducido puede limitar el espacio disponible para alojar una cantidad adecuada de ligante efectivo, condición que podría afectar la durabilidad de la mezcla. En el reemplazo total, el incumplimiento de este requisito representa una limitación volumétrica, pese a alcanzar una estabilidad Marshall superior al mínimo exigido.

Respecto de la susceptibilidad al daño por humedad, el ensayo TSR mostró una disminución progresiva de la resistencia retenida conforme aumentó la incorporación de escoria. Los valores de TSR fueron de 84 %, 80 %, 78 %, 75 % y 61 % para los reemplazos de 20 %, 40 %, 60 %, 80 % y 100 %. Las dosificaciones parciales superaron el mínimo de 75 % establecido para capas de rodadura, aunque la mezcla con 80 % presentó un margen de cumplimiento reducido. En cambio, el reemplazo total perdió aproximadamente un 39 % de su resistencia después del acondicionamiento, evidenciando una mayor susceptibilidad al daño por humedad.

Las probetas utilizadas en el ensayo TSR presentaron porcentajes de huecos de aire dentro del intervalo requerido de 6 % a 8 % y los grados de saturación inicial se encontraron entre 56,9 % y 72,9 %, cumpliendo el rango de 55 % a 80 %. De esta manera, las dosificaciones fueron evaluadas bajo las condiciones volumétricas de acondicionamiento consideradas para el ensayo.

La diferencia de comportamiento frente al agua se aprecia al comparar las resistencias a tracción indirecta de las probetas secas y acondicionadas. La mezcla con 20 % presentó una resistencia seca promedio de 1,31 MPa y una resistencia acondicionada de 1,10 MPa, mientras que el reemplazo total registró valores de 1,11 MPa y 0,68 MPa. Esto muestra que la mezcla con 100 % no solo presentó una menor resistencia inicial, sino que también perdió una mayor proporción de su capacidad resistente después del acondicionamiento. Por otra parte, la dosificación con 80 % alcanzó una resistencia seca superior a la obtenida con 60 %, pero presentó un TSR menor. Por lo tanto, una mayor resistencia en condición seca no garantiza una mejor conservación de esa resistencia frente a la acción del agua.

Al comparar estos resultados con los antecedentes proporcionados por Pavimentos Quilín Ltda., se observa que la mezcla convencional de referencia presentó un TSR cercano al 88 %, mientras que los diseños con 20 % y 30 % de escoria en masa registraron valores de 94 % y 85 %. Estos resultados

muestran que los reemplazos parciales pueden conservar una resistencia favorable frente a la humedad e incluso superar la referencia convencional, como ocurrió con el diseño de 20 % en masa. La disminución del TSR entre ambos diseños con escoria también coincide con la tendencia observada en esta investigación. Tal como se indicó anteriormente, estos resultados se consideran antecedentes de referencia y no permiten una comparación directa.

La disminución de resistencia resulta interesante considerando que la escoria utilizada presentó una absorción de agua de apenas 0,21 %, inferior a la registrada para las fracciones gruesa y fina del árido natural. Sin embargo, una baja absorción del agregado no significa que la mezcla sea impermeable, debido a que el agua puede ingresar por los huecos existentes entre las partículas y alcanzar la zona de contacto entre el asfalto y el material pétreo. Además, la resistencia de esta unión depende de las características químicas y superficiales del agregado, por lo que una posible pérdida de adherencia constituye otro mecanismo que podría contribuir a la disminución del TSR.

Pérez Mejías (2017) obtuvo resultados favorables de adherencia con escoria de Ventanas mediante distintos ensayos. Sin embargo, estos procedimientos se realizaron principalmente con partículas superiores a 2,5 mm y utilizando emulsión asfáltica, por lo que no representan necesariamente el comportamiento de las fracciones finas en una mezcla asfáltica en caliente. Por su parte, Raposeiras et al. (2021) observaron que los tamaños finos de escoria presentaron un comportamiento deficiente frente al agua, incluso inferior al obtenido con agregados convencionales de naturaleza silícea. En cambio, los tamaños gruesos e intermedios mostraron resultados más favorables, evidenciando que la fracción granulométrica reemplazada influye en la resistencia al daño por humedad.

Estos antecedentes permiten plantear una posible explicación para la disminución del TSR observada en esta investigación. Debido a que el reemplazo se realizó proporcionalmente en todas las fracciones granulométricas, al aumentar el porcentaje total de escoria también aumentó la participación de partículas finas de este material. Según la granulometría adoptada, la proporción volumétrica de escoria correspondiente al material menor a 2,5 mm pasó de aproximadamente 7,2 % del volumen total de agregados para el reemplazo de 20 % a 36 % para el reemplazo total. Aunque se mantuvo la misma distribución granulométrica, cambió progresivamente la composición mineral del material fino que participa en la formación del mástico asfáltico. Considerando lo observado por Raposeiras et al. (2021), esta modificación podría contribuir al comportamiento menos favorable frente al agua de las mezclas con mayores porcentajes de escoria.

Finalmente, la comparación entre los resultados Marshall y TSR muestra que ambas evaluaciones entregan información complementaria. El reemplazo de 60 % alcanzó la mayor estabilidad Marshall de la serie, con 11,86 kN, mientras que la mezcla con 20 % presentó la mayor resistencia retenida frente a la humedad, con un TSR de 84 %. Por su parte, el reemplazo de 40 % alcanzó una estabilidad de 10,57 kN y un TSR de 80 %. Estos resultados permiten considerarlo una alternativa de equilibrio entre resistencia mecánica, comportamiento volumétrico y susceptibilidad al daño por humedad. Si bien el 20 % ofrece una mayor resistencia retenida y el 60 % una mayor estabilidad, el 40 % presenta una condición intermedia favorable al considerar conjuntamente los parámetros evaluados.

9 Conclusiones

Los resultados obtenidos permiten establecer que la escoria de cobre proveniente de División Ventanas presenta condiciones favorables para su incorporación parcial en mezclas asfálticas en caliente IV-A-12. La caracterización de los materiales confirmó la importancia de realizar el reemplazo por equivalencia volumétrica, debido a la mayor densidad de la escoria respecto del árido natural. Este procedimiento permitió mantener una misma distribución granulométrica y comparar el comportamiento de las distintas dosificaciones.

Mediante el diseño Marshall se comprobó que los reemplazos evaluados pueden alcanzar condiciones adecuadas de estabilidad y fluencia. Sin embargo, la respuesta mecánica no mejoró de manera continua al aumentar la cantidad de escoria. Asimismo, la disminución porcentual del contenido óptimo de asfalto no representó necesariamente un menor consumo de ligante en masa. Desde el punto de vista volumétrico, los reemplazos parciales cumplieron los requisitos considerados para el diseño, mientras que la mezcla con 100 % presentó un VAM inferior al mínimo exigido, limitando su implementación como carpeta de rodadura.

La mayor estabilidad obtenida con algunos porcentajes de reemplazo también abre la posibilidad de estudiar si estas mezclas permitirían reducir el espesor de las capas asfálticas. Sin embargo, para evaluar esta alternativa sería necesario realizar ensayos complementarios y analizar el comportamiento estructural del pavimento, ya que la estabilidad Marshall por sí sola no permite justificar una reducción de espesor.

Por otra parte, su mayor densidad permite considerar otras aplicaciones, como muros de contención por gravedad, contrapesos y elementos de protección costera, donde el peso propio del material puede resultar favorable. También podría evaluarse su incorporación en suelos de baja capacidad de soporte, con el propósito de mejorar sus propiedades geotécnicas y determinar un posible aumento del índice CBR. Asimismo, su conveniencia económica dependerá de las condiciones de procesamiento y transporte, considerando la mayor masa necesaria para reemplazar un mismo volumen de áridos naturales.

