

**Universidad de Valparaíso**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Escuela de Ingeniería Civil**



**Estudio del contenido de Arena Natural en  
Lechadas Asfálticas**

por

**Cristhian Felipe Donoso Burgos**

Trabajo de Título para optar al Grado de  
Licenciado en Ciencias de la Ingeniería y título de  
Ingeniero Civil

Profesor Guía: Guillermo Brante Lara

Agosto, 2018

## Agradecimientos

*Me faltarán palabras para esto...*

*En primer lugar, quisiera agradecer infinitamente a mis padres y a mi familia por su apoyo y paciencia incondicional. También quiero agradecerle especialmente a ti Carolina por tu ayuda, amor y apoyo.*

*También agradezco a la Universidad, y a mi profesor guía Don Guillermo Brante por su asesoría y paciencia para poder llevar a cabo este trabajo y poder llegar a esta gran etapa en mi vida.*

*Quiero agradecer a todas las personas que hicieron esto posible, principalmente al Laboratorio Regional de Vialidad de la VI Región. A Don Hernán Segura por su apoyo y disponibilidad para poder realizar este trabajo, a Don Manuel, Don José, Don Víctor y Julio... les agradezco infinitamente sus consejos, sus conversaciones, su simpatía, su apoyo y su disponibilidad para ayudarme en todo momento, no saben cuan agradecido estoy de todos ustedes, y lo digo desde lo más profundo de mi corazón. También quiero agradecer al Laboratorio Nacional de Vialidad por amabilidad y disponibilidad para poder realizar todos los ensayos que me hacían falta.*

*Quiero agradecer a la empresa Camino Nuevo, especialmente a Don Walter, Don Luis y a Don Douglas. Muchas gracias por su asesoría, paciencia y cariño que me tienen para poder lograr esto de mejor manera.*

*Quiero agradecer a todas las personas que de alguna forma estuvieron para mí en toda mi vida. A toda la gente que conocí antes y después de esta etapa importante. Camilo, Carlos, Charbel, Juan, Urrutia, Chamo, Melissa... ¡Gracias por todo, de alguna forma todo esto es gracias a ustedes!*

*No pude realizar esto solo, fue un proceso difícil, pero esto jamás pudo ser posible si no ha sido por todas las personas que han estado ahí, desde siempre. Este trabajo también es suyo.*

# Índice

1	Introducción.....	12
1.1	Antecedentes .....	12
1.2	Planteamiento del problema.....	14
1.3	Objetivos.....	15
1.3.1	Objetivo general .....	15
1.3.2	Objetivos específicos .....	15
1.4	Alcances.....	16
1.5	Metodología.....	17
1.5.1	Condiciones de trabajo.....	17
1.5.2	Ensayes de materiales .....	18
1.5.3	Ensayes para el diseño de lechadas asfálticas .....	19
1.5.4	Determinación del contenido óptimo de asfalto y análisis de resultados .....	20
1.5.5	Análisis de la resistencia al deslizamiento de una lechada asfáltica según el contenido de arena natural.....	20
2	Marco teórico .....	22
2.1	Lechada asfáltica .....	22
2.1.1	Historia .....	22
2.1.2	Propiedades de la lechada asfáltica .....	23
2.1.3	Fallas comunes en lechadas asfálticas.....	23
2.1.4	Requisitos para lechada asfáltica .....	25
2.1.5	Diseño de lechadas asfálticas.....	25
2.1.6	Resistencia al deslizamiento.....	32
2.2	Características de los componentes de la lechada asfáltica .....	35
2.2.1	Áridos .....	35
2.2.2	Emulsión asfáltica .....	44
2.2.3	Agua .....	45
2.2.4	Filler.....	46
3	Materiales a utilizar .....	47
3.1	Áridos .....	47
3.1.1	Granulometría .....	48
3.1.2	Densidad y absorción de agua de los áridos .....	49
3.1.3	Resultados de los ensayos de los requisitos de áridos para lechadas asfálticas .....	49
3.2	Emulsión asfáltica .....	53
3.3	Agua .....	53

3.4	Filler.....	53
4	Desarrollo experimental para determinar el contenido óptimo de emulsión .....	54
4.1	Cálculo del contenido de emulsión teórico.....	54
4.2	Consistencia de la lechada asfáltica .....	56
4.3	Ensaye de abrasión en medio húmedo.....	58
4.4	Ensaye de rueda de carga .....	62
5	Resultados de diseño de lechadas asfálticas .....	65
5.1	Determinación del contenido óptimo de emulsión para lechadas asfálticas .....	66
5.2	Abrasión y adherencia resultantes a partir del contenido óptimo de asfalto .....	69
5.3	Análisis a partir de las muestras de lechada asfáltica .....	70
5.3.1	Análisis de las probetas con porcentaje de arena natural dentro de lo estipulado por el manual de carreteras .....	71
5.3.2	Análisis de las probetas con porcentaje de arena natural fuera de lo estipulado por el manual de carreteras .....	76
5.4	Análisis de muestras de lechada asfáltica por medio de la resistencia al deslizamiento .	83
6	Conclusiones.....	87
6.1	Conclusiones generales .....	87
6.2	Discusiones y recomendaciones .....	90
7	Referencias .....	91
	Anexo 1: Cálculos .....	94
	Anexo 2: Fotografías .....	105

## Índice de figuras

Figura 1.1 - Procedimiento para preparación de muestras.....	18
Figura 1.2 - Metodología de trabajo.....	21
Figura 2.1 - Esquemática de un camión <i>slurry</i> .....	22
Figura 2.2 - Desgaste superficial de una solución básica (Fuente: Diario La Razón, Bolivia).....	24
Figura 2.3 - Exudación en la superficie de un camino (Fuente: Google Images).....	24
Figura 2.4 - Escala de círculos para determinar la consistencia en lechadas asfálticas (Fuente: [14]) .....	27
Figura 2.5 - Probeta de lechada asfáltica antes (izquierda) y después del ensaye de abrasión en medio húmedo (derecha).....	28
Figura 2.6 - Curva característica de la abrasión a diferentes porcentajes de emulsión (Fuente: [16]) .....	29
Figura 2.7 - Probeta sometida a ciclos de carga (izquierda) y probeta ensayada después de agregar arena silíceo (derecha).....	29
Figura 2.8 - Curva característica de la exudación a diferentes porcentajes de emulsión (Fuente: [16]) .....	31
Figura 2.9 - Criterios de diseño para determinar el contenido óptimo de emulsión (Fuente: Curso de Laboratorista Vial).....	31
Figura 2.10 - Microtextura y macrotextura de la superficie de un pavimento flexible (Fuente: [5])..	33
Figura 2.11 - Calibración péndulo británico para determinar la resistencia al deslizamiento en lechadas asfálticas.....	33
Figura 2.12 - Niveles de arena y arcilla para un ensaye de equivalente de arena (Fuente: Laboratorios Cytem).....	38
Figura 2.13 - Máquina de Casagrande (Fuente: Google Images).....	39
Figura 2.14 - Determinación del límite plástico de un árido (Fuente: Google Images).....	39
Figura 2.15 - Ensayo de Adherencia método estático.....	40
Figura 2.16 - Ensayo de adherencia Riedel-Weber, con desprendimiento parcial (izquierda) y total de una muestra (derecha).....	41
Figura 2.17 - Ensayo para determinar el índice de trituración (izquierda) y los finos producidos después del ensaye (derecha).....	42
Figura 2.18 - Ruptura de una emulsión sobre una partícula de árido (Fuente: [31]).....	45
Figura 3.1 - Acopio del árido chancado utilizado.....	47
Figura 3.2 - Granulometría del árido a utilizar.....	48
Figura 3.3 - Resultados de ensayo Equivalente de arena.....	50
Figura 3.4 - Resultados de ensaye, Adherencia método estático.....	51
Figura 4.1 - Gráfico de análisis de sensibilidad, contenido de emulsión teórico.....	55
Figura 4.2 - Ensayo de consistencia y desplazamiento de lechada asfáltica.....	56
Figura 4.3 - Gráfico del porcentaje de agua de premezclado a distintos porcentajes de arena natural .....	57
Figura 4.4 - Abrasión en medio húmedo a distintos porcentajes de arena natural.....	59
Figura 4.5 - Abrasión en medio húmedo a distintos porcentajes de asfalto.....	60
Figura 4.6 - Interpolación de datos en ensayo de abrasión en medio húmedo.....	61
Figura 4.7-Exudación a distintos porcentajes de arena natural.....	62
Figura 4.8 - Interpolación de datos en ensayo de rueda de carga.....	63
Figura 5.1 - Región de aceptación y rechazo para una distribución t-student con un 5% de significancia (Fuente: Google Images).....	66
Figura 5.2 - Contenido óptimo de asfalto según ambos criterios de diseño.....	67
Figura 5.3- Adherencia y abrasión resultante según ambos criterios de diseño a distintos porcentajes de arena natural.....	69

Figura 5.4 - Resultados de diseño para determinar el contenido óptimo de asfalto, árido 100 % Ac	71
Figura 5.5 - Probeta de lechada asfáltica ensayada a contenido óptimo de emulsión (12 %), árido 100% Ac	72
Figura 5.6 - Resultados de diseño para determinar el contenido óptimo de asfalto, árido 80 % Ac - 20 % An	73
Figura 5.7 - Probeta de lechada asfáltica ensayada a contenido óptimo de emulsión (12 %), árido 80% Ac - 20% An	73
Figura 5.8 - Gráfico esfuerzo-deformación para una arena en estado suelto, compacto y cementado bajo una misma presión normal (Fuente: [35])	74
Figura 5.9 - Dilatación de un suelo (Fuente: [43])	75
Figura 5.10 - Deformación de un suelo a un esfuerzo constante para distintas condiciones del suelo (Fuente: adaptado de [35])	76
Figura 5.11 - Resultados de diseño para determinar el contenido óptimo de asfalto, árido 60 % Ac - 40 % An	77
Figura 5.12 - Probeta de lechada asfáltica ensayada a contenido óptimo de emulsión (12 %), árido 60% Ac - 40% An	77
Figura 5.13 - Probeta de lechada asfáltica ensayada a contenido óptimo de emulsión (12 %), árido 40 % Ac - 60 % An	78
Figura 5.14 - Probeta de lechada asfáltica a un 12% de asfalto, árido 40% Ac - 60% An	79
Figura 5.15 - Probeta de lechada asfáltica ensayada a contenido óptimo de emulsión (12 %), árido 20 % Ac - 80 % An	80
Figura 5.16 - Probeta de lechada asfáltica a un 12% de asfalto, árido 20% Ac - 80% An	80
Figura 5.17 - Resultados de diseño para determinar el contenido óptimo de asfalto, árido 100 % An	81
Figura 5.18 - Probeta de lechada asfáltica ensayada a contenido óptimo de emulsión (12 %), árido 100% An	82
Figura 5.19 - Resistencia al deslizamiento a diferentes porcentajes de arena natural	84
Figura 5.20 - Propuesta de criterio para establecer un rango de tolerancia para la resistencia al deslizamiento	85
Figura 5.21 - Tolerancia de arena natural de acuerdo al rango de tolerancia de BPN (Zoom)	86

## Índice de tablas

Tabla 1.1 - Red vial nacional según región y tipo .....	12
Tabla 1.2 - Red vial nacional histórico, 2010 - 2016 .....	13
Tabla 2.1 - Granulometría de áridos utilizados en lechadas asfálticas .....	36
Tabla 2.2 - Requisito de áridos para lechadas asfálticas .....	37
Tabla 2.3 - Soluciones de carbonato de sodio y sus grados de adherencia .....	41
Tabla 2.4 - Cortes de granulometría, ensayo para determinar el índice de trituración .....	42
Tabla 2.5 - Requerimientos para emulsiones asfálticas catiónicas, CSS-1h .....	45
Tabla 3.1 - Granulometría del árido a utilizar .....	48
Tabla 3.2 - Densidades y absorción de agua de los áridos a utilizar .....	49
Tabla 3.3- Resultados de los ensayos especificados en la tabla MC 5.406.201.A. ....	50
Tabla 3.4 - Propiedades emulsión asfáltica CSS-1h utilizado para el diseño de lechadas asfálticas .....	53
Tabla 4.1 - Porcentaje de agua de premezclado a distintos porcentajes de arena natural y tiempo de mezclado según cada caso .....	57
Tabla 4.2 - Abrasión en medio húmedo a distintos porcentajes de arena natural .....	58
Tabla 4.3 - Exudación a distintos porcentajes de arena natural .....	62
Tabla 5.1 - Contenido óptimo de asfalto según ambos criterios de diseño .....	66
Tabla 5.2 - Prueba de hipótesis para ambos criterios de diseño .....	68
Tabla 5.3 - Adherencia y abrasión resultante según ambos criterios de diseño a distintos porcentajes de arena natural .....	69
Tabla 5.4 - Resultados ensayo para determinar la resistencia al deslizamiento por péndulo británico .....	83
Tabla 5.5 - Propuesta de criterio para establecer un rango de tolerancia para la resistencia al deslizamiento .....	85

## Glosario

- **Abrasión:** Fenómeno asociado al desprendimiento de las partículas que conforman la mezcla de lechadas asfálticas y se observa un desprendimiento superficial en las zonas por donde pasan las ruedas de los vehículos o como material suelto sobre la calzada [1].
- **Adherencia:** Fuera de atracción que mantiene unidos a dos componentes diferentes.
- **Agua de premezclado:** cantidad de agua ingresada a una mezcla de lechada asfáltica para lograr una consistencia deseada, medida en el desplazamiento promedio de ésta.
- **Arena natural:** Árido que proviene de ríos o empréstitos naturales. Su proceso de producción contempla básicamente la separación por tamaños y el lavado. Sus partículas presentan caras lisas y suaves y son de forma redondeada [2].
- **Árido chancado:** Árido proveniente de un proceso industrial. Normalmente chancado o triturado, separado por tamaños y lavado. Sus partículas presentan caras rugosas y de forma irregular, pero cercanas a una forma cúbica [2].
- **Cohesión:** Fuerza que mantiene unida a partículas de una misma sustancia.
- **Consistencia:** Propiedad de una mezcla la cual mide la trabajabilidad de ésta.
- **Contenido de emulsión teórico:** Contenido de emulsión calculado a partir de las propiedades de la emulsión y el árido, siendo ésta una primera aproximación al diseño.
- **Contenido máximo de emulsión:** Porcentaje de emulsión para lograr una exudación máxima en función del TMDA.
- **Contenido mínimo de emulsión:** Porcentaje de emulsión para lograr una abrasión máxima de 540 gr/m<sup>2</sup>.
- **Contenido óptimo de emulsión:** Dosificación en porcentaje referido al árido seco de emulsión asfáltica la cual una lechada asfáltica presenta una baja abrasión y exudación.
- **Criterio de intersección de curvas:** Intersección de las curvas de abrasión y exudación
- **Criterio de límites de diseño:** Promedio entre el contenido mínimo de emulsión y el contenido máximo de emulsión.
- **Emulsión asfáltica:** Emulsión la cual el asfalto se encuentra en forma de partículas muy pequeñas, de aproximadamente 1 - 5 micrones, suspendido en la fase acuosa a través de la ayuda de un agente emulsificante [3].
- **Ensayo de abrasión en medio húmedo:** Ensayo que relaciona la abrasión en una lechada asfáltica a diferentes porcentajes de emulsión.
- **Ensayo de rueda de carga:** Ensayo que relaciona la exudación de una lechada asfáltica a diferentes porcentajes de emulsión.
- **Exudación:** Afloramiento del exceso de asfalto hacia la superficie, generando una película bituminosa, formando una superficie brillante, reflectora y pegajosa [1].
- **Filler:** Agregado mineral muy fino, que tiene como propiedades mejorar la dispersión de las partículas minerales del agregado pétreo [3].
- **Lechada asfáltica:** Mezcla de emulsión asfáltica, áridos graduados, agua, y en caso de ser necesario *filler* y aditivos [4].
- **Resistencia al deslizamiento:** Relación entre la fuerza de fricción desarrollada en la interface de un neumático impedido de rodar con el pavimento y el peso sobre el neumático [5].
- **Slurry seal:** Lechada asfáltica.