De manera complementaria, personal de Pavimentos Quilín señaló que las mezclas con escoria de cobre requerían un mayor tiempo de espera antes de iniciar la compactación, con el fin de alcanzar una temperatura adecuada para obtener la densidad exigida. Este comportamiento podría relacionarse con el elevado contenido de compuestos de hierro y la mayor densidad de la escoria, características que podrían favorecer su capacidad de almacenamiento térmico. De comprobarse una menor velocidad de enfriamiento, esta propiedad podría permitir mayores tiempos de transporte sin que la mezcla experimente descensos significativos de temperatura, favoreciendo su aplicación en obras alejadas de las plantas asfálticas o ubicadas en zonas de bajas temperaturas. Asimismo, permitiría evaluar una reducción de la temperatura de salida de planta, siempre que se mantengan las condiciones adecuadas de trabajabilidad y compactación, lo que podría disminuir los requerimientos energéticos durante la producción. Esta característica también podría resultar beneficiosa para pavimentaciones nocturnas y justificar el estudio de su incorporación en mezclas asfálticas tibias.

El ensayo TSR permitió identificar una disminución progresiva de la resistencia retenida conforme aumentó el reemplazo. Aunque las mezclas con 20 %, 40 %, 60 % y 80 % superaron el mínimo establecido para capas de rodadura, el cumplimiento del 80 % presentó un margen reducido y el reemplazo total no alcanzó el requisito de resistencia frente al daño por humedad.

Considerando las exigencias mecánicas, volumétricas y de resistencia frente a la humedad, el reemplazo de 40 % se identificó como una alternativa de equilibrio entre las dosificaciones ensayadas, al presentar una estabilidad de 10,57 kN y un TSR de 80 %. Las mezclas con 20 % y 60 % también mostraron resultados favorables, destacando la primera por su mayor resistencia retenida y la segunda por su mayor estabilidad Marshall. En cambio, el 80 % presentó una menor holgura frente al requisito de TSR y el reemplazo total no resultó adecuado. De esta manera, se identificó un rango de reemplazo de 20 % a 60 % como el más favorable entre los porcentajes estudiados.

Además de su comportamiento mecánico, la utilización de escoria de cobre presenta interés desde el punto de vista ambiental, ya que permitiría aprovechar parte del material acumulado históricamente en los depósitos de las fundiciones y reducir la extracción de áridos naturales provenientes de ríos y canteras. De esta manera, su incorporación en obras viales podría contribuir a disminuir las alteraciones asociadas a la explotación de estos recursos y dar un uso productivo a un subproducto de la actividad minera.

Finalmente, los resultados obtenidos permiten establecer que la escoria de cobre de División Ventanas constituye una alternativa técnicamente viable para el reemplazo parcial de áridos naturales. Su aplicación requiere considerar tanto el comportamiento mecánico como la resistencia al daño por humedad, además de las condiciones propias de cada proyecto. La investigación aporta antecedentes para continuar evaluando su utilización en infraestructura vial y avanzar en el aprovechamiento de subproductos mineros bajo los principios de la economía circular.

10 Referencias

Asphalt Institute. (2011). *The asphalt binder handbook - MS-26*. 223.

Ávila Cortés, P., Brantes Abarca, R., & Gamboa Lagos, P. (2023). *Estado Actual de la Hidrometalurgia de Cobre en Chile*.

Banco Central de Chile. (2026, marzo 18). *Minería del cobre, ratio del PIB, por clase de actividad económica, referencia 2018, series empalmadas*. Base de Datos Estadísticos (BDE). https://si3.bcentral.cl/siete/ES/Siete/Cuadro/CAP_CCNN/MN_CCNN76/CCNN_EP18_05_ratio?idSerie=F032.PIB.RPA.N.Z.EP18.03.05.0.A

Boock Pantoja, J. L. (2017). *Utilización de Escoria de Cobre como Agregado Pétreo en Mezclas Asfálticas en Caliente, y Evaluación del Comportamiento Mecánico a Largo Plazo* [Trabajo de Título]. Universidad de Valparaíso.

Brante Lara, G. (2024). Copper Slag as Aggregate in a Sustainable Solution for Basic Road Pavements. *Journal of Construction and Civil Engineering*, *12*(1), 1–7. https://rioc.ufro.cl/index.php/rioc/article/view/3339/2371

Chapple, P. (2026, junio 1). *Nueva vida: Pavimentación con escoria de cobre*. Carreteras Pan-Americanas. https://www.carreteras-pa.com/reportajes/nueva-vida-pavimentacion-con-escoria-de-cobre

Chaubey, N. K., & Mishra, A. K. (2024). Feasibility of Using Electric Induction Furnace Steel Slag and Copper Slag in the Production of Hot Mix Asphalt. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, *57*(2), 225–246. https://doi.org/10.22059/CEIJ.2023.354048.1906

Comisión Chilena del Cobre. (2026, julio). *Producción mundial de cobre de mina - anual. Principales países*. Boletín Mensual Electrónico Cochilco. https://boletin.cochilco.cl/productos/boletin.asp?anio=2026&mes=07&tabla=tabla34

Corporación Nacional del Cobre de Chile. (2018). *Servicio de venta de escoria final División Ventanas: Resumen ejecutivo*. https://www.codelco.com/prontus_codelco/site/artic/20180404/asocfile/20180404101617/resumen_ejecutivo_venta_escoria.pdf

Corporación Nacional del Cobre de Chile. (2023, mayo 31). *La fundición Ventanas apaga sus hornos tras 58 años de historia*. https://codelco.com/la-fundicion-ventanas-apaga-sus-hornos-tras-58-anos-de-historia

Corporación Nacional del Cobre de Chile. (2025a, marzo 25). *División Ventanas presenta proyectos piloto para reutilizar la escoria de cobre de la antigua fundición*. https://codelco.com/division-ventanas-presenta-proyectos-piloto-para-reutilizar-la-escoria

Corporación Nacional del Cobre de Chile. (2025b, abril 24). *Realizan pruebas para validar el reemplazo de áridos del río por escoria de cobre en la Ruta F 30 E*. https://codelco.com/realizan-pruebas-para-validar-el-reemplazo-de-aridos-del-rio-por-escoria

Corporación Nacional del Cobre de Chile. (2025c, octubre 27). *Codelco Ventanas inicia nuevos proyectos piloto de pavimentación con escoria de cobre en calles de Quintero y Puchuncaví*. https://codelco.com/codelco-ventanas-inicia-nuevos-proyectos-piloto-de-pavimentacion-con

Corporación Nacional del Cobre de Chile. (2025d, diciembre 17). *Concluyen obras de caminos mejorados con escoria de cobre en Quintero y Puchuncaví*. https://codelco.com/concluyen-obras-de-caminos-mejorados-con-escoria-de-cobre-en-quintero-y

Corporación Nacional del Cobre de Chile. (2026, febrero 18). *Un hito para Chile y División Ventanas: Se aprueba el reglamento que autoriza el uso de la escoria de cobre como árido artificial*. https://www.codelco.com/un-hito-para-chile-y-division-ventanas-se-aprueba-el-reglamento-que

Dirección de Vialidad. (2025a). *Manual de Carreteras. Volumen N.° 5: Especificaciones Técnicas Generales de Construcción*.

Dirección de Vialidad. (2025b). *Manual de Carreteras. Volumen N.º 8: Especificaciones y Métodos de Muestreo, Ensaye y Control*.

Đorđević, J., Orešković, M., Sc, M. C., Mladenović, G., & Ce, P. D. (2018). Mogućnost primene bakarne zgure u asfaltnim mešavinama. *Journal of Road and Traffic Engineering*, *64*(4), 29–38. https://doi.org/10.31075/PIS.64.04.04

Gorai, B., Jana, R. K., & Premchand. (2003). Characteristics and utilisation of copper slag—a review. *Resources, Conservation and Recycling*, *39*(4), 299–313. https://doi.org/10.1016/S0921-3449(02)00171-4

Guo, F., Pei, J., Zhang, J., Xue, B., Sun, G., & Li, R. (2020). Study on the adhesion property between asphalt binder and aggregate: A state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*, *256*, 119474. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.119474

Herrera Bustos, S. S. (2016). *Evaluación de la Utilización de Escoria, Producto de la Extracción de Cobre, como Árido para Pavimentos Flexibles* [Trabajo de Título]. Universidad de Valparaíso.

Instituto Nacional de Normalización. (2025). *NCh3894:2025. Áridos — Áridos artificiales en base a escorias de fundición del proceso pirometalúrgico del cobre — Clasificación, caracterización y orientaciones para su uso como material de construcción*. https://www.inn.cl/nch-aprobadas?page=8

Instituto Nacional de Normalización. (2026). *NCh3895:2026. Pavimentos — Áridos artificiales en base a escorias de fundición del proceso pirometalúrgico del cobre — Trazabilidad y requisitos para incorporar en bases y subbases de pavimento*. https://www.inn.cl/nch-aprobadas?page=3

Klaffenbach, E., Montenegro, V., Guo, M., & Blanpain, B. (2023). Sustainable and Comprehensive Utilization of Copper Slag: A Review and Critical Analysis. *Journal of Sustainable Metallurgy 2023 9:2*, *9*(2), 468–496. https://doi.org/10.1007/S40831-023-00683-4

Ministerio de Salud. (2004). *Decreto N.° 148 de 2003: Aprueba reglamento sanitario sobre manejo de residuos peligrosos*. https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=226458

Ministerio de Salud. (2026). *Decreto N.° 46 de 2025: Aprueba reglamento que establece los requisitos para autorizar el uso de escorias de cobre como áridos artificiales para la construcción*. https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1221362

Ministerio del Medio Ambiente. (2016). *Ley N.° 20.920: Establece marco para la gestión de residuos, la responsabilidad extendida del productor y fomento al reciclaje*. https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1090894

Nazer, A., Castillo, M., López, A., Ortiz, L., Pavez, O., Nazer, A., Castillo, M., López, A., Ortiz, L., & Pavez, O. (2021). Uso de escoria de cobre de un vertedero abandonado en mezclas asfálticas. *Obras y proyectos*, (30), 91–98. https://doi.org/10.4067/S0718-28132021000200091

Orešković, M., Santos, J., Mladenović, G., & Rajaković-Ognjanović, V. (2023). The feasibility of using copper slag in asphalt mixtures for base and surface layers based on laboratory results. *Construction and Building Materials*, *384*, 131285. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.131285

Pardo Vera, C. A. (2018). *Utilización de Escoria de Cobre como Agregado Pétreo para Solución de Caminos Básicos de la Región de Valparaíso* [Trabajo de Título]. Universidad de Valparaíso.

Pérez Mejías, Y. E. A. (2017). *Utilización de escoria de cobre de CODELCO Ventanas como agregado pétreo para tratamientos superficiales asfálticos simples en la Región de Valparaíso* [Memoria de Titulación]. Universidad Técnica Federico Santa María.

Raposeiras, A. C., Movilla-Quesada, D., Bilbao-Novoa, R., Cifuentes, C., Ferrer-Norambuena, G., & Castro-Fresno, D. (2018). The use of copper slags as an aggregate replacement in asphalt mixes with RAP: Physical–chemical and mechanical behavioural analysis. *Construction and Building Materials*, *190*, 427–438. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.09.120

Raposeiras, A. C., Movilla-Quesada, D., Muñoz-Cáceres, O., Andrés-Valeri, V. C., & Lagos-Varas, M. (2021). Production of asphalt mixes with copper industry wastes: Use of copper slag as raw material replacement. *Journal of Environmental Management*, *293*, 112867. https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2021.112867

Sharma, D. K., Swami, B. L., & Vyas, A. K. (2021). Performance evaluation of hot mix asphalt containing copper slag. *Materials Today: Proceedings*, *38*, 1241–1244. https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.07.557

Tian, H., Guo, Z., Pan, J., Zhu, D., Yang, C., Xue, Y., Li, S., & Wang, D. (2021). Comprehensive review on metallurgical recycling and cleaning of copper slag. *Resources, Conservation and Recycling*, *168*, 105366. https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2020.105366

11 Anexos

Tabla 25: Pesajes y propiedades físicas del árido grueso y de la escoria de cobre.

Material	N.º	Seco (g)	SSS (g)	Sumergido (g)	ρRS (kg/m³)	ρN (kg/m³)	Abs. (%)
Árido natural grueso	1	2.595	2.627	1.638	2.623,9	2.711,6	1,23
Árido natural grueso	2	2.723	2.757	1.726	2.641,1	2.731,2	1,25
Escoria de cobre	1	2.528	2.532	1.820	3.550,6	3.570,6	0,16
Escoria de cobre	2	2.288	2.294	1.653	3.569,4	3.603,1	0,26

Tabla 26: Pesajes y propiedades físicas del árido natural fino.

N.º	Seco (g)	SSS (g)	Matraz + agua (g)	Matraz + muestra + agua (g)	ρRS (kg/m³)	ρN (kg/m³)	Abs. (%)
1	107,39	110,01	647,70	717,13	2.646,4	2.829,0	2,44
2	103,07	105,29	647,60	713,78	2.635,4	2.794,0	2,15

Tabla 27: Distribución granulométrica de trabajo, retenidos parciales y masa de referencia.

Tamiz	Abertura (mm)	Banda IV-A-12 (% pasa)	Granulometría (% pasa)	Retenido parcial (%)	Base 0 % (g)
3/4"	20	100	100	0	0,0
1/2"	12,5	80–95	88	12	132,0
3/8"	10	70–85	74	14	154,0
N.º 4	5	43–58	54	20	220,0
N.º 8	2,5	28–42	36	18	198,0
N.º 30	0,63	13–24	18	18	198,0
N.º 50	0,315	8–17	13	5	55,0
N.º 100	0,16	6–12	9	4	44,0
N.º 200	0,08	4–8	6	3	33,0
Pasa N.º 200	< 0,08	—	—	6	66,0
Total	—	—	—	100	1.100,0

Tabla 28: Masas parciales y acumuladas de dosificación: 0 % de reemplazo volumétrico.

Fracción	Retenido (%)	Árido natural (g)	Escoria (g)	Total (g)	Árido acum. (g)	Escoria acum. (g)
3/4"	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1/2"	12	132,0	0,0	132,0	132,0	0,0
3/8"	14	154,0	0,0	154,0	286,0	0,0
N.º 4	20	220,0	0,0	220,0	506,0	0,0
N.º 8	18	198,0	0,0	198,0	704,0	0,0
N.º 30	18	198,0	0,0	198,0	902,0	0,0
N.º 50	5	55,0	0,0	55,0	957,0	0,0
N.º 100	4	44,0	0,0	44,0	1.001,0	0,0
N.º 200	3	33,0	0,0	33,0	1.034,0	0,0
Pasa N.º 200	6	66,0	0,0	66,0	1.100,0	0,0

Tabla 29: Masas parciales y acumuladas de dosificación: 20 % de reemplazo volumétrico.