## Lista de abreviaturas o siglas

- $a$ : Porcentaje del árido mayor que 10 mm (3/8")
- $A_T$ : Masa total de la muestra [gr]
- $A$ : Peso de la muestra por ensayar. Este peso se considera después de ser sometida a impacto debido a la pérdida de material durante el ensayo.
- $A$ : Área de desgaste de la probeta de lechada asfáltica [m<sup>2</sup>]. Esta área se considera como el área de una circunferencia debido al movimiento de la máquina de abrasión.
- $A$ : Área de la probeta para determinar la exudación [m<sup>2</sup>].
- $A_c$ : Árido chancado
- $AMH$ : Abrasión en medio húmedo [gr/m<sup>2</sup>]
- $A_n$ : Arena natural
- $b$ : Porcentaje del árido que pasa por tamiz 10 mm (3/8") y queda retenido en tamiz 5 mm (#4)
- $B$ : Peso del material que pasa por el tamiz de finos producidos.
- $B_T$ : Masa de chancado [gr]
- $BPN$ : British Pendulum Number o Número de péndulo británico
- $BPN_A$ : Número de péndulo británico ajustado a la temperatura de 20 °C.
- $c$ : Porcentaje del árido que pasa por tamiz 5 mm (#4) y queda retenido en tamiz 0,315 mm (#50)
- $C1$ : Criterio de límites de diseño
- $C2$ : Criterio de Intersección de curvas
- $Ch$ : Porcentaje de partículas chancadas [%]
- $C_r$ : Masa de partícula rodada [gr]
- $d$ : Porcentaje del árido que pasa por tamiz 0,315 mm (#50) y queda retenido en tamiz 0,08 mm (#200)
- $D_T$ : Masa de laja chancada [gr]
- $e$ : Porcentaje del árido que pasa por tamiz 0,08 mm (#200)
- $EA$ : Equivalente de arena [%]
- $E_T$ : Masa de laja rodada [gr]
- $E_{max}$ : Contenido máximo de emulsión necesario para que se produzca una exudación máxima en función del tránsito medio diario anual [%]
- $E_{min}$ : Contenido mínimo de emulsión necesario para que se produzca una abrasión máxima de 540 gr/m<sup>2</sup> [%]
- $E_{opt}$ : Contenido óptimo de emulsión según el criterio de límites de diseño [%]
- $E_t$ : Contenido de emulsión teórico referido al agregado seco [%]
- $F_A$ : Factor de ajuste de temperatura a 20 °C.
- $IT_p$ : Índice de trituración parcial [%]
- $IT_t$ : Índice de trituración total [%]
- $M_T$ : Masa de la probeta después del ensayo [gr]
- $M_i$ : Masa de la probeta antes del desgaste [gr]
- $N_a$ : Nivel superior de la arena luego de la floculación y sedimentación de la fracción más fina [mm]
- $n_i$ : Porcentaje de cada fracción retenida [%]
- $N_c$ : Nivel superior de la arcilla luego de la floculación y sedimentación de la fracción más fina [mm]
- $IP$ : Índice de plasticidad del suelo [%]
- $L$ : Porcentaje de partículas lajeadas [%]
- $LL$ : Límite líquido del suelo [%]

- *LP*: Límite plástico del suelo [%]
- *MC*: Manual de Carreteras
- *M<sub>f</sub>*: Masa de la probeta luego de someter la probeta a 100 ciclos con arena adherida [gr]
- *M<sub>i</sub>*: Masa de la probeta luego de someter la probeta a 1000 ciclos de carga [gr]
- *n*: Número de mediciones en el ensayo del péndulo británico.
- *R*: Porcentaje de partículas rodadas [%]
- *R*: Residuo asfáltico de la emulsión (expresado en forma decimal)
- *RD*: Resistencia al deslizamiento.
- *S<sub>a</sub>*: Exudación de la lechada asfáltica medido como cantidad de arena adherida a la probeta [gr/m<sup>2</sup>]
- *Superficie específica*: Relación entre la superficie externa de un agregado y su densidad real seca [m<sup>2</sup>/kg]
- *t*: Temperatura en °C.
- *TMDA*: Tránsito medio diario anual.

## Resumen

Según el informe de "red vial nacional – dimensionamiento y características" facilitado por la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas, en su versión 2016 se registra una longitud de 82.133,70 kilómetros a lo largo del país. De dicho valor, un 59,62% corresponden a caminos sin ningún tipo de solución aplicado. Ante ello, la Dirección de Vialidad tiene como objetivo elegir un tipo de solución que cumpla a cabalidad con las exigencias propias de los caminos considerando el factor económico en la construcción de éstos.

Una de las alternativas adoptadas por el Ministerio de Obras Públicas en el periodo 2010 – 2016 para resolver esta problemática, es la utilización de las llamadas "soluciones básicas", que consisten en sellos de poco espesor, generalmente menores a 2 centímetros, con el fin de proteger el material granular, entre los cuales destacan las lechadas asfálticas.

Con el objeto de disminuir los costos de producción en este tipo de tratamientos, se plantea utilizar arena natural como agregado pétreo en reemplazo del árido chancado usado actualmente, en cantidades superiores al límite máximo de un 20% según la normativa vigente.

Para este trabajo, las muestras de lechada asfáltica ensayadas en este trabajo presentan un contenido de arena natural en porcentajes que varían entre un 0% hasta un 100% del árido total y fueron preparados de tal forma que los resultados obtenidos se atribuyan específicamente al porcentaje de éstas, certificando que todos los materiales utilizados cumplen con los requisitos para ser aplicados en lechadas asfálticas, tomando énfasis en los áridos usados.

Se determinará la consistencia, parámetro asociado a la trabajabilidad de la mezcla al momento de ser puestas en terreno, junto con la abrasión y exudación en las muestras de lechada asfáltica, fenómenos asociados a los tipos de falla más comunes observados en soluciones básicas, determinando el contenido óptimo de emulsión, estableciendo las dosificaciones de emulsión y agua según los resultados obtenidos en laboratorio, contrastándose con una inspección visual de las probetas según los parámetros óptimos de diseño. De forma complementaria, se determinará la relación entre la resistencia al deslizamiento y la forma del árido, con el propósito de analizar la lechada asfáltica con un parámetro observable en terreno.

Finalmente, se determinó que la forma redondeada del árido presenta un efecto positivo en la consistencia de la mezcla, lográndose una buena trabajabilidad con una menor cantidad de agua, presentando un efecto negativo en la exudación y el desgaste. Las muestras a condiciones óptimas de diseño presentaron una falta de adherencia entre las partículas, afectando a la cohesión de la lechada asfáltica a mayor contenido de arena natural, a tal punto que no es factible un diseño compuesto íntegramente por arena natural de acuerdo con los procedimientos establecidos en la actualidad. De igual modo, la forma del árido tiene un efecto negativo en la resistencia al deslizamiento, llegando a ser inviable desde el punto de vista de la seguridad en porcentajes elevados de arena natural.

**Palabras clave:** Lechada asfáltica, arena natural, diseño, abrasión, exudación, cohesión, adherencia, resistencia al deslizamiento.

# 1 Introducción

## 1.1 Antecedentes

Con la finalidad de entregar una información actualizada de la infraestructura vial en nuestro país, el Ministerio de Obras Públicas (MOP) recopila información de caminos pavimentados dobles calzadas, pavimentaciones y obras de reposición o reconstrucción, caminos básicos intermedios, túneles, ciclovías, pasarelas, caminos intervenidos con soluciones básicas e información específica de las vías concesionadas en explotación a través de organismos tales como las Direcciones Regionales y Oficinas Provinciales de Vialidad, consultas a los Inspectores Fiscales de las obras ejecutadas, bases de datos del Sistema de Administración Financiero de contratos (SAFI), el Sistema Ficha Única Camino (SFUC) y el Sistema de Administración de Contratos (SAC), el Subdepartamento de Caminos Básicos del Departamento de Conservación de la Subdirección de Mantenimiento de la Dirección Vial, Ficha de Ingreso de Obras y por Inspectores Fiscales de Explotación de la Coordinación de Concesiones de Obras Públicas en todo el país. Ello, con el fin de entregar un detalle a través del informe de red vial nacional – dimensionamiento y características, lo que determina la composición de la red vial nacional en nuestro país, tanto por región como por tipo de solución utilizada. De acuerdo con la versión 2016 de dicho informe, la Tabla 1.1 presenta un cuadro resumen con los resultados de la longitud total de la red a nivel nacional, descompuesta tanto por regiones como por tipo de red.

Tabla 1.1 - Red vial nacional según región y tipo

Región	Red Vial Pavimentada [km]				Soluciones Básicas [km]		Red Vial No Pavimentada [km]		Total [km]
	Asfalto	Hormigón	Asf.Horm.	Caminos Básicos Intermedios	Capa Protección	Granular Estabilizado	Ripio	Tierra	
I	1.135,14	0,69	0,30	0,00	345,12	373,39	366,18	1.580,45	3.801,27
II	1.880,66	3,45	0,00	0,00	277,77	771,36	369,85	2.395,77	5.698,86
III	1.146,16	3,80	0,00	46,00	492,97	2.186,03	749,97	2.374,10	6.999,03
IV	1.333,21	30,86	7,75	67,02	314,26	852,84	1.688,67	758,73	5.053,34
V	1.152,29	187,79	22,45	11,09	1.401,87	0,00	429,54	237,78	3.442,81
VI	1.223,30	59,92	54,31	25,06	657,85	61,04	716,50	678,70	3.476,68
VII	1.576,51	168,11	74,65	86,95	533,29	284,29	2.708,81	1.592,62	7.025,23
VIII	2.196,91	138,86	39,78	24,49	501,21	63,64	6.197,34	1.522,63	10.684,86
IX	1.554,67	106,30	96,80	52,45	399,07	333,99	6.958,29	2.499,78	12.001,35
X	1.520,95	223,94	51,84	0,00	584,73	0,70	5.229,88	380,48	7.992,52
XI	236,29	151,03	0,00	0,00	0,00	285,94	2.021,98	203,24	2.898,48
XII	7,88	598,99	0,00	0,00	196,57	134,73	2.129,86	278,55	3.346,58
R.M.	1.373,60	135,74	85,89	42,80	860,95	0,54	271,30	185,01	2.955,83
XIV	774,92	64,17	99,29	10,81	392,71	4,93	2.889,03	336,23	4.572,09
XV	433,00	0,52	0,00	0,00	296,96	234,64	109,67	1.110,06	2.184,85
<b>Total</b>	<b>17.545,49</b>	<b>1.874,17</b>	<b>533,06</b>	<b>366,67</b>	<b>7.255,33</b>	<b>5.588,06</b>	<b>32.836,87</b>	<b>16.134,13</b>	<b>82.133,78</b>
		<b>20.319,39</b>			<b>12.843,39</b>		<b>48.971,00</b>		
		<b>24,74%</b>			<b>15,64%</b>		<b>59,62%</b>		<b>100,00%</b>

Fuente: Adaptado de [6]

De los resultados presentados en el informe entregado por el MOP, para el año 2016 se registra un total de 82.133,70 kilómetros de red vial a lo largo del país [6]. Dicho valor se subdivide en tres grandes categorías: red vial pavimentada (pavimento tratado superficialmente con una carpeta), soluciones básicas (camino tratado superficialmente por un sello, emulsión o estabilizante) y red vial

no pavimentada (caminos al cual no se le ha aplicado ningún tratamiento). De acuerdo con la Tabla 1.1, la red vial pavimentada representa un 24,74% del total de la red, compuesta principalmente por pavimentos de asfalto. Las soluciones básicas representan un 15,64% del total, compuesta en su mayoría por tratamientos tipo capas de protección, correspondiente a una solución Básica con aplicación de una capa asfáltica de protección [6] y finalmente la red vial no pavimentada, que representa un 59,62% del total de la red vial nacional, compuesta principalmente por ripio.

Desde el punto de vista nacional, un 59,62% de la red vial corresponden a caminos sin ningún tipo de solución aplicado al camino. Ante ello, la Dirección de Vialidad del MOP tiene como objetivo elegir un tipo de solución que cumpla a cabalidad con las exigencias propias de los caminos considerando el factor económico en la construcción de éstos. La Tabla 1.2 presenta un recuento histórico del periodo 2010 – 2016 de la longitud de la red vial nacional separados por tipo, junto con una estimación del incremento porcentual, correspondiente a la diferencia entre los años 2010 – 2016:

Tabla 1.2 - Red vial nacional histórico, 2010 - 2016

Región	Red Vial Pavimentada [km]				Soluciones Básicas [km]		Red Vial No Pavimentada [km]		Total [km]
	Asfalto	Hormigón	Asf./Horm.	Caminos Básicos Intermedios	Capa Protección	Granular Estabilizado	Ripio	Tierra	
2010	15.572,75	2.054,63	499,16	20,88	3.595,32	5.465,41	32.720,02	17.835,57	77.763,74
2011	16.067,67	1.839,20	508,99	20,88	3.824,12	5.455,17	32.209,04	17.678,10	77.603,17
2012	16.278,03	1.820,99	522,30	20,88	4.362,39	5.474,52	31.790,61	17.301,56	77.571,28
2013	16.513,64	1.877,55	521,20	152,49	5.159,82	5.325,91	31.080,58	16.820,08	77.451,27
2014	16.975,02	1.846,44	527,01	207,18	5.812,81	5.515,72	30.542,85	16.373,98	77.801,01
2015	17.164,26	1.890,03	527,01	269,02	6.505,16	5.752,88	32.201,96	16.272,78	80.583,10
2016	17.545,49	1.874,17	533,06	366,67	7.255,33	5.588,06	32.836,87	16.134,13	82.133,78
Diferencia [km]	1.972,74	-180,46	33,90	345,79	3.660,01	122,65	116,85	-1.701,44	4.370,04
Incremento [%]	11,24%	-9,63%	6,36%	94,31%	50,45%	2,19%	0,36%	-10,55%	5,32%

Fuente: [7]

La Tabla 1.2 tiene como objetivo presentar desde el punto de vista histórico, las soluciones adoptadas para disminuir la red vial no pavimentada. Se observa una disminución neta de 1584,59 kilómetros para este tipo de caminos y se aprecia un aumento neto de la red vial nacional de 4.730,04 kilómetros, y se concluye las decisiones adoptadas por el MOP, consisten en mejorar la conectividad del país con una mayor cantidad de caminos mientras se mejora la calidad de la red vial nacional. Sin embargo, el mayor incremento de la red vial nacional en el periodo 2010 – 2016 se produce en soluciones básicas del tipo capa de protección, con un incremento neto de 3.660,01 kilómetros. Estas capas de protección corresponden a sellos delgados con espesores generalmente menores a 2 centímetros, cuyo objetivo es proteger el material granular y no aportar en la estructura que soporta a los vehículos debido al espesor de éstos. Existen varias técnicas para la construcción de este tipo de capas. La decisión de cuál utilizar dependen de factores como cantidad y tipo de tránsito, clima y geometría del camino [8], entre los cuales destacan:

- Imprimación Reforzada
- Tratamiento Superficial Simple
- Tratamiento Superficial Doble
- Lechada Asfáltica
- Cape Seal
- Otta Seal

De los tipos de solución básica existentes, un tipo de solución básica utilizada por parte de la Dirección de Vialidad de la VI Región de nuestro país, corresponde a las lechadas asfálticas, tema que desarrollará el presente Trabajo de Título.

## 1.2 Planteamiento del problema

Ante la necesidad como país de contar con una mejor infraestructura vial, cada año el Ministerio de Obras Públicas publica un informe de red vial con el dimensionamiento y características principales de la red vial nacional, con todas las obras ejecutadas a lo largo del país hasta el año de la publicación, con la finalidad de presentar los avances a nivel nacional respecto a este tema. De la versión 2016 de este informe, de los 82.133,78 kilómetros existentes hasta la fecha, 48.971,00 kilómetros corresponden a caminos no pavimentados de ripio o tierra, lo que corresponde aproximadamente a un 59,62% del total de la red [6]. De la información presentada, la Dirección de Vialidad tiene una tarea a nivel país para mejorar la calidad de los caminos no pavimentados con soluciones que se adapten a las necesidades de ésta, como por ejemplo conservación, aumento de la seguridad de la vía, etc., minimizando los costos de construcción.

Una de las soluciones adoptadas para resolver esta problemática por parte de la Dirección de Vialidad del MOP, corresponde a las llamadas "soluciones básicas", que se caracterizan por ser sellos delgados con el objetivo de proteger el material granular. Un tipo de solución básica corresponden a las lechadas asfálticas, que consisten en un sello compuesto por áridos finos bien graduados, *filler*, agua y emulsión asfáltica, cuya requisito para ser aplicado consiste en su uso sobre superficies que aún conservan su valor estructural y portante, con la finalidad de impermeabilizar y rejuvenecer el pavimento, detener los procesos erosivos éste, sellar grietas superficiales y mejorar la resistencia al deslizamiento [9].

Con la finalidad de obtener soluciones aún más económicas y aumentar la producción de áridos para la confección de lechadas asfálticas, se plantea utilizar arena natural como agregado pétreo. A pesar de que el Manual de Carreteras en el numeral MC 5.406.201(2) menciona al respecto el contenido de arena natural del árido que: "*Los áridos deberán ser chancados, aceptándose la incorporación de arena natural hasta el 20% del total del árido.* [4]". Por lo dicho anteriormente, este trabajo busca evaluar la factibilidad técnica de lechadas asfálticas con porcentajes superiores al máximo permitido, comparando muestras de lechada asfáltica con distintos porcentajes de arena natural, evaluando su comportamiento desde el punto de vista teórico y mecánico, procurando cumplir con todos los requerimientos establecidos según la normativa vigente para este tipo de solución.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo general**

- Evaluar la utilización de arena natural en lechadas asfálticas, determinando el contenido óptimo de asfalto a distintos porcentajes de arena natural, estudiando su comportamiento ante la abrasión y exudación, para analizar su comportamiento mecánico con la finalidad de obtener una mezcla con un aumento de arena natural por sobre la norma que presente buen comportamiento, disminuyendo los costos de producción.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Determinar y comparar un árido chancado y una arena natural a utilizar, para determinar si éstos cumplen con los requisitos de áridos para lechadas asfálticas.
- Determinar el contenido de agua de premezclado para lechada asfáltica, para lograr una mezcla estable y trabajable a distintos porcentajes de arena natural.
- Estudiar el efecto de la abrasión de la lechada asfáltica a distintos porcentajes de arena natural según el contenido de asfalto utilizado en la lechada asfáltica.
- Estudiar el efecto de la exudación de la lechada asfáltica a distintos porcentajes de arena natural según el contenido de asfalto utilizado en la lechada asfáltica.
- Determinar el contenido óptimo de emulsión según los criterios establecidos en el Manual de Carreteras y determinar la influencia de la forma del árido.
- Concluir si es factible la utilización de la arena natural en porcentajes mayores a los establecidos en el Manual de Carreteras a partir de la observación de algún deterioro en las probetas de asfalto según el contenido óptimo de asfalto obtenido por diseño.
- Determinar la resistencia al deslizamiento de la lechada asfáltica a distintos porcentajes de arena natural para estudiar el efecto de la forma del árido en este parámetro como medida adicional al diseño de lechadas asfálticas.

## 1.4 Alcances

- Los áridos serán extraídos de los dos ríos ubicados en la VI Región del Libertador Bernardo O'Higgins. La procedencia del árido chancado tiene su origen en la planta Áridos San Vicente, la que extrae del río Tinguiririca y la arena natural del río Cachapoal.
- La emulsión asfáltica utilizada corresponde a una emulsión CSS-1h facilitado por el Laboratorio Regional de Vialidad, VI Región, junto con un certificado de cumplimiento de los requerimientos de emulsiones asfálticas catiónicas, según lo determina la Tabla MC 8.301.5.A.
- Se utilizará la banda granulométrica C-1 de acuerdo a la Tabla 5.5406.201.B, procurando que todas las muestras de lechada asfáltica a ensayar presenten la misma granulometría.
- Los ensayos para determinar los requisitos de los áridos para lechadas asfálticas de acuerdo con la Tabla 5.406.201.A serán realizados en el Laboratorio Nacional de Vialidad, Región Metropolitana.
- Las muestras a estudiar serán analizadas para porcentajes que van desde el 0% al 100% de arena natural en los tamices especificados en la Tabla MC 5.406.201.C. El incremento del porcentaje será del 20%, y su reemplazo será de forma equitativa para cada tamiz, con un total de seis grupos de muestra.
- El contenido óptimo de asfalto será determinado según los procedimientos establecidos en el numeral MC 8.302.52: "Método de diseño de lechadas asfálticas y microaglomerados en frío". Los ensayos de consistencia, abrasión en medio húmedo y rueda de carga serán realizados en el Laboratorio Regional de Vialidad, VI Región.
- No se utilizarán aditivos para modificar la emulsión asfáltica y se considerará un diseño con un tránsito medio diario anual mayor a 1000 vehículos/día. Esto establece una pérdida por abrasión máxima de 540 gr/m<sup>2</sup> y una exudación máxima de 540 gr/m<sup>2</sup> según lo establecido en el numeral MC 5.406.301.
- La determinación de la resistencia al deslizamiento será realizada según las especificaciones establecidas en el numeral MC 8.502.16: "Método para determinar el coeficiente de resistencia al deslizamiento con péndulo británico (TRRL)"

## 1.5 Metodología

### 1.5.1 Condiciones de trabajo

Los materiales utilizados en el presente Trabajo de Título son los comúnmente utilizados para la confección de lechadas asfálticas en la VI Región del Libertador Bernardo O'Higgins. El objetivo principal de las muestras confeccionadas para la realización de este trabajo es presentar en todas las muestras las mismas condiciones iniciales para atribuir los resultados exclusivamente por el contenido de arena natural de éstas. Para ello, se establecerán las siguientes consideraciones:

- **Las muestras presentarán la misma granulometría en todos los ensayos**, para asegurar que el grupo de muestras presentan las mismas condiciones en cada ensayo.
- **Las muestras serán lavadas**, para asociar los resultados del diseño exclusivamente a la forma del árido y no al nivel de adherencia agregado-asfalto por las partículas más pequeñas.
- **El porcentaje de arena natural de las muestras será un reemplazo del porcentaje retenido en cada tamiz especificado en la banda C-1**. Este procedimiento pretende independizar los resultados del tamaño máximo de granos y atribuirlos al contenido total de arena natural ingresado al sistema.
- **Según el tipo de ensaye, la masa total utilizada será la misma en todas las muestras**, para evitar interpretaciones de los resultados como función de la cantidad utilizada.

Para poder establecer las condiciones mencionadas anteriormente, se establecerá un procedimiento para la preparación de las muestras de árido:

- Secado de los áridos a 110 °C, para obtener el material a masa constante.
- Separación del árido por los tamices indicados en la tabla 5.406.201.B, debidamente identificados y separados.
- Lavado y secado adicional para ser almacenado tanto por tamiz como por tipo de árido.
- Determinación de la cantidad total a utilizar para el ensaye de consistencia, abrasión en medio húmedo y rueda de carga.
- Cálculo para estimar la cantidad a emplear tanto para el árido chancado como arena natural dependiendo del porcentaje a utilizar.
- Almacenamiento individual de las muestras para ensaye y porcentaje de arena natural, debidamente identificados.

Dicho procedimiento se refleja de forma esquemática en la Figura 1.1:

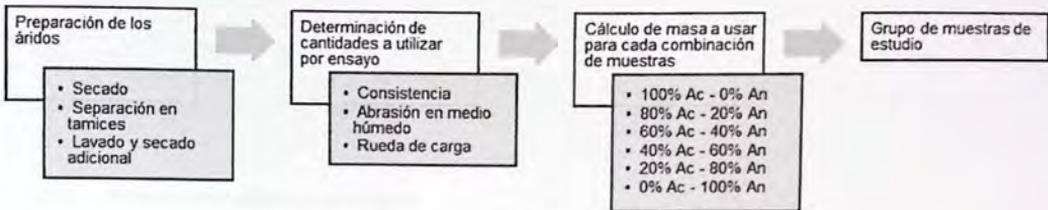


Figura 1.1 - Procedimiento para preparación de muestras

## 1.5.2 Ensayes de materiales

### 1.5.2.1 Procedimientos de ensayo para áridos

- El árido chancado y la arena natural serán muestreados de acuerdo al método de cuarteo de muestras, según lo determina el numeral MC 8.202.2.
- Determinación de la granulometría del árido chancado que se utilizará según lo establecido en el numeral MC 8.202.3 y verificación del cumplimiento de ésta con la banda C-1 según MC 5.406.201.B.
- Verificación de los requisitos de áridos para lechadas asfálticas según lo establecido en la Tabla 5.406.201.A en ambos áridos a utilizar, siendo éstos:
  - Equivalente de arena según MC 8.202.9
  - Índice de Plasticidad según MC 8.102.4
  - Adherencia método estático según MC 8.202.29
  - Adherencia Riedel-Weber según MC 8.202.30
  - Índice de trituración total según MC 8.202.8
  - Partículas chancadas según MC 8.202.6

**Nota:** Los ensayos se realizarán a ambos áridos sin tomar en consideración los porcentajes que se utilizarán para cada mezcla.

### 1.5.2.2 Procedimientos de ensayo de la emulsión asfáltica a utilizar

- Verificación y cumplimiento de los ensayos con los requisitos establecidos en la Tabla MC 8.301.5.A, siendo éstos:
  - Viscosidad Saybolt Furol a 25 °C según MC 8.302.12
  - Estabilidad en almacenamiento a 24 horas según MC 8.302.5
  - Carga de partícula según MC 8.302.5

- Tamizado según MC 8.302.5
- Mezcla con cemento según MC 8.302.5
- Porcentaje de residuo asfáltico según MC 8.302.5
- Penetración a 25 °C según MC 8.302.3
- Ductilidad a 25 °C según MC 8.302.8
- Solubilidad en tricloroetileno según MC 8.302.11
- Ensaye de la mancha según MC 8.302.7

#### **1.5.2.3 Procedimientos para el agua**

- Según lo establecido en el numeral MC 5.406.201(4).

#### **1.5.2.4 Procedimientos para filler**

- Según lo establecido en el numeral MC 5.406.201(3).

### **1.5.3 Ensayes para el diseño de lechadas asfálticas**

Válido para todas las muestras con distintos porcentajes de arena natural en el diseño de lechadas asfálticas. Se determinará el contenido de emulsión teórico según el punto 4.1 del numeral MC 8.302.52.

#### **1.5.3.1 Ensaye de consistencia**

- Realización del ensaye de consistencia de las mezclas de lechada asfáltica según el numeral MC 8.302.45 con el objetivo determinar el contenido de agua de premezclado necesario para lograr una mezcla estable y determinar la trabajabilidad de la mezcla según el procedimiento ISSA TB 113 para estudiar el comportamiento de la mezcla durante el proceso de mezclado para todos los porcentajes de arena natural a utilizar. El contenido de asfalto utilizado será el contenido de emulsión teórico calculado anteriormente y el porcentaje de agua de premezclado se referirá al árido seco de acuerdo a la normativa vigente.

#### **1.5.3.2 Ensaye de abrasión en medio húmedo**

- Realización del ensaye de abrasión en medio húmedo según las consideraciones indicadas en el numeral MC 8.302.46. Con el objeto de poder establecer una relación entre la abrasión de las probetas y el contenido de asfalto ingresado al sistema, se realizarán tres ensayos para muestras con igual contenido de arena natural y distinto contenido de asfalto: el contenido asfalto será en porcentaje y estará respecto al contenido de emulsión teórico calculado y dos puntos con una diferencia de  $\pm 2\%$ , para todos los porcentajes de arena natural a utilizar.

### **1.5.3.3 Ensaye de rueda de carga**

- Realización del ensaye de rueda de carga según las consideraciones indicadas en el numeral MC 8.302.53 con el objetivo de estudiar la exudación de las muestras de lechada asfáltica a distintos porcentajes de arena natural. Para poder establecer una relación entre la exudación con el contenido de asfalto, se realizarán tres ensayes con los mismos porcentajes emulsión utilizados en el ensaye de abrasión en medio húmedo para todas las muestras con distintos porcentajes de arena natural a utilizar, analizando el comportamiento de la exudación para todos los grupos de muestra.

### **1.5.4 Determinación del contenido óptimo de asfalto y análisis de resultados**

- Obtención del contenido óptimo de asfalto según los límites de diseño establecidos en el punto 5.1 del numeral MC 8.302.52 determinado como el promedio del contenido mínimo obtenido en el ensaye de abrasión en medio húmedo, y el contenido máximo de emulsión a partir del ensaye de rueda de carga, y de forma alternativa como la intersección de las curvas de abrasión en medio húmedo y exudación a partir de los gráficos obtenidos según los ensayes realizados anteriormente para todos los grupos de muestra con distinto contenido de arena natural, con el objetivo de determinar si existe una relación entre los resultados de diseño con la forma del árido. Dicha relación será validada por medio de una prueba de hipótesis.
- Comparación de las probetas diseñadas presentando el contenido óptimo de asfalto según el criterio de límites de diseño o el criterio de intersección de curvas, estableciendo algún criterio de aceptación de muestras de forma visual. Los resultados obtenidos serán clasificados en dos grupos: contenido de arena permitido según el Manual de Carreteras y los grupos de muestra fuera del dicho rango.

### **1.5.5 Análisis de la resistencia al deslizamiento de una lechada asfáltica según el contenido de arena natural**

- Con el fin de estudiar las propiedades superficiales de la lechada asfáltica según la forma del árido, se determinará la resistencia al deslizamiento según el método del péndulo británico según el numeral MC 8.502.16 a distintos porcentajes de arena natural, con el objetivo de establecer un criterio adicional al considerar su uso en lechadas asfálticas.

Se presenta la metodología de trabajo de forma esquemática en la Figura 1.2:

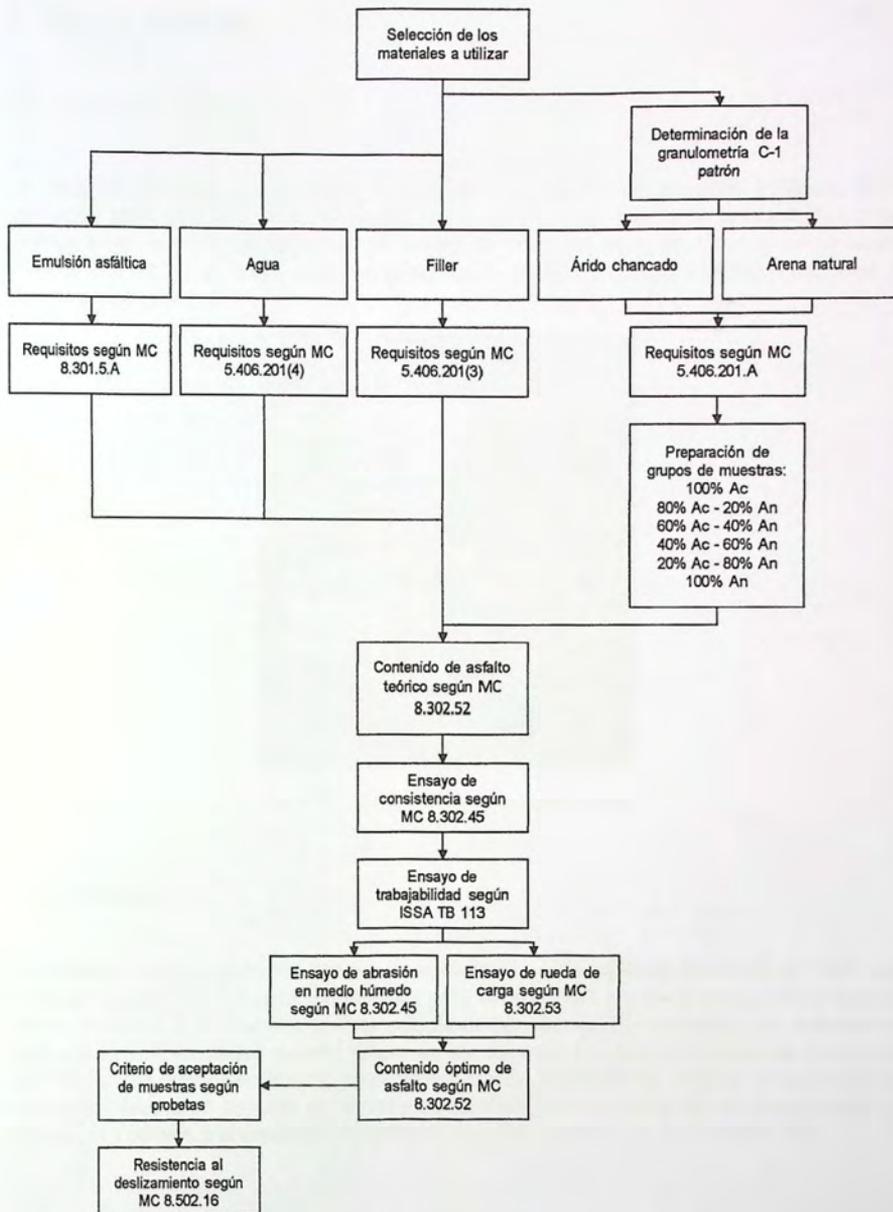


Figura 1.2 - Metodología de trabajo

## 2 Marco teórico

### 2.1 Lechada asfáltica

Las lechadas asfálticas o *slurry seal* corresponden a mezclas de emulsión asfáltica, áridos graduados, agua, y en caso de ser necesario *filler* y aditivos. Esta mezcla es colocada de manera continua en la superficie del pavimento por medio de un equipo especial conocido como *camión slurry*, el cual mezcla en forma ordenada el agregado, el *filler*, el aditivo y la emulsión, como se observa en la Figura 2.1.

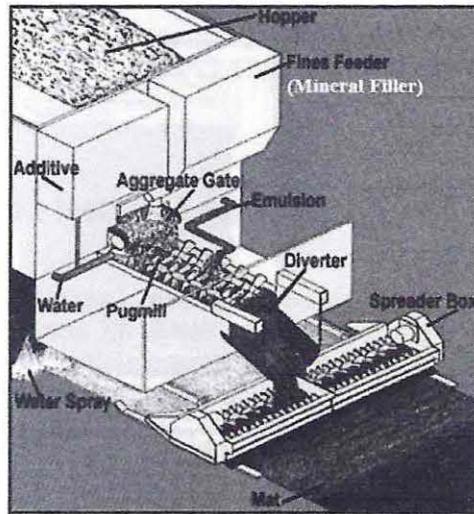


Figura 2.1 - Esquemática de un camión *slurry*

#### 2.1.1 Historia

La lechada asfáltica se aplicó por primera vez en Alemania, a principios de la década de 1930, pero su mayor desarrollo se produjo principalmente a partir del año 1960, gracias a la aparición de equipos de flujo continuo y a los avances en la tecnología de emulsiones. Paralelamente, en Alemania se logra una lechada de calidad superior, capaz de ser colocada en capas en espesores mayores la cual fue llamada micropavimento (*microsurfacing*). Desde la década de 1960 en adelante se han conseguido desarrollos notables en la industria, gracias a la incorporación de nuevos tipos de emulsiones y aditivos, y al desarrollo sostenido de equipos de mezclado y colocación [10].

## 2.1.2 Propiedades de la lechada asfáltica

La principal propiedad de la lechada asfáltica consiste en alargar la vida útil de un pavimento a un bajo costo. Este tratamiento tiene como objetivo corregir deterioros superficiales leves en las superficies de pavimentos que aún conservan su capacidad estructural. Un uso adecuado de la lechada asfáltica ofrece solución a pavimentos oxidados y permite restaurar la textura superficial de éstos, mejorando la resistencia al deslizamiento del camino [11]. Otros usos asociados consisten en reducir el ruido, mejorar las características impermeables de la superficie y corregir desprendimientos menores en la superficie del pavimento, este último conocido como *raveling* [12].

Así mismo, debido a que las lechadas asfálticas presentan un mínimo o nulo aporte estructural al pavimento, éstas no deben ser usadas para corregir la estructura superficial del pavimento, ser utilizado como un método de bacheo superficial y corregir pavimentos agrietados [12]. Para estos casos, previamente se deben aplicar técnicas de mantenimiento que permitan ofrecer una solución integral tanto a nivel funcional como estructural [11].

## 2.1.3 Fallas comunes en lechadas asfálticas

Las fallas en soluciones básicas son comunes y pueden ser atribuidos a los procedimientos de diseño y construcción inadecuados. En términos simples, el origen de este tipo de fallas se debe principalmente al contenido de emulsión utilizado, lo que ocasiona dos tipos principales de efectos, los que son la base para el diseño de lechadas asfálticas.

### 2.1.3.1 Desgaste o abrasión

El desgaste o abrasión es un fenómeno asociado al desprendimiento de las partículas que conforman la mezcla de lechadas asfálticas y se observa un desprendimiento superficial en las zonas por donde pasan las ruedas de los vehículos o como material suelto sobre la calzada (Figura 2.2), lo anterior se debe a un bajo contenido de asfalto en la mezcla, lo que causa una baja adherencia entre el asfalto y la emulsión utilizada, disminuyendo la cohesión de la mezcla. El desgaste del árido también puede presentarse cuando existe una mala acomodación del agregado pétreo.