Fracción	Retenido (%)	Árido natural (g)	Escoria (g)	Total (g)	Árido acum. (g)	Escoria acum. (g)
3/4"	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1/2"	12	105,6	35,7	141,3	105,6	35,7
3/8"	14	123,2	41,6	164,8	228,8	77,3
N.º 4	20	176,0	59,4	235,4	404,8	136,7
N.º 8	18	158,4	53,5	211,9	563,2	190,2
N.º 30	18	158,4	53,5	211,9	721,6	243,7
N.º 50	5	44,0	14,9	58,9	765,6	258,6
N.º 100	4	35,2	11,9	47,1	800,8	270,5
N.º 200	3	26,4	8,9	35,3	827,2	279,4
Pasa N.º 200	6	52,8	17,8	70,6	880,0	297,2

Tabla 30: Masas parciales y acumuladas de dosificación: 40 % de reemplazo volumétrico.

Fracción	Retenido (%)	Árido natural (g)	Escoria (g)	Total (g)	Árido acum. (g)	Escoria acum. (g)
3/4"	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1/2"	12	79,2	71,3	150,5	79,2	71,3
3/8"	14	92,4	83,2	175,6	171,6	154,5
N.º 4	20	132,0	118,9	250,9	303,6	273,4
N.º 8	18	118,8	107,0	225,8	422,4	380,4
N.º 30	18	118,8	107,0	225,8	541,2	487,4
N.º 50	5	33,0	29,7	62,7	574,2	517,1
N.º 100	4	26,4	23,8	50,2	600,6	540,9
N.º 200	3	19,8	17,8	37,6	620,4	558,7
Pasa N.º 200	6	39,6	35,7	75,3	660,0	594,4

Tabla 31: Masas parciales y acumuladas de dosificación: 60 % de reemplazo volumétrico.

Fracción	Retenido (%)	Árido natural (g)	Escoria (g)	Total (g)	Árido acum. (g)	Escoria acum. (g)
3/4"	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1/2"	12	52,8	107,0	159,8	52,8	107,0
3/8"	14	61,6	124,8	186,4	114,4	231,8
N.º 4	20	88,0	178,3	266,3	202,4	410,1
N.º 8	18	79,2	160,5	239,7	281,6	570,6
N.º 30	18	79,2	160,5	239,7	360,8	731,1
N.º 50	5	22,0	44,6	66,6	382,8	775,7
N.º 100	4	17,6	35,7	53,3	400,4	811,4
N.º 200	3	13,2	26,7	39,9	413,6	838,1
Pasa N.º 200	6	26,4	53,5	79,9	440,0	891,6

Tabla 32: Masas parciales y acumuladas de dosificación: 80 % de reemplazo volumétrico.

Fracción	Retenido (%)	Árido natural (g)	Escoria (g)	Total (g)	Árido acum. (g)	Escoria acum. (g)
3/4"	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1/2"	12	26,4	142,7	169,1	26,4	142,7
3/8"	14	30,8	166,4	197,2	57,2	309,1
N.º 4	20	44,0	237,8	281,8	101,2	546,9
N.º 8	18	39,6	214,0	253,6	140,8	760,9
N.º 30	18	39,6	214,0	253,6	180,4	974,8
N.º 50	5	11,0	59,4	70,4	191,4	1.034,3
N.º 100	4	8,8	47,6	56,4	200,2	1.081,8
N.º 200	3	6,6	35,7	42,3	206,8	1.117,5
Pasa N.º 200	6	13,2	71,3	84,5	220,0	1.188,8

Tabla 33: Masas parciales y acumuladas de dosificación: 100 % de reemplazo volumétrico.

Fracción	Retenido (%)	Árido natural (g)	Escoria (g)	Total (g)	Árido acum. (g)	Escoria acum. (g)
3/4"	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1/2"	12	0,0	178,3	178,3	0,0	178,3
3/8"	14	0,0	208,0	208,0	0,0	386,4
N.º 4	20	0,0	297,2	297,2	0,0	683,6
N.º 8	18	0,0	267,5	267,5	0,0	951,1
N.º 30	18	0,0	267,5	267,5	0,0	1.218,5
N.º 50	5	0,0	74,3	74,3	0,0	1.292,9
N.º 100	4	0,0	59,4	59,4	0,0	1.352,3
N.º 200	3	0,0	44,6	44,6	0,0	1.396,9
Pasa N.º 200	6	0,0	89,2	89,2	0,0	1.486,0

Tabla 34: Resultados de referencia de la mezcla convencional (0 % de reemplazo), proporcionados por Pavimentos Quilín.

Asfalto (%)	Densidad (g/cm³)	Va (%)	VAM (%)	DMM (kg/m³)	VLL (%)	Fluencia (0,25 mm)	Estabilidad (N)
4,0	2,308	6,9	15,4	2.480	55	10,1	10.345
4,5	2,327	5,5	15,1	2.463	63	12,1	12.237
5,0	2,341	4,3	15,0	2.447	71	13,3	12.341
5,5	2,336	3,9	15,6	2.431	75	14,4	11.232
6,0	2,332	3,4	16,1	2.415	79	16,5	10.733

Tabla 35: Factores de corrección de estabilidad Marshall según altura de probeta.

Altura (mm)	Factor	Altura (mm)	Factor	Altura (mm)	Factor
56,5	1,216	58,6	1,146	60,7	1,081
56,6	1,213	58,7	1,143	60,8	1,078
56,7	1,209	58,8	1,140	60,9	1,074
56,8	1,205	58,9	1,137	61,0	1,071
56,9	1,201	59,0	1,134	61,1	1,068
57,0	1,198	59,1	1,131	61,2	1,065
57,1	1,194	59,2	1,128	61,3	1,062
57,2	1,190	59,3	1,124	61,4	1,059
57,3	1,187	59,4	1,121	61,5	1,056
57,4	1,184	59,5	1,118	61,6	1,053
57,5	1,181	59,6	1,115	61,7	1,049
57,6	1,178	59,7	1,112	61,8	1,046
57,7	1,174	59,8	1,109	61,9	1,043
57,8	1,171	59,9	1,106	62,0	1,040
57,9	1,168	60,0	1,103	62,1	1,037
58,0	1,165	60,1	1,099	62,2	1,035
58,1	1,162	60,2	1,096	62,3	1,032
58,2	1,159	60,3	1,093	62,4	1,029
58,3	1,156	60,4	1,090	62,5	1,027
58,4	1,153	60,5	1,087	62,6	1,024
58,5	1,149	60,6	1,084	62,7	1,021

Fuente: Dirección de Vialidad. Manual de Carreteras, Volumen N.° 8, edición 2025, Método 8.302.40 Tabla 8.302.40A.

Tabla 36: Mediciones de altura y factores de corrección de estabilidad: 20 % de escoria.

Asfalto (%)	Probeta	h1 (mm)	h2 (mm)	h3 (mm)	h4 (mm)	Altura media (mm)	Factor altura
4,5	1	62,8	62,7	62,7	62,5	62,67	1,021
4,5	2	61,4	61,2	61,3	61,3	61,30	1,062
4,5	3	62,1	61,9	62,0	61,9	61,98	1,040
5,0	1	59,4	59,1	59,8	59,2	59,38	1,121
5,0	2	59,2	58,7	58,9	58,9	58,93	1,137
5,0	3	58,8	58,5	58,5	58,6	58,60	1,146
5,5	1	60,5	60,9	60,6	60,4	60,60	1,084
5,5	2	61,2	61,0	61,4	61,1	61,17	1,065
5,5	3	59,2	59,6	59,3	59,2	59,33	1,124

Tabla 37: Pesajes y densidad compactada individual: 20 % de escoria.

Asfalto (%)	Probeta	Masa seca (g)	Masa sumergida (g)	Masa SSS (g)	Absorción (%)	Densidad (kg/m³)
4,5	1	1.224,7	744,5	1.227,0	0,5	2.538,2
4,5	2	1.225,4	746,3	1.227,5	0,4	2.546,6
4,5	3	1.225,9	747,9	1.228,2	0,5	2.552,4
5,0	1	1.230,9	750,4	1.232,6	0,4	2.552,7
5,0	2	1.232,4	752,5	1.234,0	0,3	2.559,5
5,0	3	1.232,8	753,0	1.234,5	0,4	2.560,3
5,5	1	1.238,8	757,0	1.239,9	0,2	2.565,3
5,5	2	1.238,5	760,0	1.239,6	0,2	2.582,4
5,5	3	1.236,9	757,5	1.238,1	0,2	2.573,7

Tabla 38: Estabilidad medida, corrección por altura y fluencia Marshall: 20 % de escoria.

Asfalto (%)	Probeta	Fluencia (0,25 mm)	Estabilidad medida (N)	Factor de altura	Estabilidad corregida (N)
4,5	1	14,984	8.900	1,021	9.087
4,5	2	11,768	8.550	1,062	9.080
4,5	3	13,672	8.740	1,040	9.090
5,0	1	13,248	8.670	1,121	9.719
5,0	2	14,476	8.920	1,137	10.142
5,0	3	14,900	8.590	1,146	9.844
5,5	1	13,416	8.900	1,084	9.648
5,5	2	14,772	8.460	1,065	9.010
5,5	3	15,052	8.700	1,124	9.779

Tabla 39: Determinaciones experimentales de densidad máxima de mezcla: 20 % de escoria.

Det.	Masa seca (g)	Picnómetro + agua (g)	Picnómetro + agua + muestra (g)	Densidad del agua (kg/m³)	DMM (kg/m³)
1	1.573,0	6.828,0	7.806,0	997,1	2.636,0
2	1.575,9	6.828,0	7.810,0	997,1	2.645,8
3	1.552,8	6.828,0	7.796,0	997,1	2.647,6

Tabla 40: Propiedades volumétricas por contenido de asfalto: 20 % de escoria.

Asfalto (%)	Densidad compactada (kg/m³)	DMM (kg/m³)	Huecos de aire (%)	VAM (%)	VLL (%)	Densidad efectiva (kg/m³)
4,5	2.545,7	2.663,3	4,41	15,08	70,76	2.871,4
5,0	2.557,5	2.643,0	3,23	15,09	78,60	2.871,4
5,5	2.573,8	2.623,2	1,88	14,96	87,43	2.871,4

Tabla 41: Mediciones de altura y factores de corrección de estabilidad: 40 % de escoria.

Asfalto (%)	Probeta	h1 (mm)	h2 (mm)	h3 (mm)	h4 (mm)	Altura media (mm)	Factor altura
4,5	1	60,3	60,8	60,5	60,8	60,60	1,084
4,5	2	60,7	60,9	60,7	60,9	60,80	1,078
4,5	3	59,3	59,1	58,7	59,0	59,03	1,134
5,0	1	59,2	59,1	59,0	59,7	59,25	1,124
5,0	2	58,4	58,5	58,2	58,5	58,40	1,153
5,0	3	58,0	57,9	58,2	58,3	58,10	1,162
5,5	1	59,4	58,9	59,1	59,7	59,28	1,124
5,5	2	58,8	58,8	59,1	59,1	58,95	1,134
5,5	3	60,7	60,5	60,4	60,5	60,52	1,087

Tabla 42: Pesajes y densidad compactada individual: 40 % de escoria.

Asfalto (%)	Probeta	Masa seca (g)	Masa sumergida (g)	Masa SSS (g)	Absorción (%)	Densidad (kg/m³)
4,5	1	1.305,6	827,8	1.307,4	0,4	2.722,3
4,5	2	1.308,3	830,0	1.310,2	0,4	2.724,5
4,5	3	1.310,1	831,1	1.312,0	0,4	2.724,3
5,0	1	1.310,7	835,2	1.314,2	0,7	2.736,3
5,0	2	1.313,9	834,3	1.315,5	0,3	2.730,5
5,0	3	1.312,8	833,6	1.314,3	0,3	2.731,0
5,5	1	1.318,9	836,4	1.320,6	0,4	2.723,9
5,5	2	1.315,7	834,5	1.317,3	0,3	2.725,1
5,5	3	1.319,2	837,2	1.321,0	0,4	2.726,7

Tabla 43: Estabilidad medida, corrección por altura y fluencia Marshall: 40 % de escoria.

Asfalto (%)	Probeta	Fluencia (0,25 mm)	Estabilidad medida (N)	Factor de altura	Estabilidad corregida (N)
4,5	1	12,188	9.120	1,084	9.886
4,5	2	13,292	8.520	1,078	9.185
4,5	3	15,744	8.340	1,134	9.458
5,0	1	13,248	9.210	1,124	10.352
5,0	2	14,816	9.100	1,153	10.492
5,0	3	15,744	9.350	1,162	10.865
5,5	1	14,136	8.210	1,124	9.228
5,5	2	14,644	9.060	1,134	10.274
5,5	3	15,948	8.820	1,087	9.587

Tabla 44: Determinaciones experimentales de densidad máxima de mezcla: 40 % de escoria.

Det.	Masa seca (g)	Picnómetro + agua (g)	Picnómetro + agua + muestra (g)	Densidad del agua (kg/m³)	DMM (kg/m³)
1	1.580,0	6.828,0	7.846,0	997,1	2.803,2
2	1.579,0	6.828,0	7.861,0	997,1	2.883,6
3	1.580,5	6.828,0	7.858,0	997,1	2.862,7

Tabla 45: Propiedades volumétricas por contenido de asfalto: 40 % de escoria.

Asfalto (%)	Densidad compactada (kg/m³)	DMM (kg/m³)	Huecos de aire (%)	VAM (%)	VLL (%)	Densidad efectiva (kg/m³)
4,5	2.723,7	2.874,7	5,25	15,20	65,46	3.130,9
5,0	2.732,6	2.850,0	4,12	15,32	73,11	3.130,9
5,5	2.725,2	2.826,0	3,57	15,95	77,62	3.130,9

Tabla 46: Mediciones de altura y factores de corrección de estabilidad: 60 % de escoria.

Asfalto (%)	Probeta	h1 (mm)	h2 (mm)	h3 (mm)	h4 (mm)	Altura media (mm)	Factor altura
4,0	1	57,0	57,1	57,3	57,3	57,17	1,190
4,0	2	58,0	58,3	58,3	58,1	58,17	1,159
4,0	3	59,1	59,0	58,9	59,2	59,05	1,131
4,5	1	58,9	58,9	59,2	59,0	59,00	1,134
4,5	2	58,5	58,3	58,3	58,7	58,45	1,149
4,5	3	58,2	58,1	57,1	57,1	57,62	1,178
5,0	1	57,8	58,1	58,0	57,9	57,95	1,165
5,0	2	58,4	58,3	58,2	58,7	58,40	1,153
5,0	3	58,8	58,5	58,8	59,2	58,83	1,140
5,5	1	59,3	59,4	59,2	59,5	59,35	1,121
5,5	2	59,0	59,2	59,1	59,3	59,15	1,128
5,5	3	58,8	59,0	59,1	59,2	59,03	1,134

Tabla 47: Pesajes y densidad compactada individual: 60 % de escoria.