Las principales causas de este tipo de falla recaen en la suciedad del árido utilizado y una dosificación insuficiente de emulsión, siendo también atribuibles a una mala compactación, apertura al tránsito temprana, condiciones frías o húmedas cuyas condiciones son más favorables para que se produzca este tipo de fallas [1].



Figura 2.2 - Desgaste superficial de una solución básica (Fuente: Diario La Razón, Bolivia)

### 2.1.3.2 Exudación

La exudación consiste en el afloramiento del exceso de asfalto hacia la superficie, generando una película bituminosa, formando una superficie brillante, reflectora y pegajosa. Visualmente se observa como una variación en el color del pavimento o de la superficie (Figura 2.3). Este tipo de falla se debe principalmente al uso excesivo de asfalto, pero también puede ser asociado a una granulometría incorrecta, tránsito pesado, o un mal diseño [1]. Las consecuencias de la exudación en el diseño afectan principalmente en la seguridad del camino. A niveles altos de severidad, un camino exudado ofrece una superficie pegajosa a temperatura ambiente y una superficie resbaladiza en presencia de agua. Otro aspecto importante a considerar es en la superficie específica de los áridos utilizados, puesto que un menor valor de éste conlleva a una mayor cantidad de asfalto disperso.



Figura 2.3 - Exudación en la superficie de un camino (Fuente: Google Images)

## 2.1.4 Requisitos para lechada asfáltica

Las lechadas asfálticas deben ser dosificadas para una abrasión máxima de 540 gr/m<sup>2</sup> de acuerdo al ensayo de abrasión en medio húmedo según el método MC 8.306.46 y el ensayo de rueda de carga, la cual establece una exudación máxima medida en arena adherida en función del tránsito medio diario anual [4]. Como el presente trabajo desconoce esta variable, se exige que la exudación máxima corresponda a 540 gr/m<sup>2</sup> [13], indicado en el numeral MC 5.406.301. Los ensayos de abrasión en medio húmedo y rueda de carga se explican más adelante en el diseño de lechadas asfálticas.

## 2.1.5 Diseño de lechadas asfálticas

### 2.1.5.1 Cálculos previos

Con el objetivo de realizar una primera aproximación para calcular el contenido óptimo de asfalto, se deben realizar cálculos previos a partir de las características de los materiales a utilizar. El primer paso consiste en la determinación de la superficie específica del árido, la que se obtiene a partir de la granulometría (Ecuación 2.1):

$$\text{Superficie específica} = \frac{0,17a + 0,33b + 2,3c + 12d + 135e}{100} \quad (\text{Ecuación 2.1})$$

Donde:

- *Superficie específica*: Relación entre la superficie externa de un agregado y su densidad real seca [m<sup>2</sup>/kg]
- *a*: Porcentaje del árido mayor que 10 mm (3/8")
- *b*: Porcentaje del árido que pasa por tamiz 10 mm (3/8") y queda retenido en tamiz 5 mm (#4)
- *c*: Porcentaje del árido que pasa por tamiz 5 mm (#4) y queda retenido en tamiz 0,315 mm (#50)
- *d*: Porcentaje del árido que pasa por tamiz 0,315 mm (#50) y queda retenido en tamiz 0,08 mm (#200)
- *e*: Porcentaje del árido que pasa por tamiz 0,08 mm (#200)

Obtenida la superficie específica del agregado pétreo, se determina el residuo asfáltico de acuerdo al procedimiento estipulado por MC 8.302.5 o el método indicado al pie de la tabla 5.419.201.A.

Para determinar el contenido de emulsión teórico, se utiliza la siguiente expresión (Ecuación 2.2):

$$E_t = \frac{4,5 \sqrt[5]{\text{Superficie especifica}}}{R} - 1$$

(Ecuación 2.2)

Donde:

- $E_t$ : Contenido de emulsión teórico referido al agregado seco [%]
- *Superficie especifica*: Superficie específica del agregado seco [ $m^2/kg$ ]
- $R$ : Residuo asfáltico de la emulsión (expresado en forma decimal)

### 2.1.5.2 Consistencia de la mezcla

Para determinar la consistencia de la mezcla, primero se debe calcular el "agua de premezclado" con el objeto de que el proceso de elaboración se lleve a cabo de manera que cumpla con los requerimientos de especificación, se adapte al tráfico, a las condiciones de curado y al uso final [14], con el fin de obtener una mezcla trabajable y estable en terreno. El procedimiento se efectúa según lo señalado en el numeral MC 8.302.45.

Para iniciar este ensaye, todos los materiales se deben calentar previamente a 25°C durante 60 minutos.

Después se debe tomar una muestra de 600 gr de áridos, a la cual se debe adicionar un determinado porcentaje de agua referido al árido seco [15], que para lechadas asfálticas, se recomienda un valor inicial de agua correspondiente a un 2% menor que el valor calculado de emulsión teórico (Ecuación 2.2), mezclando hasta humectar el árido [16].

Posteriormente, se debe incorporar una cantidad de emulsión y revolver hasta homogeneizar la mezcla. El tiempo para este proceso no debe ser inferior a 1 minuto ni superior a 3 minutos.

Para determinar la consistencia de la mezcla, ésta se debe colocar en un molde sobre la placa de escurrimiento, luego rellenar el molde con la mezcla y por último levantar de forma vertical (el molde para dejar que la mezcla fluya por gravedad sobre la base graduada (Figura 2.4).

La consistencia de la mezcla se obtendrá de acuerdo al desplazamiento de la lechada en la placa, para lo cual se tomará como valor final, el promedio de cuatro mediciones en la escala de círculos de la base graduada separados entre sí por 90° y con aproximación a 0,5 cm [15], el que debe variar entre 2 a 3 centímetros.

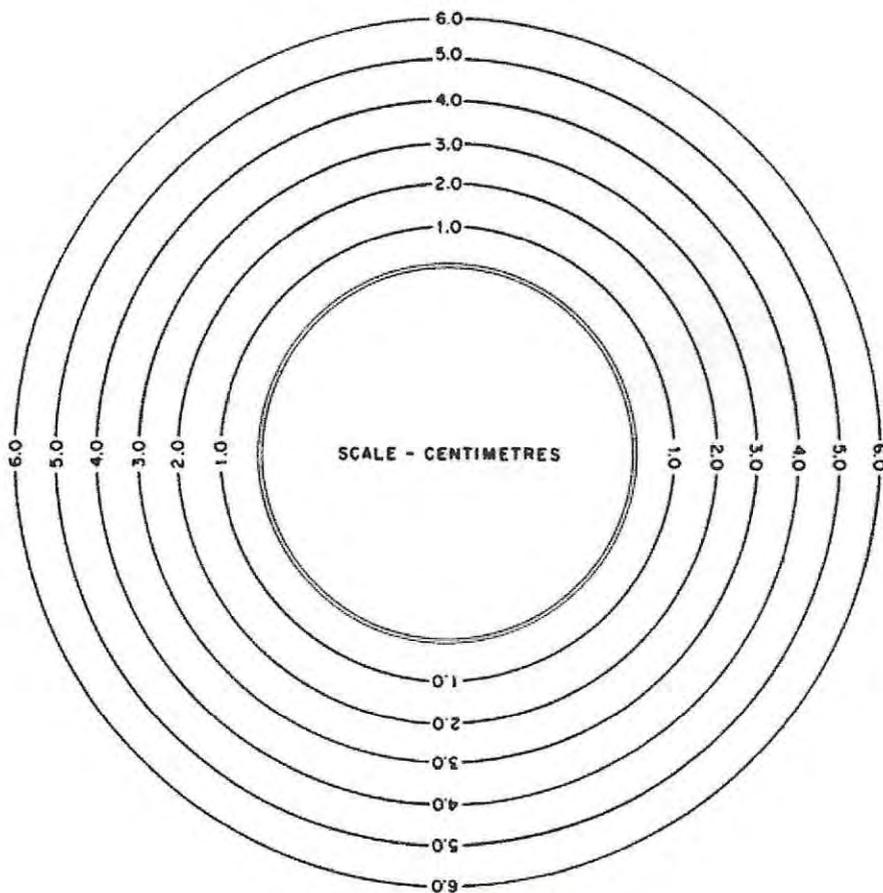


FIG. 1 Cone Consistency Test

Figura 2.4 - Escala de círculos para determinar la consistencia en lechadas asfálticas (Fuente: [14])

Cabe señalar, que la base para iniciar el diseño de las lechadas asfálticas, se debe considerar el valor del contenido de emulsión teórico y el porcentaje de agua de premezclado, obtenida en este ensayo.

### 2.1.5.3 Ensayo de abrasión en medio húmedo

Este ensayo se rige según MC 8.302.46. Su objetivo es determinar la resistencia al desgaste por abrasión bajo agua en probetas de lechada asfáltica. Se busca correlacionar el comportamiento en laboratorio con el desempeño a escala real. Este procedimiento determina el contenido de emulsión mínimo para obtener una lechada con una cohesión suficiente para resistir la acción abrasiva producida por el tránsito [17]. Los fundamentos teóricos están basados en el documento "A Study of WTAT Variables" de Benedict.

Los materiales se acondicionan y se mezclan de igual manera que el ensayo de consistencia, mientras se prepara una base con papel mantequilla y se unta vaselina sólida tanto en el papel mantequilla como en el molde con el objetivo de facilitar el desmolde. La mezcla de lechada asfáltica se vacía en el molde y enrasa con el mínimo de manipulación. Luego de un proceso de secado a

60°C hasta masa constante (mínimo 15 horas), luego se deja enfriar a temperatura ambiente, registrando la masa de la probeta. Registrada la masa, se somete a un baño de agua a 25°C durante 60 – 75 minutos, para luego someter la probeta a la máquina de abrasión durante 5 minutos, la que debe estar cubierta con al menos 6 milímetros de agua (Figura 2.5, izquierda). Finalmente, la muestra es secada a 60°C hasta masa constante y se registra dicho valor (Figura 2.5, derecha) [17].



Figura 2.5 - Probeta de lechada asfáltica antes (izquierda) y después del ensaye de abrasión en medio húmedo (derecha)

La abrasión por desgaste bajo agua se determina a partir de la siguiente fórmula:

$$AMH = \frac{M_i - M_f}{A} \quad \text{(Ecuación 2.3)}$$

Donde:

- $AMH$ : Abrasión en medio húmedo [ $gr/m^2$ ]
- $M_i$ : Masa de la probeta antes del desgaste [ $gr$ ]
- $M_f$ : Masa de la probeta después del ensaye [ $gr$ ]
- $A$ : Área de desgaste de la probeta de lechada asfáltica [ $m^2$ ]. Esta área se considera como el área de una circunferencia debido al movimiento de la máquina de abrasión.

La Ecuación 2.3 establece la relación entre el desgaste de la lechada asfáltica con el contenido de emulsión suministrado a la mezcla. La dosificación de agua referida al árido seco corresponde al porcentaje de agua de premezclado calculado en el ensaye de consistencia y el contenido de emulsión inicial corresponde al contenido de emulsión teórico (Ecuación 2.2).

Los otros valores de emulsión corresponden a valores entre el rango  $\pm 2\%$  del contenido teórico calculado. De acuerdo a resultados experimentales, la relación característica entre la abrasión y el contenido de emulsión se presenta en la Figura 2.6.

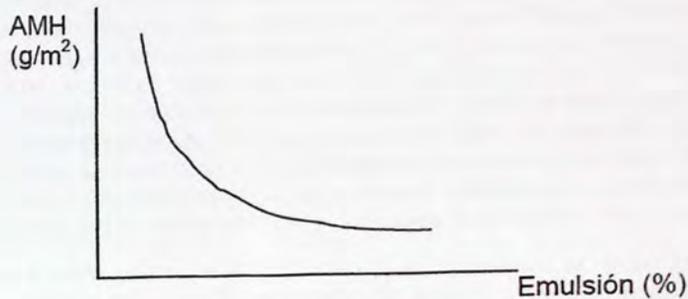


Figura 2.6 - Curva característica de la abrasión a diferentes porcentajes de emulsión (Fuente: [16])

Según lo observado en la curva característica de desgaste versus el porcentaje de emulsión (Figura 2.6), se establece que la abrasión en lechadas asfálticas disminuye de forma exponencial a mayor contenido de emulsión.

#### 2.1.5.4 Ensayo de rueda de carga

Este ensayo se rige por el numeral MC 8.302.53. Este método consiste en confeccionar una probeta de lechada asfáltica previamente acondicionada y se somete al paso repetido de una rueda de goma cargada. Luego repetir nuevos ciclos de carga (Figura 2.7, izquierda), pero cubriendo la probeta con arena caliente para observar la cantidad de arena adherida (Figura 2.7, derecha). La cantidad de arena adherida es una forma para determinar la exudación de la muestra y sirve para establecer el límite máximo de ligante en lechadas asfálticas [18].



Figura 2.7 - Probeta sometida a ciclos de carga (izquierda) y probeta ensayada después de agregar arena silícea (derecha)

A partir del acondicionamiento y mezclado de los materiales de igual forma que el ensayo de consistencia, se prepara una placa galvanizada bajo un molde adicionando con una capa de vaselina sólida, de manera análoga al ensayo de abrasión en medio húmedo, la mezcla de lechada asfáltica se vierte en la probeta y se somete al horno a 60°C durante al menos 15 horas. Luego de dejar la probeta a 25°C, esta debe ser colocada en la máquina de rueda de carga y ser sometida a 1.000 ciclos de carga (con una carga de 56,7 kg), procurando que, en caso de observar brillo en la superficie de la probeta, se suministra agua para impedir la adherencia rueda – probeta. El objetivo de esta etapa es para lograr una exudación de la mezcla asfáltica que pueda ser retenido por una cantidad de arena silícea, que será el indicador para medir la exudación de la mezcla.

La probeta ensayada debe ser secada a 60°C hasta masa constante y se registra dicho valor. Luego, se calienta arena silícea a 82°C y se esparce sobre la probeta, ya sometida al paso de una rueda, cargada dentro de un marco preparado para retener la arena, con el fin de lograr que la arena se adhiera con la emulsión exudada luego de los primeros 1.000 ciclos de carga, se debe someter el conjunto a 100 ciclos adicionales, finalmente se golpea la probeta suavemente para remover la arena no adherida, registrando el peso de la probeta. La exudación en la lechada asfáltica se determina a través de la siguiente fórmula:

$$S_a = \frac{M_i - M_f}{A} \quad (\text{Ecuación 2.4})$$

Donde:

- $S_a$ : Exudación de la lechada asfáltica medido como cantidad de arena adherida a la probeta [gr/m<sup>2</sup>]
- $M_i$ : Masa de la probeta luego de someter la probeta a 1000 ciclos de carga [gr]
- $M_f$ : Masa de la probeta luego de someter la probeta a 100 ciclos con arena adherida [gr]
- $A$ : Área de la probeta para determinar la exudación [m<sup>2</sup>]. Este valor se puede considerar como 0,01355 m<sup>2</sup>.

La Ecuación 2.4 establece una relación entre el contenido de emulsión suministrado a la mezcla de lechada asfáltica y la exudación de ésta. Cabe destacar que el porcentaje de agua suministrado referido al árido seco corresponde a la cantidad de agua de premezclado calculado en el ensayo de consistencia y el contenido de emulsión inicial corresponde al contenido de asfalto teórico (Ecuación 2.2). Los otros porcentajes de emulsión para poder establecer una relación corresponden a porcentajes cercanos al contenido de emulsión teórico (recomendado en el intervalo ± 2% de dicho valor). La relación característica de la exudación de una mezcla de lechada asfáltica se observa en la Figura 2.8.

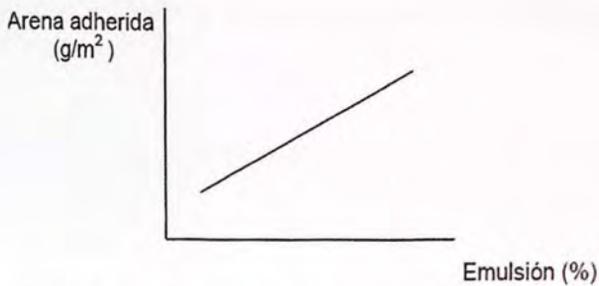


Figura 2.8 - Curva característica de la exudación a diferentes porcentajes de emulsión (Fuente: [16])

De lo observado en la Figura 2.8, esta curva característica determina que la exudación aumenta de forma lineal a mayor contenido de emulsión.

### 2.1.5.5 Contenido óptimo de emulsión

A partir del análisis de las curvas de abrasión y exudación, se determina el contenido óptimo de emulsión en lechadas asfálticas. El criterio de límites de diseño (C1, Figura 2.9) corresponde al valor promedio de los valores mínimo y máximo de emulsión, determinado por las especificaciones indicadas en el punto 5.1 del numeral MC 8.302.52. El límite mínimo se determina como el contenido de emulsión que produce una abrasión máxima de 540 gr/m<sup>2</sup>. El límite máximo es el contenido de emulsión la cual se produce una exudación (medida según cantidad de arena adherida) en función del tránsito medio diario anual del camino.