Asfalto (%)	Probeta	Masa seca (g)	Masa sumergida (g)	Masa SSS (g)	Absorción (%)	Densidad (kg/m³)
4,0	1	1.379,4	905,0	1.381,2	0,4	2.896,7
4,0	2	1.380,8	906,8	1.382,9	0,4	2.900,2
4,0	3	1.378,6	905,1	1.380,5	0,4	2.899,9
4,5	1	1.387,4	910,6	1.389,0	0,3	2.900,1
4,5	2	1.385,9	910,3	1.387,8	0,4	2.902,4
4,5	3	1.386,8	911,1	1.388,5	0,4	2.904,9
5,0	1	1.380,4	913,8	1.391,1	2,2	2.892,1
5,0	2	1.379,4	911,8	1.387,1	1,6	2.902,2
5,0	3	1.383,4	917,4	1.392,1	1,8	2.914,3
5,5	1	1.401,0	917,4	1.402,4	0,3	2.888,7
5,5	2	1.399,7	917,0	1.401,4	0,4	2.889,6
5,5	3	1.402,2	919,2	1.403,7	0,3	2.894,1

Tabla 48: Estabilidad medida, corrección por altura y fluencia Marshall: 60 % de escoria.

Asfalto (%)	Probeta	Fluencia (0,25 mm)	Estabilidad medida (N)	Factor de altura	Estabilidad corregida (N)
4,0	1	13,672	9.930	1,190	11.817
4,0	2	12,488	8.640	1,159	10.014
4,0	3	10,244	8.850	1,131	10.009
4,5	1	11,768	9.350	1,134	10.603
4,5	2	12,572	10.070	1,149	11.570
4,5	3	14,600	9.960	1,178	11.733
5,0	1	15,132	10.350	1,165	12.058
5,0	2	13,416	10.620	1,153	12.245
5,0	3	15,912	9.900	1,140	11.286
5,5	1	14,808	8.380	1,121	9.394
5,5	2	13,824	8.250	1,128	9.306
5,5	3	12,488	8.100	1,134	9.185

Tabla 49: Determinaciones experimentales de densidad máxima de mezcla: 60 % de escoria.

Det.	Masa seca (g)	Picnómetro + agua (g)	Picnómetro + agua + muestra (g)	Densidad del agua (kg/m³)	DMM (kg/m³)
1	1.579,0	6.828,0	7.883,0	997,1	3.004,6
2	1.577,0	6.828,0	7.886,0	997,1	3.029,7
3	1.580,1	6.828,0	7.882,0	997,1	2.994,7

Tabla 50: Propiedades volumétricas por contenido de asfalto: 60 % de escoria.

Asfalto (%)	Densidad compactada (kg/m³)	DMM (kg/m³)	Huecos de aire (%)	VAM (%)	VLL (%)	Densidad efectiva (kg/m³)
4,0	2.898,9	3.067,5	5,50	14,35	61,67	3.335,4
4,5	2.902,5	3.038,4	4,47	14,65	69,49	3.335,4
5,0	2.902,9	3.010,0	3,56	15,05	76,35	3.335,4
5,5	2.890,8	2.982,4	3,07	15,80	80,57	3.335,4

.

Tabla 51: Mediciones de altura y factores de corrección de estabilidad: 80 % de escoria.

Asfalto (%)	Probeta	h1 (mm)	h2 (mm)	h3 (mm)	h4 (mm)	Altura media (mm)	Factor altura
4,0	1	58,9	59,0	58,8	58,7	58,85	1,137
4,0	2	58,8	59,1	58,8	59,1	58,95	1,134
4,0	3	58,5	58,9	58,7	58,6	58,68	1,143
4,5	1	57,4	57,9	57,8	58,2	57,83	1,171
4,5	2	59,1	58,9	58,7	58,8	58,88	1,137
4,5	3	58,8	58,5	58,6	58,7	58,65	1,143
5,0	1	56,7	56,9	57,1	57,0	56,92	1,209
5,0	2	57,4	57,1	57,2	57,5	57,30	1,187
5,0	3	56,9	57,4	56,9	57,4	57,15	1,190

Tabla 52: Pesajes y densidad compactada individual: 80 % de escoria.

Asfalto (%)	Probeta	Masa seca (g)	Masa sumergida (g)	Masa SSS (g)	Absorción (%)	Densidad (kg/m³)
4,0	1	1.459,8	993,5	1.461,6	0,4	3.118,6
4,0	2	1.461,6	995,8	1.463,1	0,3	3.127,8
4,0	3	1.460,9	996,8	1.462,9	0,4	3.134,3
4,5	1	1.465,8	993,3	1.470,0	0,9	3.074,9
4,5	2	1.460,2	987,4	1.468,9	1,8	3.032,6
4,5	3	1.465,2	989,1	1.468,9	0,8	3.053,8
5,0	1	1.475,6	1.006,3	1.477,1	0,3	3.134,2
5,0	2	1.476,8	1.008,6	1.478,6	0,4	3.142,1
5,0	3	1.477,9	1.009,9	1.479,3	0,3	3.148,5

Tabla 53: Estabilidad medida, corrección por altura y fluencia Marshall: 80 % de escoria.

Asfalto (%)	Probeta	Fluencia (0,25 mm)	Estabilidad medida (N)	Factor de altura	Estabilidad corregida (N)
4,0	1	11,344	7.930	1,137	9.016
4,0	2	12,656	8.210	1,134	9.310
4,0	3	11,680	8.430	1,143	9.635
4,5	1	13,376	10.430	1,171	12.214
4,5	2	13,968	9.980	1,137	11.347
4,5	3	15,196	10.300	1,143	11.773
5,0	1	15,228	7.560	1,209	9.140
5,0	2	14,836	8.040	1,187	9.543
5,0	3	14,412	7.600	1,190	9.044

Tabla 54: Determinaciones experimentales de densidad máxima de mezcla: 80 % de escoria.

Det.	Masa seca (g)	Picnómetro + agua (g)	Picnómetro + agua + muestra (g)	Densidad del agua (kg/m³)	DMM (kg/m³)
1	1.575,2	6.828,0	7.908,0	997,1	3.171,7
2	1.559,3	6.828,0	7.907,0	997,1	3.237,1
3	1.555,1	6.828,0	7.901,0	997,1	3.216,3

Tabla 55: Propiedades volumétricas por contenido de asfalto: 80 % de escoria.

Asfalto (%)	Densidad compactada (kg/m³)	DMM (kg/m³)	Huecos de aire (%)	VAM (%)	VLL (%)	Densidad efectiva (kg/m³)
4,0	3.126,9	3.241,4	3,53	11,97	70,51	3.550,8
4,5	3.053,8	3.208,0	4,81	14,44	66,69	3.550,8
5,0	3.141,6	3.175,6	1,07	12,40	91,37	3.550,8

Tabla 56: Mediciones de altura y factores de corrección de estabilidad: 100 % de escoria.