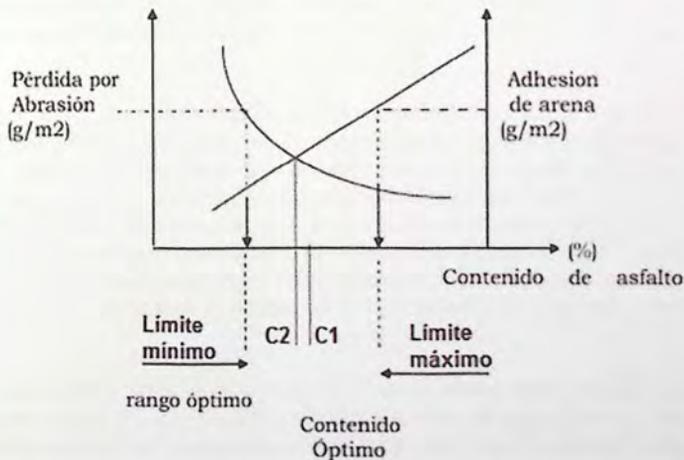


Figura 2.9 - Criterios de diseño para determinar el contenido óptimo de emulsión (Fuente: Curso de Laboratorista Vial)

Determinados los límites de diseño, el contenido de emulsión óptimo se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$E_{opt} = \frac{E_{min} + E_{máx}}{2} \quad (\text{Ecuación 2.5})$$

Donde:

- $E_{opt}$ : Contenido óptimo de emulsión según el criterio de límites de diseño [%]
- $E_{min}$ : Contenido mínimo de emulsión necesario para que se produzca una abrasión máxima de 540 gr/m<sup>2</sup> [%]
- $E_{máx}$ : Contenido máximo de emulsión necesario para que se produzca una exudación máxima en función del tránsito medio diario anual [%]

De manera alternativa, se establece el criterio de intersección de curvas (C2, Figura 2.9) como la intersección de las rectas de abrasión y exudación de la lechada asfáltica.

Nótese que, para cualquier criterio de diseño adoptado, las probetas deben presentar ausencia de segregación, ausencia de peladuras y erosión en la superficie y ausencia de grietas de contracción, de forma visual e informar acerca del desplazamiento lateral en la probeta al final del ensaye de rueda de carga [13].

### 2.1.6 Resistencia al deslizamiento

Este parámetro no es requerido por el Manual de Carreteras en el diseño de lechadas asfálticas. Sin embargo, como uno de los usos a la lechada asfáltica consiste en restaurar la textura superficial del camino al cual es aplicado, se presenta con el fin de analizar la influencia de la forma del árido en ésta.

En pavimentos, una de las principales características de éstos consiste en disponer una superficie que asegure una buena adherencia con neumáticos, fundamental para la seguridad de los usuarios. Un indicador del pavimento para determinar dicha adherencia corresponde al coeficiente de fricción. Éste puede ser cuantificado de forma física mediante un factor que resulta de la relación entre la fuerza de fricción desarrollada en la interface de un neumático impedido de rodar con el pavimento y el peso sobre el neumático. Los métodos para determinar el coeficiente de fricción consideran como variable el agua, debido a su influencia negativa en la fricción de los pavimentos, y los distintos métodos usados para determinar la resistencia al deslizamiento lo consideran como variable de diseño [5].

En términos generales, la superficie de un pavimento, su rugosidad y por consiguiente su resistencia al deslizamiento puede ser determinado por las condiciones de microtextura y macrotextura. La primera de ellas corresponde a la textura superficial propia de la superficie de los agregados pétreos, los que pueden presentar características de tipo áspero o pulida; mientras que la segunda se refiere a la textura superficial del pavimento, proveniente del efecto conjunto de las partículas de los

agregados pétreos que sobresalen de la superficie. En este caso, las propiedades de la macrotextura están dadas por el tipo de mezcla que exista en la superficie [5].

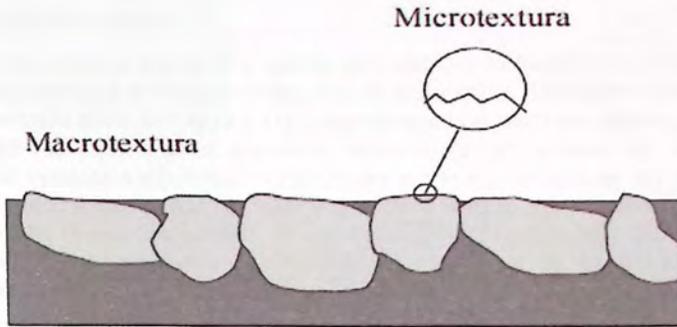


Figura 2.10 - Microtextura y macrotextura de la superficie de un pavimento flexible (Fuente: [5])

En la caracterización de la microtextura y la macrotextura según la Figura 2.10, el efecto de la microtextura toma especial importancia para el presente Trabajo de Título debido a que la influencia de la forma del árido desde una superficie más rugosa como es un árido chancado hasta una superficie más lisa producto de la arena natural, y se analiza la resistencia al deslizamiento a distintos porcentajes de arena natural por medio del ensaye con péndulo británico, según lo estipulado en el numeral MC 8.502.16.



Figura 2.11 - Calibración péndulo británico para determinar la resistencia al deslizamiento en lechadas asfálticas

El ensaye para determinar la resistencia al deslizamiento con péndulo británico mide la pérdida de energía de un péndulo de características conocidas, provisto en su extremo de una zapata de goma, una de cuyas aristas roza, con una presión determinada, sobre la superficie a ensayar en una longitud fija. Las características antideslizantes de la superficie se miden por el complemento del ángulo de oscilación del péndulo [19].

Antes de proceder a realizar el ensaye, el aparato debe ubicarse de tal modo que la zapata de goma quede alineada respecto a la dirección longitudinal de la superficie, permitiendo que el péndulo se desplace en la misma dirección (Figura 2.11). Luego se levanta el brazo del péndulo y se ajusta a su posición inicial. Se humedece la superficie, midiendo la temperatura del agua utilizada. Posteriormente, se presiona el pulsador de disparo para mover el brazo libremente y recoger el brazo oscilante en su recorrido de regreso para evitar el arrastre de la aguja que mide el número de péndulo británico (BPN). Se ejecuta una medición sin registrar el dato y se repite cinco veces consecutivas. Si el mayor valor difiere en más de dos unidades con el valor menor, se descarta y se contabilizan 4. En caso de encontrar 2 valores con una diferencia mayor a dos, se repiten 5 veces [19].

La resistencia al deslizamiento se determina a través de una serie de fórmulas, que se detallan a continuación:

$$BPN = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n BPN_i \quad (\text{Ecuación 2.6})$$

Donde:

- $BPN$ : British Pendulum Number o Número de péndulo británico
- $n$ : 4 o 5 según las consideraciones indicadas.

$$F_A = \frac{1}{1 - 0,00525(t - 20)} \quad (\text{Ecuación 2.7})$$

Donde:

- $F_A$ : Factor de ajuste de temperatura a 20 °C.
- $t$ : Temperatura en °C.

$$RD = \frac{BPN_A}{100} \quad (\text{Ecuación 2.8})$$

Donde:

- $RD$ : Resistencia al deslizamiento.
- $BPN_A$ : Número de péndulo británico ajustado a la temperatura de 20 °C.

## 2.2 Características de los componentes de la lechada asfáltica

Junto con realizar ensayos a la lechada asfáltica para obtener una dosificación óptima de los materiales, cada material utilizado debe cumplir con sus propios criterios para ser utilizados en lechadas asfálticas.

### 2.2.1 Áridos

El agregado pétreo es el componente con mayor porcentaje en mezclas de lechada asfáltica. Entre sus funciones destacan el proveer un esqueleto mineral que soporte las cargas de tráfico, proveer una adecuada resistencia al deslizamiento, resistir la abrasión por parte del tráfico y resistir la meteorización producida por efectos climáticos.

#### 2.2.1.1 Características de los áridos para lechadas asfálticas

Para pueda cumplir con las exigencias esperadas para ser utilizado en lechadas asfálticas, los áridos deben cumplir con los siguientes requisitos:

- **Limpios:** Los áridos en para lechadas asfálticas deben ser libres de materia orgánica y de cualquier sustancia perjudicial, como arcillas. La presencia de estos activos puede ocasionar dificultades en el cubrimiento de las partículas de la mezcla de la lechada, pudiendo provocar un posible re-emulsiónamiento del asfalto, ocasionando la destrucción del tratamiento por acciones del agua o el tráfico [3]. La forma de determinar la calidad del árido desde este punto de vista se determina por el ensayo de equivalente de arena.
- **Duros:** Las características de la dureza y la rugosidad de los áridos guardan relación con la resistencia a la abrasión y degradación, cuyas exigencias aumentan a mayor tamaño de partículas [3], con la finalidad de ser resistentes al rodillado en el proceso constructivo, y posteriormente a la acción del tráfico [20]. Un árido que presenta una alta dureza, será reflejado en los ensayos de desgaste de Los Ángeles o en su defecto en el ensayo de índice de trituración.
- **Chancados:** Los áridos deben ser compuestos en su mayoría producto del chancado de roca, debido a que en esas condiciones se observan las mejores características mecánicas de la lechada asfáltica [3]. Además, los áridos chancados tienden a impedir el desplazamiento de las partículas bajo la acción de una carga, debido al roce y la trabazón entre las partículas del agregado [20].

Con respecto a la forma del árido, el uso de arena natural en lechadas asfálticas favorece la trabajabilidad de la mezcla, a costa de una disminución tanto de las características mecánica como las propiedades antideslizantes de la lechada asfáltica [3]. Por otra parte, la forma de los áridos influyen en la trabazón interna de las partículas, logrando mezclas con poca resistencia cuando se usan partículas redondeadas [12].

- **Bien graduados:** La granulometría del árido debe cumplir con las especificaciones técnicas para su utilización en lechadas asfálticas. Además, una buena granulometría facilita a que la lechada asfáltica pueda ser colocada en terreno con facilidad, evitando la segregación de la mezcla [20]. Según los requisitos del árido, se puede corregir el árido en su fracción fina con filler.
- **Que presenten buenas propiedades superficiales:** Las propiedades de árido desde el punto de su superficie, toma relevancia desde el punto de vista de la adherencia asfalto – árido. Esto condiciona a la lechada asfáltica a que su resultado final sea resistente y durable [20].

### 2.2.1.2 Requisitos de los áridos para lechadas asfálticas

El Manual de Carreteras, de acuerdo a la sección 5.406, establece los procedimientos para los áridos en lechadas asfálticas. Una de las características principales en un árido es que presente una granulometría heterogénea con el objetivo de disminuir el índice de vacíos en el árido. El Manual de Carreteras establece cuatro tipos de bandas granulométricas en lechadas asfálticas. La granulometría A-1 es útil en sellados de grietas y para sello fino como primera capa. La granulometría B-1 y C-1 son utilizados para aumentar la textura, y finalmente la granulometría D-1 se usa en tratamiento superficial simple [4]. La banda granulométrica para cada caso se presenta en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 - Granulometría de áridos utilizados en lechadas asfálticas

TAMICES		Banda A-1	Banda B-1	Banda C-1	Banda D-1
[mm]	ASTM				
12,500	1/2"				100
10,000	3/8"		100	100	85-98
5,000	#4	100	85-95	70-90	62-80
2,500	#8	85-95	62-80	45-70	41-61
1,250	#16	60-80	45-65	28-50	28-46
0,630	#30	40-60	30-50	18-34	18-34
0,315	#50	25-42	18-35	12-25	11-23
0,160	#100	15-30	10-24	7-17	6-15
0,080	#200	10-20	5-15	5-11	4-9

Fuente: Adaptado de [4]

Con respecto a los áridos utilizados en lechadas asfálticas, los requisitos se estipulan en el numeral MC 5.406.201.A, que determinan los ensayos necesarios y sus límites admisibles según cada caso (Tabla 2.2):

Tabla 2.2 - Requisito de áridos para lechadas asfálticas

Ensaye	Exigencia	Método
Equivalente de Arena	Mínimo 45%	MC 8.202.9
Índice de Plasticidad	No Plástico	MC 8.102.4
Adherencia Método Estático	Mínimo 95%	MC 8.302.29
Adherencia Riedel-Weber	0-5	MC 8.302.30
Índice de Trituración Total	Máximo 3,5%	MC 8.202.8
Partículas Chancadas	Mínimo 90%	MC 8.202.6

Fuente: Adaptado de [4]

• **Equivalente de arena**

Este ensayo se realiza a partir de las consideraciones del numeral MC 8.202.9, con el objetivo de determinar las condiciones relativas de arcilla, finos plásticos o polvo en suelos granulares del agregado que pasa por la malla 4,75 mm (tamiz #4). Este ensayo intenta caracterizar una relación entre las partículas granulares y la arena como una mezcla deseable, y el material fino arcilloso, plástico o polvo como indeseables [21].

Este método consiste en agregar un volumen medido de un suelo con una solución floculante (compuesta de cloruro de calcio anhidro, glicerina y formaldehído en agua destilada [22]), dentro de un cilindro plástico graduado, para luego ser agitado con la finalidad de aflojar el revestimiento del material arcilloso, plástico o polvo de las partículas de arena. Luego, se agrega una cantidad adicional de solución floculante, forzando al material más fino a entrar en suspensión sobre la arena hasta flocular [21].

De acuerdo con el numeral MC 8.202.9, el equivalente de arena se determina a partir de la siguiente fórmula:

$$EA = \frac{N_a}{N_f} 100 \quad \text{(Ecuación 2.9)}$$

Donde:

- $EA$ : Equivalente de arena [%]
- $N_a$ : Nivel superior de la arena luego de la floculación y sedimentación de la fracción más fina [mm]
- $N_f$ : Nivel superior de la arcilla luego de la floculación y sedimentación de la fracción más fina [mm]

La Figura 2.12 presenta de forma ilustrativa los niveles de arena y arcilla presentes en un árido:

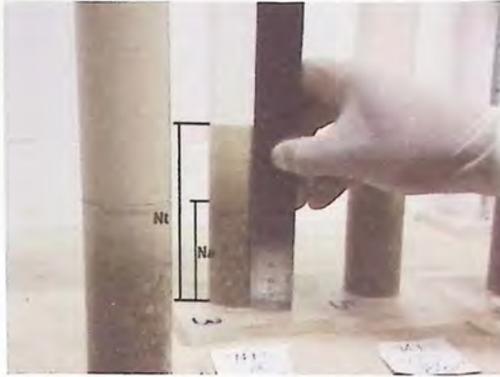


Figura 2.12 - Niveles de arena y arcilla para un ensayo de equivalente de arena (Fuente: Laboratorios Cytem)

#### • Índice de plasticidad

Este ensayo se realiza a partir de las consideraciones del numeral MC 8.102.4. El índice de plasticidad es la propiedad de un suelo para poder deformarse y sin romperse. Respecto a lo anterior, La plasticidad de un suelo depende de la cantidad y el tipo de arcilla presente en un árido [23].

$$IP = LL - LP \quad (\text{Ecuación 2.10})$$

Donde:

- *IP*: Índice de plasticidad del suelo [%]
- *LL*: Límite líquido del suelo [%]
- *LP*: Límite plástico del suelo [%]

El límite líquido corresponde al porcentaje de humedad referido al peso seco de una muestra con una resistencia muy pequeña a esfuerzos de corte, cuya cohesión es prácticamente nula [23]. Dicho límite se define en laboratorio como la humedad para que una muestra de árido depositada en la taza de bronce de la máquina Casagrande (Figura 2.13), dividida en dos porciones simétricas y separadas 2 mm entre sí, entren en contacto luego de 25 golpes [24]. El procedimiento para llegar a este valor se obtiene a través de interpolación en una escala semilogarítmica, según lo indica el numeral MC 8.102.3.

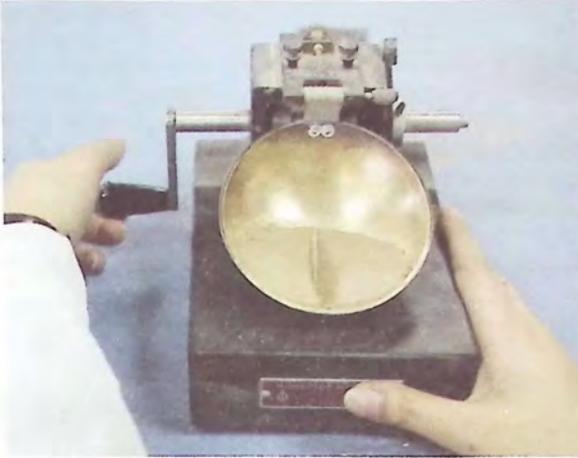


Figura 2.13 - Máquina de Casagrande (Fuente: Google Images)

Por otra parte, el límite plástico se refiere al contenido de humedad referido al peso seco de una muestra para obtener una mezcla plástica fácilmente moldeable, de tal forma crear una bola amasable con la palma de la mano en una superficie [23] y formar bastones cilíndricos de 3 mm de diámetro se disgreguen en trozos de 0,5 – 1 cm de largo (Figura 2.14), que no puedan ser reamasados ni reconstituidos [25] de acuerdo al numeral MC 8.102.4.



Figura 2.14 - Determinación del límite plástico de un árido (Fuente: Google Images)

Si en un árido, no se puede determinar el límite líquido o el límite plástico, éste es clasificado como no plástico (NP).

- **Adherencia método estático**

Este ensayo se realiza a partir de las consideraciones del numeral MC 8.202.29. Este método describe el cubrimiento de las partículas que pasa por el tamiz de 10 mm (3/8") y queda retenido en el tamiz de 5 mm (#4) en inmersión estática, a fin de determinar la adherencia del par ligante asfáltico - agregado en presencia de agua. El procedimiento de este ensaye consiste en mezclar el agregado con el material bituminoso para luego sumergir la mezcla en agua durante un tiempo determinado, y observar si el área del agregado presenta desprendimiento de asfalto, informando su resultado como mayor o menor al 95% [26], de acuerdo con el numeral MC 8.302.29. En la Figura 2.15 se presentan las partículas sumergidas para determinar el grado de adherencia.



Figura 2.15 - Ensayo de Adherencia método estático

- **Adherencia Riedel-Weber**

Este procedimiento establece el grado de adherencia de una película de ligante asfáltico con el agregado que pasa por el tamiz de 0,63 mm (#30) y se retiene en el tamiz de 0,16 mm (#100), de acuerdo con las consideraciones del numeral MC 8.202.30.