Asfalto (%)	Probeta	h1 (mm)	h2 (mm)	h3 (mm)	h4 (mm)	Altura media (mm)	Factor altura
4,0	1	57,2	57,4	57,1	57,7	57,35	1,184
4,0	2	56,9	56,7	56,9	57,0	56,88	1,201
4,0	3	56,4	56,5	56,3	56,6	56,45	1,216
4,5	1	58,2	58,4	58,2	58,0	58,20	1,158
4,5	2	57,8	57,7	57,9	57,6	57,75	1,172
4,5	3	57,6	57,6	57,4	57,8	57,60	1,180
5,0	1	58,7	58,8	58,6	58,5	58,65	1,137
5,0	2	58,2	58,1	58,6	58,6	58,38	1,148
5,0	3	58,5	58,8	58,4	58,2	58,47	1,144

Tabla 57: Pesajes y densidad compactada individual: 100 % de escoria.

Asfalto (%)	Probeta	Masa seca (g)	Masa sumergida (g)	Masa SSS (g)	Absorción (%)	Densidad (kg/m³)
4,0	1	1.550,5	1.075,1	1.552,1	0,3	3.250,5
4,0	2	1.547,4	1.073,8	1.549,8	0,5	3.250,8
4,0	3	1.544,8	1.072,2	1.546,2	0,3	3.259,1
4,5	1	1.565,8	1.093,2	1.567,1	0,3	3.304,1
4,5	2	1.563,2	1.091,5	1.565,3	0,4	3.299,3
4,5	3	1.569,5	1.094,1	1.570,6	0,2	3.293,8
5,0	1	1.562,0	1.084,7	1.563,0	0,2	3.265,7
5,0	2	1.559,4	1.083,5	1.561,8	0,5	3.260,3
5,0	3	1.561,8	1.085,1	1.568,2	1,3	3.232,9

Tabla 58: Estabilidad medida, corrección por altura y fluencia Marshall: 100 % de escoria.

Asfalto (%)	Probeta	Fluencia (0,25 mm)	Estabilidad medida (N)	Factor de altura	Estabilidad corregida (N)
4,0	1	12,500	8.920	1,184	10.561
4,0	2	15,416	8.760	1,201	10.521
4,0	3	14,456	8.610	1,216	10.470
4,5	1	14,272	9.720	1,158	11.256
4,5	2	12,536	9.860	1,172	11.556
4,5	3	11,992	9.760	1,180	11.517
5,0	1	11,948	7.900	1,137	8.982
5,0	2	11,424	7.400	1,148	8.495
5,0	3	12,052	7.100	1,144	8.122

Tabla 59: Determinaciones experimentales de densidad máxima de mezcla: 100 % de escoria.

Det.	Masa seca (g)	Picnómetro + agua (g)	Picnómetro + agua + muestra (g)	Densidad del agua (kg/m³)	DMM (kg/m³)
1	1.580,2	6.828,0	7.945,0	997,1	3.401,6
2	1.563,8	6.828,0	7.934,0	997,1	3.406,0
3	1.575,3	6.828,0	7.943,0	997,1	3.412,4

Tabla 60: Propiedades volumétricas por contenido de asfalto: 100 % de escoria.

Asfalto (%)	Densidad compactada (kg/m³)	DMM (kg/m³)	Huecos de aire (%)	VAM (%)	VLL (%)	Densidad efectiva (kg/m³)
4,0	3.253,5	3.445,8	5,58	12,12	53,96	3.808,0
4,5	3.299,1	3.407,0	3,17	11,32	72,00	3.808,0
5,0	3.253,0	3.369,5	3,46	12,97	73,32	3.808,0

Tabla 61: Propiedades volumétricas iniciales de las probetas TSR con 20 % de escoria.

Probeta	Condición	Altura (mm)	Volumen (cm³)	Densidad (kg/m³)	Huecos de aire (%)	Volumen de aire (cm³)
1	Seca	60,1	495,92	2.468	6,62	32,84
2	Seca	59,9	490,42	2.479	6,21	30,43
3	Seca	61,3	499,92	2.460	6,92	34,61
4	Húmeda	60,3	488,22	2.457	7,04	34,36
5	Húmeda	62,3	511,36	2.463	6,81	34,83
6	Húmeda	61,3	499,90	2.476	6,32	31,59

Tabla 62: Saturación inicial del subconjunto acondicionado con 20 % de escoria.

Probeta	Volumen (cm³)	Agua absorbida (cm³)	Saturación inicial (%)
4	488,88	21,51	62,6
5	512,05	20,02	57,5
6	500,35	19,17	60,7

Tabla 63: Saturación posterior e hinchamiento del subconjunto acondicionado con 20 % de escoria.

Probeta	Volumen (cm³)	Agua absorbida (cm³)	Saturación (%)	Altura (mm)	Hinchamiento (%)
4	489,68	25,80	75,1	60,4	0,3
5	512,89	25,63	73,6	62,4	0,3
6	500,90	23,82	75,4	61,3	0,2

Tabla 64: Carga máxima, dimensiones y resistencia individual a tracción indirecta con 20 % de escoria.

Probeta	Condición	Carga máxima (N)	Altura (mm)	Diámetro (mm)	ITS (MPa)
1	Seca	12.300	60,1	102,5	1,2711
2	Seca	12.200	59,9	102,1	1,2700
3	Seca	13.520	61,3	101,9	1,3779
4	Húmeda	11.500	60,4	101,6	1,1930
5	Húmeda	10.250	62,4	102,3	1,0222
6	Húmeda	10.570	61,3	102,0	1,0762

Tabla 65: Promedios de subconjuntos y TSR calculado para 20 % de escoria.

Subconjunto	Probetas	n	Huecos medios (%)	ITS media (MPa)	TSR (%)
Seco	1, 2, 3	3	6,58	1,3063	—
Acondicionado	4, 5, 6	3	6,72	1,0971	—
Relación TSR	—	—	—	—	83,99

Tabla 66: Propiedades volumétricas iniciales de las probetas TSR con 40 % de escoria.

Probeta	Condición	Altura (mm)	Volumen (cm³)	Densidad (kg/m³)	Huecos de aire (%)	Volumen de aire (cm³)
1	Seca	59,3	487,41	2.676	6,76	32,95
2	Seca	61,2	508,95	2.680	6,62	33,69
3	Húmeda	60,4	493,15	2.685	6,45	31,79
4	Húmeda	59,3	480,12	2.685	6,45	30,95
5	Húmeda	60,1	485,69	2.683	6,52	31,65
6	Seca	60,5	498,25	2.671	6,93	34,55

Tabla 67: Saturación inicial del subconjunto acondicionado con 40 % de escoria.

Probeta	Volumen (cm³)	Agua absorbida (cm³)	Saturación inicial (%)
3	494,70	19,33	60,8
4	481,20	17,61	56,9
5	488,32	18,54	58,6

Tabla 68: Saturación posterior e hinchamiento del subconjunto acondicionado con 40 % de escoria.

Probeta	Volumen (cm³)	Agua absorbida (cm³)	Saturación (%)	Altura (mm)	Hinchamiento (%)
3	496,60	26,77	84,2	60,3	0,7
4	482,52	25,32	81,8	59,4	0,5
5	491,52	27,47	86,8	59,8	1,2

Tabla 69: Carga máxima, dimensiones y resistencia individual a tracción indirecta con 40 % de escoria.

Probeta	Condición	Carga máxima (N)	Altura (mm)	Diámetro (mm)	ITS (MPa)
1	Seca	11.250	59,3	102,3	1,1806
2	Seca	12.350	61,2	102,9	1,2485
3	Húmeda	9.100	60,3	102,4	0,9382
4	Húmeda	9.470	59,4	101,7	0,9980
5	Húmeda	9.240	59,8	102,3	0,9616
6	Seca	11.710	60,5	102,4	1,2033

.