Mediante el uso de carbonato de sodio, una muestra de 0,5 gr, previamente condicionada, se somete a ebullición durante 1 min a soluciones de carbonato de sodio con concentración creciente, estableciendo el punto de desprendimiento parcial (los granos se separan y se pegan aún entre sí) y total (los granos se mantienen desunidos y no se adhieren entre sí) como se presenta en la Figura 2.16 [27]. Las concentraciones utilizadas se encuentran en la tabla MC 8.302.30.A (Tabla 2.3):



Figura 2.16 - Ensayo de adherencia Riedel-Weber, con desprendimiento parcial (izquierda) y total de una muestra (derecha)

Tabla 2.3 – Soluciones de carbonato de sodio y sus grados de adherencia

	Concentración		Grado de Adherencia
	M	g/l	
Agua destilada			0
Solución Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	M/256	0,414	1
	M/128	0,828	2
	M/64	1,656	3
	M/32	3,313	4
	M/16	6,625	5
	M/8	13,250	6
	M/4	26,500	7
	M/2	53,000	8
	M	106,000	9
Si no hay despegue total en la solución 9			10

Fuente: Adaptado de [27]

- **Índice de trituración total**

Este método, de acuerdo al numeral MC 8.202.8, consiste determinar el valor del índice de trituración a partir del tamaño del árido. Según la Tabla 2.4, el tamaño máximo de una lechada en la banda C-1 corresponde a la fracción fina de este método, determinando el índice de trituración por el método de impacto.

Tabla 2.4 - Cortes de granulometría, ensayo para determinar el índice de trituración

Método de Ensaye	Material		Tamiz para [mm]	
	Tipo	Grado	Corte	Finos Producidos
Compresión	Grueso	40	40 - 20	5
		20	20 - 10	2,5
Impacto	Fino	10	10 - 5	1,25
		5	5 - 2,5	0,63
		2,5	2,5 - 1,25	0,315
		1,25	1,25 - 0,630	0,16

Fuente: Adaptado de [28]

El índice de trituración por impacto se define como un procedimiento para determinar la trituración de un árido fino sometido a acción de impactos repetidos en situación de confinamiento. Para este ensayo, el árido debe ser secado a 110°C y tamizado según lo indicado en la Tabla 2.4. Se llena el molde en terceras partes con el grado del árido a ensayar y ubicado en una máquina de impacto, se realizan 15 golpes con el martinete en caída libre durante 15 segundos. Finalizado el ensayo, se pesa el material, y es pasado por el tamiz de finos producidos, para luego ser pesado según Tabla 2.4 (Figura 2.17) [28].



Figura 2.17 - Ensayo para determinar el índice de trituración (izquierda) y los finos producidos después del ensayo (derecha)

El índice de trituración para la fracción del árido queda determinado como un promedio de dos repeticiones. De acuerdo con el punto 3.3 del numeral MC 8.202.8, el ensayo para los grados 2,5 y 1,25 según la Tabla 2.4 son obligatorios, y para los grados 10 y 5 son opcionales, debiendo ser realizados cuando los valores del índice de trituración para los grados obligatorios difieran mucho entre sí [28]. El índice de trituración se determina a partir de la Ecuación 2.11 y Ecuación 2.12:

$$IT_p = \frac{B}{A} 100 \quad (\text{Ecuación 2.11})$$

$$IT_t = \sum IT_p \frac{n_i}{100} \quad (\text{Ecuación 2.12})$$

Donde:

- $IT_t$ : Índice de trituración total [%]
- $IT_p$ : Índice de trituración parcial [%]
- $n_i$ : Porcentaje de cada fracción retenida [%]
- $A$ : Peso de la muestra por ensayar. Este peso se considera después de ser sometida a impacto debido a la pérdida de material durante el ensayo.
- $B$ : Peso del material que pasa por el tamiz de finos producidos según lo indicado en la Tabla 2.4.

El ensayo de índice de trituración es un equivalente para el ensayo de desgaste de los Ángeles para grados 7 y superior. En la Tabla MC 8.202.11.A, para distintos grados clasificados del 1 al 7, se establece la masa mínima a ser ensayada por este método de acuerdo con cada grado. Dentro del contenido de la norma, se estipula que, si alguna fracción del grado elegido tiene un porcentaje parcial de peso retenido muy bajo y por lo tanto se requiera tamizar una cantidad de material muy alta para componerlo, se considera el grado del ensayo a aquel que entregue la suma de porcentaje parcial retenido inmediatamente menor [29]. Según la granulometría a utilizar, el método del índice de trituración puede ser un reemplazo directo del ensayo de desgaste de los Ángeles.

#### • Partículas chancadas

De acuerdo al numeral MC 8.202.6. Este método consiste en determinar el contenido porcentual de partículas chancadas, rodadas y lajeadas de la fracción de un pétreo retenido en el tamiz de 5 milímetros. El procedimiento de dicho ensayo consiste en tomar una muestra representativa del material retenido y determinar la masa chancada, rodada y lajeada, calculando el porcentaje de las fracciones presentes en la muestra [30]. El porcentaje de las partículas chancadas, rodadas y lajeadas se determinan a partir de la Ecuación 2.13, Ecuación 2.14 y Ecuación 2.15:

$$Ch = \frac{B_I + D_I}{A_I} 100 \quad (\text{Ecuación 2.13})$$

$$R = \frac{C_I + E_I}{A_I} 100 \quad (\text{Ecuación 2.14})$$

$$L = \frac{D_j + E_j}{A_j} 100$$

(Ecuación 2.15)

Donde:

- $Ch$ : Porcentaje de partículas chancadas [%]
- $R$ : Porcentaje de partículas rodadas [%]
- $L$ : Porcentaje de partículas lajeadas [%]
- $A_j$ : Masa total de la muestra [gr]
- $B_j$ : Masa de chancado [gr]
- $C_j$ : Masa de partícula rodada [gr]
- $D_j$ : Masa de laja chancada [gr]
- $E_j$ : Masa de laja rodada [gr]

## 2.2.2 Emulsión asfáltica

Corresponde al componente más importante en lechadas asfálticas, teniendo como objetivo envolver los áridos. En estas emulsiones, el asfalto se encuentra en forma de partículas muy pequeñas, de aproximadamente 1 - 5 micrones, suspendido en la fase acuosa a través de la ayuda de un agente emulsificante. En la emulsión asfáltica, el asfalto se encuentra finamente dividido y suspendido en agua, la cual posee características de un líquido y puede utilizarse en mezclas con áridos sin necesidad de calentamiento [3].

### 2.2.2.1 Características y requisitos de la emulsión en lechadas asfálticas

La principal propiedad de la emulsión asfáltica consiste en la adherencia que debe existir entre el asfalto y el árido, conocido como "quiebre de la emulsión" sea del tipo lento.

El quiebre de una emulsión asfáltica corresponde a la desestabilización de la emulsión, de tal forma que se deposita en el material pétreo como una capa. Éste fenómeno es un factor importante en el diseño de lechadas asfálticas, puesto que determina la estabilidad de una emulsión.

El fenómeno del quiebre se debe principalmente a la carga eléctrica del agregado pétreo, puesto que neutraliza la carga de las partículas de la emulsión asfáltica, acercándolas a otras partículas logrando una partícula de emulsión de gran tamaño, formando una capa de asfalto en la superficie del árido. En proceso de desestabilización, se produce un fenómeno llamado "emulsión inversa" en la que el asfalto pasa a ser una mezcla continua y el agua entra en una fase discreta, formándose pequeñas gotas al interior del asfalto debido a la pérdida de agua en la emulsión [31]. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presentan tres pasos del proceso de quiebre de una emulsión: en primer lugar, se observan las partículas de asfalto en una solución acuosa. Luego por la carga eléctrica del árido las partículas de asfalto son atraídas por la partícula del árido, formando una capa alrededor del árido, iniciando el proceso de quiebre y finalmente la partícula del árido está completamente recubierta con asfalto, logrando una ruptura completa:

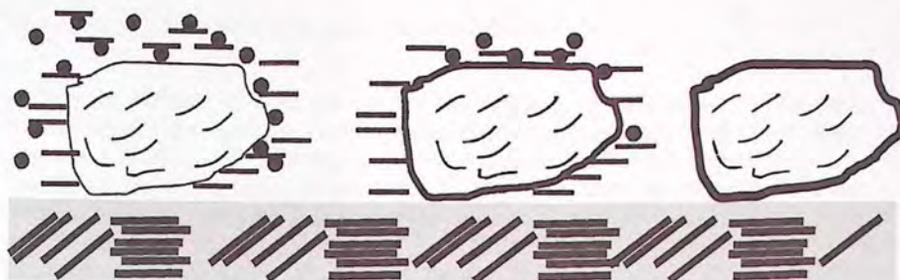


Figura 2.18 - Ruptura de una emulsión sobre una partícula de árido (Fuente: [31])

De acuerdo con la realidad nacional, los áridos en el país presentan en su mayoría carga aniónica. Por lo tanto, la emulsión utilizada en su mayoría corresponde a emulsiones catiónicas [32]. En la VI Región de nuestro país, la emulsión más utilizada en lechadas asfálticas corresponde a las del tipo CSS-1h, cuyos requerimientos se establecen en la tabla MC 8.301.5.A (Tabla 2.5).

Tabla 2.5 - Requerimientos para emulsiones asfálticas catiónicas, CSS-1h

Ensaye	Método	Especificación	
		Mínimo	Máximo
Viscosidad Saybolt Furol, 25 [°C], [SFs]	MC 8.302.12	20	100
Estabilidad en almacenamiento, 24 [hr], [%]	MC 8.302.5	-	1
Carga de partícula	MC 8.302.5	Positivo	
Tamizado [%]	MC 8.302.5	-	0,1
Mezcla con cemento [%]	MC 8.302.5	-	2
Residuo [%]	MC 8.302.5	57	-
Penetración a 25 [°C], 100 [gr], 5 [s], 0,1 [mm]	MC 8.302.3	40	90
Ductilidad a 25 [°C], 5 [cm/min], [cm]	MC 8.302.8	40	-
Solubilidad en tricloroetileno, [%]	MC 8.302.11	97,5	-
Heptano/Xílo, [%], Xílo	MC 8.302.7	-	25

Fuente: Adaptado de [33]

### 2.2.3 Agua

El agua cumple principalmente la labor de afectar la trabajabilidad de la emulsión asfáltica. Ejerce un papel de lubricante entre éstos y la emulsión, lo que permite una correcta dispersión y un fácil mezclado; a la vez que mejora la consistencia para una puesta en obra sin quiebre prematuro de la lechada ni segregación [3].

### **2.2.3.1 Características del agua en lechadas asfálticas**

En lechadas asfálticas, el agua procede de tres fuentes: humedad propia de los áridos, la correspondiente a la emulsión, y el agua que se adiciona como pre-humectación de los áridos. Un exceso de humedad favorecerá la segregación de la mezcla, dificultando su colocación en obra. El agua deberá estar desprovista de materia orgánica y deberá ser blanda, ya que un contenido elevado de iones  $\text{Ca}^{++}$ , y  $\text{Mg}^{++}$ , podría acelerar el quiebre de la emulsión, dificultando el mezclado. Respecto a la dosificación de agua, ésta dependerá de muchos factores, tales como la granulometría, naturaleza y absorción de los áridos, estado de pavimento, condiciones climatológicas ambientales, etcétera [3].

### **2.2.3.2 Requisitos del agua en lechadas asfálticas**

El agua debe ser potable con origen conocido y procedencia fija. Debe estar libre de sales nocivas y contaminantes. Cabe destacar que diseño de lechadas asfálticas está asociado al tipo agua utilizada, y en caso de ser cambiada, se debe preparar una nueva dosificación [4].

## **2.2.4 Filler**

El *filler* corresponde a un agregado mineral muy fino, que tiene como propiedades mejorar la dispersión de las partículas minerales del agregado pétreo, facilitando la trabajabilidad de la lechada, ayudando a producir una mezcla más densa, estable, con gran poder impermeabilizante y cohesivo [3]. Aunque su uso no es obligatorio, suele ser utilizado como un corrector de granulometría cuando un árido presenta una cantidad insuficiente de material fino, además de las propiedades mencionadas anteriormente.

### **2.2.4.1 Características del filler en lechadas asfálticas**

El *filler* tiene influencia en la adhesividad, velocidad de quiebre de la emulsión y características finales de la lechada. Su contenido se restringe, debido a que un exceso de *filler* hace que en el diseño de lechadas asfálticas requiera de un alto contenido de ligante o de lo contrario el mortero tendrá tendencia al agrietamiento, resultando frágil y quebradizo [3].

### **2.2.4.2 Requisitos del filler en lechadas asfálticas**

En caso de ser requerido, el *filler* debe estar constituido por polvo mineral fino, tales como cemento hidráulico, cal u otro material inerte de origen calizo, libre de materia orgánica y material arcilloso [4].

### 3 Materiales a utilizar

#### 3.1 Áridos

La siguiente sección tiene como objetivo determinar las propiedades de los áridos a utilizar en lechadas asfálticas, tales como la granulometría, densidad real seca, densidad superficialmente seca, densidad aparente suelta, densidad neta y la absorción de agua de los agregados pétreos y verificar si éstos cumplen con lo establecido según la Tabla MC 5.402.201. A para ser considerados aptos como áridos para lechadas asfálticas. La muestra de árido chancado se encuentra acopiado según se presenta en la Figura 3.1 y se procede a tomar una muestra representativa de la muestra por medio de un cuarteo (dividir una cantidad de árido para ser muestreado en cuatro partes, eligiendo dos fracciones adyacentes). La arena natural se extrajo directamente desde el río, y trasladado en bolsas, realizando el cuarteo de la muestra en el Laboratorio Regional de la VI Región. Ambas muestras son identificadas de acuerdo con las características de origen en dos bolsas separadas.



Figura 3.1 - Acopio del árido chancado utilizado

Para realizar una comparación coherente entre los resultados de los ensayos para los áridos, se establece como el árido de referencia la granulometría del árido chancado. Para el caso de la arena natural, al no presentar la misma granulometría del árido chancado, se determinan las propiedades de densidad y absorción de agua según la granulometría que presente la arena natural y se establece un procedimiento para estimar dichas propiedades como si la granulometría fuera en base al árido chancado de estudio. La metodología utilizada se encuentra en los anexos del presente Trabajo de Título. En el caso de los requerimientos de los áridos para lechadas asfálticas, se reproduce de forma manual la granulometría a modo establecer un parámetro comparación adecuado.

### 3.1.1 Granulometría

Con el fin de determinar la distribución de la masa de los distintos tamaños de las partículas de un agregado pétreo, se determina la granulometría del árido según lo estipulado en el numeral MC 8.202.3 y se compara con la banda granulométrica C-1 para lechadas asfálticas según la Tabla MC 5.406.201.B, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 3.1 - Granulometría del árido a utilizar

TAMICES		Peso retenido [gr]	Porcentaje retenido [%]	Porcentaje que pasa [%]	Limite Inferior C-1 [%]	Limite Superior C-1 [%]	Cumplimiento
[mm]	ASTM						
12,500	1/2"						
10,000	3/8"			100,0	100,0	100,0	Cumple
5,000	#4	802,0	10,0	90,0	70,0	90,0	Cumple
2,500	#8	2388,0	29,8	60,2	45,0	70,0	Cumple
1,250	#16	175,0	17,6	42,6	28,0	50,0	Cumple
0,630	#30	127,0	12,7	29,9	18,0	34,0	Cumple
0,315	#50	92,5	9,3	20,6	12,0	25,0	Cumple
0,160	#100	63,5	6,4	14,2	7,0	17,0	Cumple
0,080	#200	39,0	3,9	10,3	5,0	15,0	Cumple
R	< #200	2,0					

Granulometría árido chancado

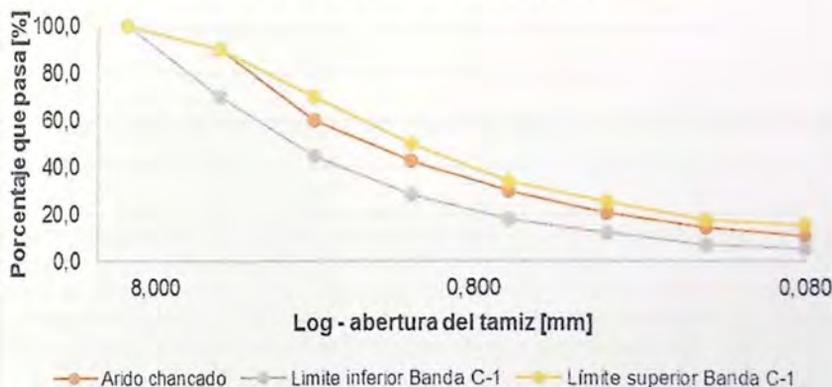


Figura 3.2 - Granulometría del árido a utilizar

- La granulometría de la muestra cumple con los requerimientos establecidos para una banda C-1 de acuerdo a la Tabla 3.1. Según lo observado en la Figura 3.2, la granulometría obtenida presenta un comportamiento cercano al límite superior de la banda, con un mayor porcentaje de fracción fina (material que pasa por la malla de 2,5 mm (#8) para áridos para asfalto [34]), puesto que un 38,8% del árido total corresponde a fracción gruesa y un 60,2% al árido fino.

### 3.1.2 Densidad y absorción de agua de los áridos

Junto con caracterizar la granulometría del árido chancado, se procede a determinar las densidades características del árido y la absorción de agua.

Tabla 3.2 - Densidades y absorción de agua de los áridos a utilizar

Propiedades	Árido Chancado	Arena Natural	Diferencia [%]
Densidad real del pétreo saturado superficialmente seco [kg/m <sup>3</sup> ]	2.627,00	2.712,70	3,26%
Densidad real pétreo e seco [kg/m <sup>3</sup> ]	2.608,90	2.691,40	3,16%
Densidad aparente suelta [kg/m <sup>3</sup> ]	1.647,40	1.708,60	3,71%
Densidad neta [kg/m <sup>3</sup> ]	2.658,60	2.748,50	3,38%
Absorción de agua [%]	0,70	0,70	0,00%

- La Tabla 3.2 presenta la densidad a distintas condiciones y absorción de agua de los áridos a utilizar. Se aprecia que en todos los casos, las densidades de la arena natural son mayores a las densidades del árido rodado. Por otra parte, la absorción de agua para ambos áridos es iguales prácticamente el mismo.
- La columna diferencia en la Tabla 3.2, determina el error relativo entre los áridos a utilizar. El error relativo máximo entre ambos áridos es de 3,71%, correspondiente a la densidad aparente suelta y se concluye que existe similitud entre los ríos Cachapoal y Tinguiririca con respecto a su densidad y absorción de agua.

### 3.1.3 Resultados de los ensayos de los requisitos de áridos para lechadas asfálticas

La siguiente sección tiene como objetivo establecer si los áridos utilizados para el presente Trabajo de Título son considerados aptos para ser utilizados como agregado pétreo en lechadas asfálticas. Desde el punto de vista teórico, se procura que los áridos en lechadas asfálticas no presenten material arcilloso ni exceso de finos, con una buena adherencia con la emulsión a utilizar y un alto índice de chancado de las partículas. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 3.3:

Tabla 3.3- Resultados de los ensayos especificados en la tabla MC 5.406.201.A.

Ensaye	Exigencia	Árido Chancado	Arena Natural	Cumplimiento
Equivalente de Arena	Mínimo 45%	67,0%	96,0%	Cumplen
Índice de Plasticidad	No Plástico	No Plástico	No Plástico	Cumplen
Adherencia Método Estático	Mínimo 95%	> 95%	> 95%	Cumplen
Adherencia Riedel-Weber	0-5	1-6	1-6	Cumplen
Índice de Trituración Total	Máximo 3,5%	2,40%	1,25%	Cumplen
Partículas Chancadas	Mínimo 90%	98,8%	7,4%	No cumple en Arena Natural

Cabe destacar que los resultados presentados en la Tabla 3.3 fueron realizados con respecto a la granulometría del árido chancado que cumple con los requisitos de banda C-1 para lechadas asfálticas de acuerdo a los alcances establecidos en el presente Trabajo de Título.

### 3.1.3.1 Equivalente de arena

De acuerdo con los resultados en el ensayo de Equivalente de arenas según la Ecuación 2.9, ambos tipos de árido cumplen con el requisito mínimo para ser utilizados en lechadas asfálticas. Se muestran las probetas obtenidas en laboratorio (Figura 3.3) para el árido chancado a la izquierda y la arena natural ubicada a la derecha de la imagen:



Figura 3.3 - Resultados de ensayo Equivalente de arena

En un árido, un mayor valor de equivalente de arena implica una menor cantidad de material fino floculante. Esto puede tener consecuencias en la granulometría requerida, lo cual se puede corregir adicionando *filler* debido a su contenido alto de material fino. De acuerdo con la metodología de este trabajo, la reproducción de un árido dentro de una banda especificada no supone un inconveniente.

### 3.1.3.2 Índice de plasticidad

Ambos áridos son clasificados como no plásticos de acuerdo al ensayo de índice de plasticidad. Los áridos, al ser de origen fluvial y no presentar material arcilloso, no fue posible determinar el límite plástico para ambos materiales debido a que no fue posible la formación de bastones. De acuerdo con el numeral MC 8.102.4, al no poder determinar algún límite (en este caso, el límite plástico), se confirman las propiedades no plásticas del material.

En Mecánica de suelos, en un material que presenta poca o nula plasticidad, el límite líquido es igual o incluso menor a su límite plástico, generando un índice de plasticidad nulo o negativo, por lo que sus resultados no son de interés y sus límites carecen de sentido físico [35]. Al no obtener un resultado para determinar el límite plástico, no se realiza el ensayo para encontrar el límite líquido para ambos materiales.

### 3.1.3.3 Adherencia método estático

Los resultados del ensayo de adherencia por método estático arrojaron que visualmente el árido chancado y la arena natural cumplen con las especificaciones técnicas según la tabla MC 5.406.201.A. Se presenta en la Figura 3.4, la imagen de ambos tipos de muestras:



Figura 3.4 - Resultados de ensayo, Adherencia método estático

De la Figura 3.4, la muestra ubicada a la izquierda corresponde al árido chancado, mientras que la muestra a la derecha corresponde a la arena natural. Observando ambas muestras, toda la superficie de las partículas está totalmente cubierta de emulsión asfáltica y se concluye la compatibilidad entre ambos áridos y el tipo de emulsión utilizada.

### **3.1.3.4 Adherencia Riedel-Weber**

Los resultados del ensaye Riedel – Weber para para ambos tipos de árido cumplen con los requerimientos especificados en la tabla 5.406.201.A. Se observa que el grado de adherencia entre los materiales a utilizar arrojaron como resultado los mismos valores, de acuerdo con la Tabla 3.3.

A pesar de que la metodología del ensaye no representa las condiciones reales en terreno, principalmente por el rango de granulometría, la rigurosidad de su procedimiento (agua calentada para aumentar el escurrimiento del asfalto, sumado a la incorporación de carbonato de calcio para someter la muestra a condiciones más agresivas, implicando una pérdida de adhesividad), ofrece un buen margen de seguridad al momento de utilizar los materiales en terreno [36]. Se concluye a partir de los resultados del presente Trabajo de Título que el grado de adherencia depende del tipo de emulsión utilizada y del origen de los áridos más que en la forma de las partículas, por lo que se recomienda realizar una investigación respecto a este tema.

### **3.1.3.5 Índice de trituración**

Los resultados para ambos áridos con respecto al ensaye de trituración son menores al porcentaje máximo de trituración. Cabe destacar, que para la fracción gruesa de los áridos (en lechadas asfálticas (retenido en el tamiz#4), debe verificarse por el ensayo de Desgaste de los Ángeles según lo estipulado en el numeral MC 8.202.11. Sin embargo, para el rango de granulometría de la banda C-1 del árido bajo este ensaye requiere  $5.000 \pm 10$  gr de árido retenido en la malla de 2,5 mm. De acuerdo a la granulometría presentada en la Tabla 3.1 se requiere una cantidad excesiva de material para poder realizar este ensayo (se requieren tamizar 50 kg de material sólo para realizar este ensaye de acuerdo a los resultados obtenidos), se puede considerar el grado de ensaye inmediatamente menor al grado elegido y por lo tanto, dicho grado serían los estipulados en el ensaye para determinar el índice de trituración [29]. También se toma en consideración que no fue necesario determinar el índice de trituración para los grados 10 y 5, ya que los resultados obtenidos para los grados 2,5 y 1,25 mm no se observaron valores que difieren mucho entre sí [28].

### **3.1.3.6 Partículas chancadas**

A partir de la información proporcionada en la Tabla 3.3, el porcentaje de partículas chancadas en la arena natural de acuerdo con el numeral MC 8.202.6 no cumple con el porcentaje mínimo según la tabla MC 5.406.201.A. Sin embargo, como se pretende estudiar el comportamiento de la forma del árido en lechadas asfálticas, no se descarta su uso.

Al cumplir con los requisitos para lechadas asfálticas tanto para el árido chancado como para la arena natural de forma independiente, se concluye que cualquier mezcla de ambos áridos cumple con las especificaciones estipuladas por el Manual de Carreteras, por lo que no se contempla realizar ensayos adicionales.

## 3.2 Emulsión asfáltica

La presente sección describe el comportamiento de la emulsión asfáltica utilizada en el presente trabajo con los ensayos según los requerimientos establecidos en la tabla MC 8.301.5.A. El asfalto corresponde a una emulsión asfáltica CSS-1h, cuyas propiedades se presentan en la Tabla 3.4:

Tabla 3.4 - Propiedades emulsión asfáltica CSS-1h utilizado para el diseño de lechadas asfálticas

Ensaye	Método	Especificación		Resultado	Cumplimiento
		Mínimo	Máximo		
Viscosidad Saybolt Furol, 25 [°C], [SFs]	MC 8.302.12	20	100	38	Cumple
Estabilidad en almacenamiento, 24 [hr], [%]	MC 8.302.5	-	1	0,4	Cumple
Carga de partícula	MC 8.302.5	Positivo		Positivo	Cumple
Tamizado [%]	MC 8.302.5	-	0,1	0,05	Cumple
Mezcla con cemento [%]	MC 8.302.5	-	2	0,8	Cumple
Residuo [%]	MC 8.302.5	57	-	60	Cumple
Penetración a 25 [°C], 100 [gr], 5 [s], 0,1 [mm]	MC 8.302.3	40	90	75	Cumple
Ductilidad a 25 [°C], 5 [cm/min], [cm]	MC 8.302.8	40	-	>50	Cumple
Solubilidad en tricloroetileno, [%]	MC 8.302.11	97,5	-	99	Cumple
Heptano/Xilol, [%], Xilol	MC 8.302.7	-	25	22	Cumple

- Los resultados presentados en la Tabla 3.4 indican que la emulsión asfáltica cumple con las especificaciones técnicas señaladas en la Tabla MC 8.301.5.A.
- Los resultados fueron entregados a través de un certificado facilitado por el Laboratorio Regional de Vialidad de la VI Región, por lo que no se requirió realizar ensayos. Dicho informe se presenta en el anexo de las Propiedades de la emulsión utilizada del presente trabajo.

## 3.3 Agua

El agua seleccionada corresponde a agua potable, libre de materia orgánica, sales nocivas, contaminantes y cumple con lo establecido en el numeral MC 5.406.201(4).

## 3.4 Filler

En caso de requerir *filler* para corregir la muestra, se considera utilizar cal hidráulica en cumplimiento con las especificaciones indicadas en la tabla MC 5.408.201.C.

## 4 Desarrollo experimental para determinar el contenido óptimo de emulsión

El presente capítulo tiene como objetivo, presentar, analizar y evidenciar el comportamiento tanto de la mezcla como de las probetas de lechadas asfálticas a partir de los ensayos experimentales, tanto de consistencia, desgaste y exudación, mientras se incrementa el contenido de arena natural de cantos redondeados, tomando como punto de referencia el contenido de emulsión teórico que sirve como partida para establecer el contenido óptimo de asfalto experimental.

Antes de determinar la consistencia de una mezcla, con el objetivo de dosificar el agua de premezclado para todos los ensayos que se mencionan en el presente capítulo, deben ser calculados el contenido de asfalto teórico como el porcentaje de agua de premezclado, para cada uno de los porcentajes ensayados de arena natural en este trabajo, para ello se debe tomar en cuenta la superficie específica del agregado, como ciertas propiedades de la emulsión utilizada.

### 4.1 Cálculo del contenido de emulsión teórico

Antes de diseñar una lechada asfáltica, se deben determinar dos parámetros relevantes. Primero, la superficie específica, que se calcula a partir de la granulometría del árido empleado (Ecuación 2.1). De acuerdo a los alcances de este trabajo, como todas las muestras presentan la misma granulometría, dicho valor es igual para todos los porcentajes utilizados.

$$\text{Superficie específica} = 16,77 \left[ \frac{m^2}{kg} \right]$$

Segundo, el contenido de emulsión teórico, reemplazando la superficie específica y el residuo asfáltico (Tabla 3.4), el contenido de emulsión teórico queda definido como lo indica la Ecuación 2.2. Al igual que para la superficie específica, este valor es único para todos los porcentajes de arena utilizados, debido a que se utilizó la misma emulsión en todos los casos.

$$Et = 12,2 \% \approx 12\%$$

- En términos teóricos, la superficie específica es un cociente entre la superficie externa de un agregado y su densidad real seca, expresado en  $m^2/kg$  [37]. El Manual de Carreteras establece un método para determinar la superficie específica según lo estipulado en el numeral MC 8.202.13, el que establece los fundamentos para determinar este coeficiente (Ecuación 2.1). Como fue mencionado anteriormente, la superficie específica depende exclusivamente de la granulometría del árido a utilizar. El punto 4 del numeral MC 8.202.13, que supone partículas esféricas, para el caso de agregados pétreos de distinto tamaño la superficie específica se determina como una fracción de agregado entre dos mallas sucesivas, calculándose como un diámetro equivalente a la media geométrica de los tamaños extremos dividido por la densidad real seca del material [37]. Ante ello, al no considerar la densidad real seca en la determinación

de la superficie específica en el diseño de lechadas asfálticas, genera una discrepancia entre los valores calculados con los valores reales. Se sugiere realizar una investigación con respecto a este punto para determinar de forma más verídica la superficie específica en función del contenido de arena natural de canto redondeado.

- De acuerdo al contenido de emulsión teórico (Ecuación 2.2), éste depende de la superficie específica y el residuo asfáltico de la emulsión utilizada. La mayoría de las emulsiones asfálticas varía entre el 30 – 70% de residuo [38], mientras que la superficie específica varía según la granulometría especificada en los límites establecidos para la banda C-1 la que será utilizada, llegando a la conclusión de que el rango de superficie específica fluctúa entre 9,02 – 18,06 [m<sup>2</sup>/kg].

Se puede establecer en base a los antecedentes mencionados, un rango de valores de contenido de emulsión teórico presentados a continuación (Figura 4.1):

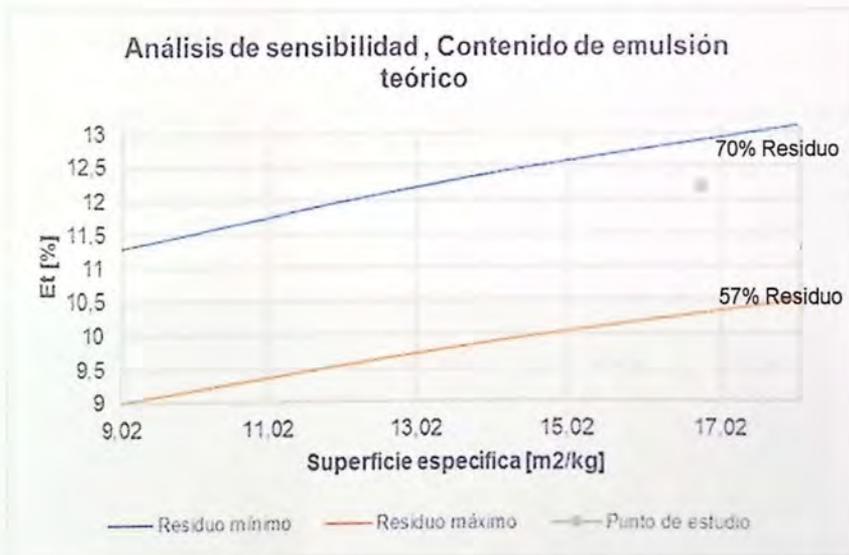


Figura 4.1 - Gráfico de análisis de sensibilidad, contenido de emulsión teórico

- De acuerdo con los resultados del análisis de sensibilidad del contenido de emulsión teórico (Figura 4.1), el rango de éste varía entre aproximadamente 9 – 13% del peso del agregado.
- El límite de residuo mínimo se determinó como el porcentaje mínimo de residuo admisible para lechadas asfálticas, el cual es de un 57%.
- Del gráfico presentado, a un contenido de residuo asfáltico constante, a medida que se incrementa la superficie específica, aumenta el contenido de asfalto teórico. Esto se debe al incremento del área de contacto a ser cubierta por asfalto a un mayor porcentaje de partículas de menor tamaño.

- A mayor contenido de residuo asfáltico, suponiendo una superficie específica constante, menor contenido de asfalto teórico. Las razones de este fenómeno se deben principalmente a la cantidad de asfalto disponible por unidad de volumen para lograr un recubrimiento de las partículas. Se concluye que la calidad de una emulsión tiene relación directa con la cantidad necesaria para lograr una buena mezcla de lechada asfáltica.
- En el punto de estudio presentado en la Figura 4.1, se aprecia que la influencia de la granulometría, al presentar un mayor porcentaje de partículas finas (que pasa por el tamiz # 8), y el contenido de emulsión utilizados, da como resultado un contenido de emulsión teórico cercano a los valores máximos admisibles para lechada asfáltica.
- Al usar la misma granulometría y utilizar la misma emulsión asfáltica para todos los grupos de muestra a estudiar, los resultados obtenidos serán los mismos para todos los casos.

## 4.2 Consistencia de la lechada asfáltica

La siguiente sección tiene como objetivo determinar la consistencia de las lechadas asfálticas para los distintos porcentajes de arena natural según lo estipulado en el numeral MC 8.302.45. De acuerdo con la Figura 4.2, se observa una mezcla de lechada asfáltica sobre una superficie circular graduada dentro del cono de consistencia, para luego desprender el cono, determinando el desplazamiento promedio de ésta:

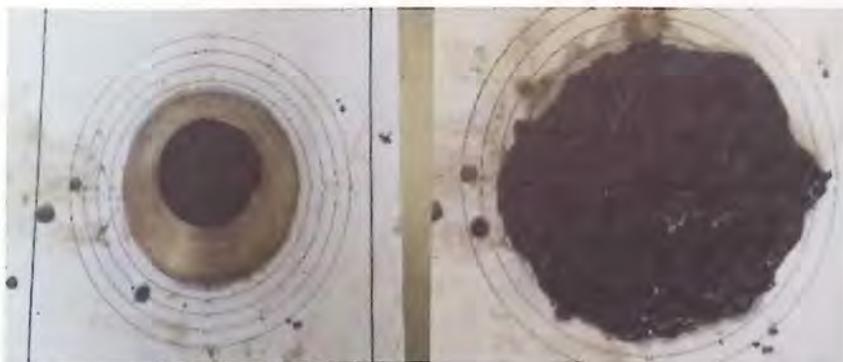


Figura 4.2 - Ensayo de consistencia y desplazamiento de lechada asfáltica

Una de las consideraciones adicionales para el diseño de lechadas asfálticas de acuerdo al punto 4.3 del numeral MC 8.302.45, corresponde al tiempo de mezclado para medir la trabajabilidad según el procedimiento ISSA TB 113.