Tabla 70: Promedios de subconjuntos y TSR calculado para 40 % de escoria.

Subconjunto	Probetas	n	Huecos medios (%)	ITS media (MPa)	TSR (%)
Seco	1, 2, 6	3	6,77	1,2108	—
Acondicionado	3, 4, 5	3	6,47	0,9659	—
Relación TSR	—	—	—	—	79,78

Tabla 71: Propiedades volumétricas iniciales de las probetas TSR con 60 % de escoria.

Probeta	Condición	Altura (mm)	Volumen (cm³)	Densidad (kg/m³)	Huecos de aire (%)	Volumen de aire (cm³)
1	Seca	60,7	496,97	2.879	6,71	33,34
2	Seca	59,8	490,56	2.901	5,99	29,41
3	Húmeda	59,5	486,77	2.891	6,32	30,76
4	Húmeda	60,4	475,78	2.887	6,45	30,68
5	Húmeda	59,4	489,43	2.891	6,32	30,93
6	Seca	60,8	503,66	2.900	6,03	30,36

Tabla 72: Saturación inicial del subconjunto acondicionado con 60 % de escoria.

Probeta	Volumen (cm³)	Agua absorbida (cm³)	Saturación inicial (%)
3	488,30	22,42	72,9
4	477,70	20,40	66,5
5	491,85	21,59	69,8

Tabla 73: Saturación posterior e hinchamiento del subconjunto acondicionado con 60 % de escoria.

Probeta	Volumen (cm³)	Agua absorbida (cm³)	Saturación (%)	Altura (mm)	Hinchamiento (%)
3	490,18	26,30	85,5	60,7	0,7
4	480,06	24,94	81,3	59,8	0,9
5	494,81	25,08	81,1	59,5	1,1

Tabla 74: Carga máxima, dimensiones y resistencia individual a tracción indirecta con 60 % de escoria.

Probeta	Condición	Carga máxima (N)	Altura (mm)	Diámetro (mm)	ITS (MPa)
1	Seca	11.080	60,7	102,1	1,1382
2	Seca	10.600	59,8	102,2	1,1042
3	Húmeda	7.979	60,7	101,4	0,8253
4	Húmeda	7.760	59,8	101,1	0,8171
5	Húmeda	9.500	59,5	102,9	0,9878
6	Seca	11.000	60,8	102,7	1,1215

Tabla 75: Promedios de subconjuntos y TSR calculado para 60 % de escoria.

Subconjunto	Probetas	n	Huecos medios (%)	ITS media (MPa)	TSR (%)
Seco	1, 2, 6	3	6,24	1,1213	—
Acondicionado	3, 4, 5	3	6,36	0,8767	—
Relación TSR	—	—	—	—	78,19

Tabla 76: Propiedades volumétricas iniciales de las probetas TSR con 80 % de escoria.

Probeta	Condición	Altura (mm)	Volumen (cm³)	Densidad (kg/m³)	Huecos de aire (%)	Volumen de aire (cm³)
1	Seca	59,3	486,46	2.986	6,92	33,66
2	Seca	60,2	486,14	2.996	6,61	32,13
3	Húmeda	60,3	497,25	3.003	6,39	31,78
4	Seca	59,4	489,19	2.988	6,86	33,55
5	Húmeda	60,6	499,35	3.005	6,33	31,60
6	Húmeda	60,1	489,01	3.002	6,42	31,40

Tabla 77: Saturación inicial del subconjunto acondicionado con 80 % de escoria.

Probeta	Volumen (cm³)	Agua absorbida (cm³)	Saturación inicial (%)
3	497,70	18,40	57,9
5	500,48	18,74	59,3
6	489,45	19,78	63,0

Tabla 78: Saturación posterior e hinchamiento del subconjunto acondicionado con 80 % de escoria.

Probeta	Volumen (cm³)	Agua absorbida (cm³)	Saturación (%)	Altura (mm)	Hinchamiento (%)
3	498,25	26,98	84,9	60,5	0,2
5	501,85	23,89	75,6	60,7	0,5
6	489,98	23,11	73,6	60,2	0,2

Tabla 79: Carga máxima, dimensiones y resistencia individual a tracción indirecta con 80 % de escoria.

Probeta	Condición	Carga máxima (N)	Altura (mm)	Diámetro (mm)	ITS (MPa)
1	Seca	12.500	59,3	102,2	1,3131
2	Seca	11.800	60,2	101,4	1,2306
3	Húmeda	9.760	60,5	102,4	1,0029
4	Seca	12.600	59,4	102,4	1,3188
5	Húmeda	9.450	60,7	102,6	0,9660
6	Húmeda	9.100	60,2	101,8	0,9453

Tabla 80: Promedios de subconjuntos y TSR calculado para 80 % de escoria.

Subconjunto	Probetas	n	Huecos medios (%)	ITS media (MPa)	TSR (%)
Seco	1, 2, 4	3	6,80	1,2875	—
Acondicionado	3, 5, 6	3	6,38	0,9714	—
Relación TSR	—	—	—	—	75,45

Tabla 81: Propiedades volumétricas iniciales de las probetas TSR con 100 % de escoria.

Probeta	Condición	Altura (mm)	Volumen (cm³)	Densidad (kg/m³)	Huecos de aire (%)	Volumen de aire (cm³)
1	Seca	60,3	495,63	3.189	6,40	31,71
2	Seca	60,5	494,36	3.195	6,22	30,76
3	Húmeda	60,5	502,28	3.203	5,99	30,07
4	Seca	62,3	516,08	3.198	6,13	31,66
5	Húmeda	60,3	503,16	3.204	5,96	29,98
6	Húmeda	60,8	500,96	3.198	6,13	30,73

Tabla 82: Saturación inicial del subconjunto acondicionado con 100 % de escoria.

Probeta	Volumen (cm³)	Agua absorbida (cm³)	Saturación inicial (%)
3	503,41	19,04	63,3
5	504,97	18,23	60,8
6	502,99	18,07	58,8

Tabla 83: Saturación posterior e hinchamiento del subconjunto acondicionado con 100 % de escoria.

Probeta	Volumen (cm³)	Agua absorbida (cm³)	Saturación (%)	Altura (mm)	Hinchamiento (%)
3	504,79	26,44	87,9	60,7	0,5
5	507,19	22,01	73,4	60,4	0,8
6	505,47	22,93	74,6	60,9	0,9

Tabla 84: Carga máxima, dimensiones y resistencia individual a tracción indirecta con 100 % de escoria.

Probeta	Condición	Carga máxima (N)	Altura (mm)	Diámetro (mm)	ITS (MPa)
1	Seca	10.100	60,3	102,3	1,0423
2	Seca	10.800	60,5	102,0	1,1142
3	Húmeda	7.560	60,7	102,9	0,7705
4	Seca	11.920,64	62,3	102,7	1,1861
5	Húmeda	6.300	60,4	103,4	0,6422
6	Húmeda	6.250,60	60,9	102,8	0,6356

Tabla 85: Promedios de subconjuntos y TSR calculado para 100 % de escoria.

Subconjunto	Probetas	n	Huecos medios (%)	ITS media (MPa)	TSR (%)
Seco	1, 2, 4	3	6,25	1,1142	—
Acondicionado	3, 5, 6	3	6,03	0,6828	—
Relación TSR	—	—	—	—	61,28