Este procedimiento consiste en agregar 100 – 400 gr de agregado pétreo basado en el peso seco del agregado en un recipiente mezclador, para luego agregar agua y filler en caso de ser necesario, y se revuelve a 60 – 70 RPM en aproximadamente veinte segundos. Se debe agregar emulsión según el contenido de asfalto teórico y se agita treinta segundos a 60 – 70 RPM. Se separa la mitad de la mezcla de lechada asfáltica en una superficie de aluminio y se continúa batiendo la mezcla de

la misma forma hasta un máximo de cinco minutos o hasta que la mezcla "quiebre", lo que ocurra primero, registrando el tiempo [39].

El tiempo de homogeneización de la mezcla no debe ser superior a tres minutos [15], por lo tanto, para cuadrar ambas metodologías de ambas normas, se estableció un límite máximo de mezclado en tres minutos. Si no se produce un quiebre en la mezcla (que en términos prácticos se traduce en una dificultad para agitar la muestra), se estipula un tiempo ">3", como se observa en la Tabla 4.1. Se presentan los resultados del porcentaje óptimo de agua requerida para lograr un desplazamiento óptimo entre 2 – 3 cm:

Tabla 4.1 – Porcentaje de agua de premezclado a distintos porcentajes de arena natural y tiempo de mezclado según cada caso

Porcentaje An [%]	Porcentaje Ac [%]	Agua premezclado [%]	Desplazamiento promedio [cm]	Tiempo de mezclado [min]
0	100	10,7	2,1	>3
20	80	10,6	2,0	>3
40	60	10,4	2,0	>3
60	40	10,3	2,0	>3
80	20	10,3	2,0	>3
100	0	10,3	2,1	>3

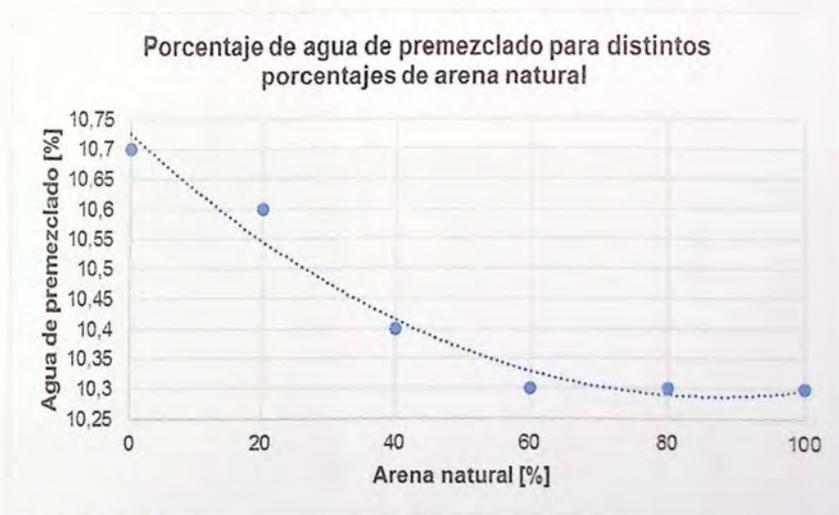


Figura 4.3 - Gráfico del porcentaje de agua de premezclado a distintos porcentajes de arena natural

- La Figura 4.3 representa el contenido de agua de premezclado necesario para lograr una mezcla que se desplace 2 – 3 cm sobre la base de escala de círculos. Se observa una relación decreciente no lineal entre el porcentaje de agua de premezclado en la mezcla a mayor porcentaje de arena natural. Dicho fenómeno es atribuible a la forma de las partículas del árido, puesto que, al existir una menor fricción y una menor cantidad de puntos de contacto entre las partículas, se observa un mayor desplazamiento de la mezcla con un menor requerimiento de agua de premezclado.
- De los resultados obtenidos en el presente trabajo, se observó que el tiempo de mezclado antes de producirse un quiebre en la mezcla no depende del contenido de arena natural. Al presentar un comportamiento de mezclado homogéneo en todos los grupos de muestra, se concluye que la trabajabilidad de la mezcla de lechada asfáltica con árido chancado y la arena natural desde el punto de vista de su carga eléctrica es equivalente, debido al de origen de los áridos.
- Un aumento de agua en la mezcla tiene una implicancia directa en la trabajabilidad, ya que retarda el tiempo para que se produzca el quiebre de la emulsión, pero tiene consecuencias en la consistencia de la mezcla, aumentando el desplazamiento promedio de la lechada asfáltica.

### 4.3 Ensayo de abrasión en medio húmedo

Esta sección tiene como objetivo presentar el comportamiento de la abrasión a distintos porcentajes de arena natural, como se muestra en la Tabla 4.2. Como un primer paso para determinar el contenido óptimo de asfalto,

Tabla 4.2 - Abrasión en medio húmedo a distintos porcentajes de arena natural

Asfalto [%]	Abrasión en Medio Húmedo [gr/m <sup>2</sup> ]					
	0% An	20% An	40% An	60% An	80% An	100% An
10%	570	639	756	849	837	616
12%	349	419	419	442	535	372
14%	279	349	326	291	395	279

### Abrasión en Medio Húmedo para distintos porcentajes de arena natural

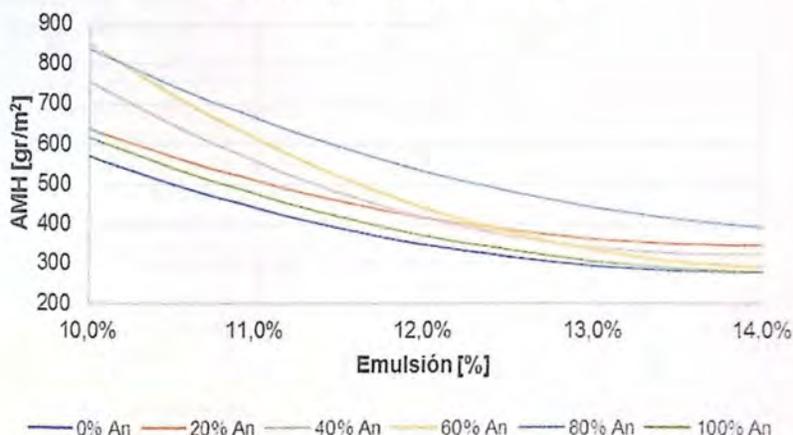


Figura 4.4 - Abrasión en medio húmedo a distintos porcentajes de arena natural

#### Análisis de resultados

- La Figura 4.4 es una interpolación del tipo polinómica de segundo grado de los datos presentados en la Tabla 4.2. Dicha interpolación describe el comportamiento característico de la abrasión en lechadas asfálticas, observando en todos los casos una menor abrasión a mayor porcentaje de asfalto. Una menor abrasión implica una mayor resistencia al desgaste de la lechada asfáltica.
- El proceso de confección de muestras puede ser analizado según dos variables. Desde el punto de vista del contenido de arena natural, el proceso de revoltura resulta más fluido a mayor contenido de ésta, puesto que como existe un menor roce debido al canto de las partículas. En ningún caso se observa el "quebre del asfalto" durante el tiempo de mezclado. Sin embargo, se evidencia una mezcla menos consistente a mayor contenido de asfalto.
- De acuerdo con los datos entregados en el presente Trabajo de Título, se observa una relación creciente entre la abrasión y el contenido de arena natural, a excepción del caso 100% del agregado rodado. Las razones que explican este fenómeno presentado dependen principalmente del árido y el asfalto utilizado.

Al incrementar el porcentaje de emulsión, se dispone de una mayor cantidad de asfalto disponible para recubrir las partículas del árido, logrando una mayor adherencia y por consiguiente una menor abrasión. A pesar de que los resultados presentados no dependen de esta variable debido a las consideraciones adoptadas en los alcances de este trabajo, se propone estudiar la relación entre el tipo de emulsión y la abrasión en lechadas asfálticas.

Como en el presente trabajo no se puede atribuir los resultados a la emulsión asfáltica, el contenido de arena natural cobra total importancia. Lo observado puede ser explicado por la

fricción interna entre las partículas de los áridos utilizados en lechadas asfálticas desde el punto de vista macroscópico, conocido como *interlocking* [40], y se infiere que una partícula de arena natural presenta una superficie macroscópica más lisa comparado a una partícula de similares características producto del chancado, generando una menor trabazón, facilitando el desplazamiento de las partículas.

Otra explicación a este fenómeno puede ser explicado desde el punto de vista de la fricción de un pavimento. Al realizar los ensayos en condiciones desfavorables, estudios afirman que la adherencia se incrementa con la microtextura, proporcionando una mayor superficie de contacto de asfalto con la superficie de la partícula mientras presente mayores asperezas [41]. Desde esta perspectiva, la forma del árido tiene directa relación con la adherencia entre el asfalto y el árido, ocasionando una menor cohesión en la mezcla de lechada asfáltica a mayor contenido de áridos con canto redondeado.

En conclusión, el asfalto ofrece un grado de adherencia a la mezcla sumado a la fricción interna del material, lo que determina la cohesión de la mezcla, la cual se disminuye con la forma redondeada del árido.

- Lo mencionado anteriormente, se representa de mejor manera comparando probetas con igual porcentaje de asfalto (Figura 4.5):

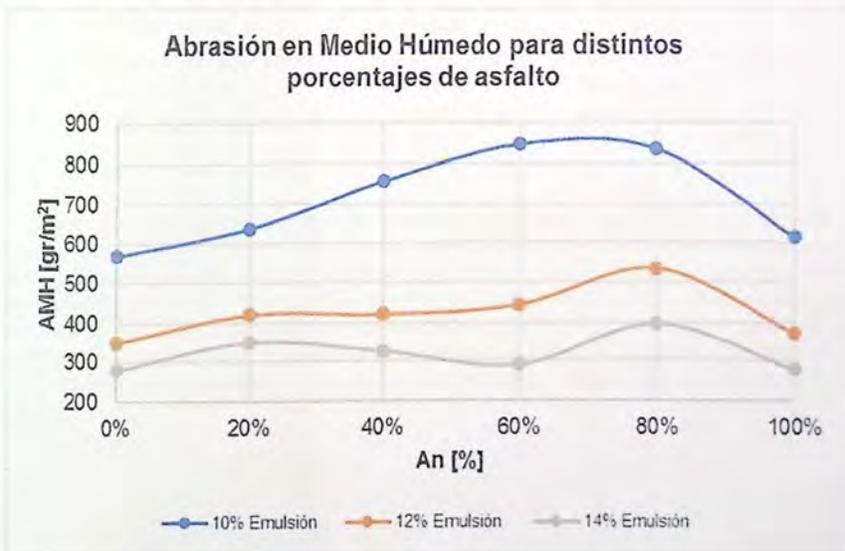


Figura 4.5 - Abrasión en medio húmedo a distintos porcentajes de asfalto

La Figura 4.5 es la representación de la abrasión total según el contenido de arena natural en probetas con el mismo porcentaje de emulsión. Se observa una disminución de la abrasión a mayor contenido de asfalto independiente del contenido de arena natural en las muestras, lo cual es acorde a los estudios existentes para determinar la abrasión. Al observar una curva de presentando un contenido de asfalto constante, existe una tendencia creciente en la abrasión hasta un 80% de arena natural. Para el caso del grupo de muestras de 100% de arena natural,

se evidencia una reducción de la abrasión. Descartando estos datos por considerarse fuera de tendencia, la Figura 4.6 presenta la interpolación de los datos para estudiar su comportamiento:

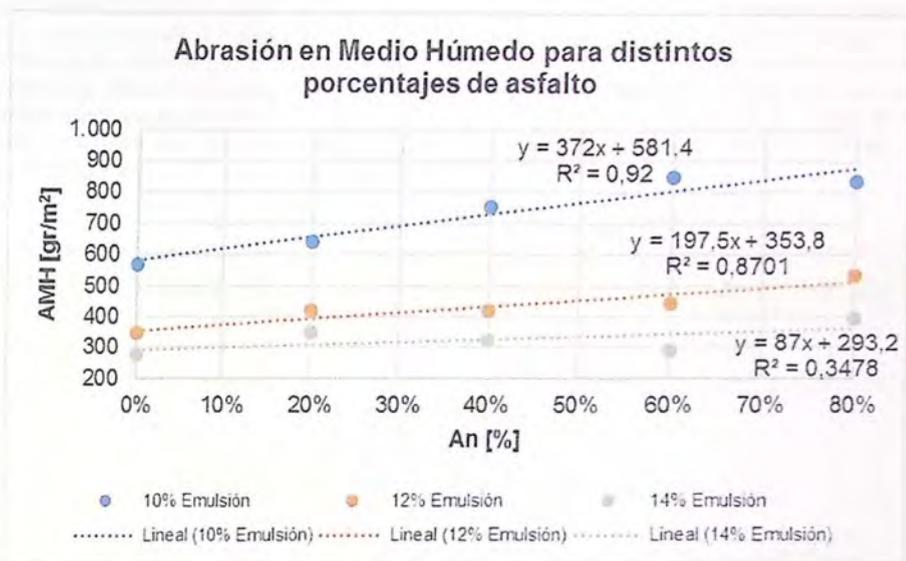


Figura 4.6 - Interpolación de datos en ensayo de abrasión en medio húmedo

La Figura 4.6 presenta una interpolación de carácter lineal para estimar comportamiento de la abrasión ante el incremento de arena natural, presentando su relación  $R^2$  entre sus datos y su función. Se decide realizar una interpolación de carácter lineal para analizar la pendiente de las rectas resultantes. En las tres rectas, evidencia una mayor abrasión debido a la forma del árido, confirmando la influencia de la forma del agregado en la cohesión de la mezcla. Al comparar las pendientes de dichas rectas, éstas disminuyen a mayor contenido de emulsión, y se concluye la influencia del residuo asfáltico en la abrasión en lechadas asfálticas de acuerdo a la teoría vigente.

## 4.4 Ensaye de rueda de carga

Esta sección pretende describir los resultados la exudación de acuerdo con el ensaye de rueda de carga según estipula el numeral MC 8.302.53. De acuerdo con la metodología de trabajo en la realización de este ensaye, el parámetro para medir la exudación de una lechada se expresa en la cantidad de arena silíceo calentada y adherida por una unidad de área [gr/m<sup>2</sup>], y se expresará esta unidad como exudación con el fin de evitar confusiones entre la adherencia de arena con la adherencia entre el árido y la emulsión utilizados para la confección de lechadas asfálticas. Los resultados del ensaye de rueda de carga se muestran en la Tabla 4.3:

Tabla 4.3 – Exudación a distintos porcentajes de arena natural

Asfalto [%]	Exudación según porcentaje de arena natural [gr/m <sup>2</sup> ]					
	0% An	20% An	40% An	60% An	80% An	100% An
10%	258	295	295	332	406	Falla (490)
12%	332	369	369	369	443	Falla (512)
14%	406	517	554	554	517	Falla (594)

Exudación a distintos porcentajes de Arena Natural

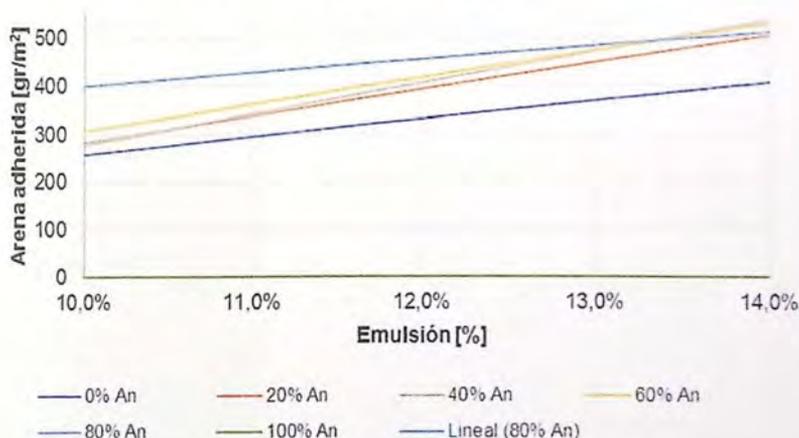


Figura 4.7–Exudación a distintos porcentajes de arena natural

- La Figura 4.7 corresponde a una representación de interpolación lineal de los datos entregados en la Tabla 4.3, lo que representa el comportamiento lineal característico del aumento de la exudación a mayor contenido de asfalto, con excepción del caso con 100% de arena natural.

- El proceso de confección de las muestras es similar a lo mencionado en el ensayo de abrasión en medio húmedo, debido a que usan la misma metodología de preparación y confección de muestra. Sin embargo, al requerir una cantidad menor de material para confeccionar probetas por este método, se observa una mayor facilidad en el proceso de mezclado.
- De acuerdo con la metodología de este ensayo, las muestras compuestas 100% por arena natural cedieron al número de ciclos especificados entre paréntesis en la Tabla 4.3. Se observa una relación directa entre el número de ciclos y el contenido de asfalto en las muestras de lechada asfáltica. Esto se puede atribuir al asfalto disponible para exudar antes de producirse algún tipo de falla.
- Realizando la comparación entre las distintas rectas de la Figura 4.7, se aprecia una relación positiva entre la exudación de la emulsión con el porcentaje de arena natural presente en las muestras de lechada asfáltica.
- Al comparar las muestras que presentan el mismo contenido de asfalto, se presentan los siguientes resultados (Figura 4.8):

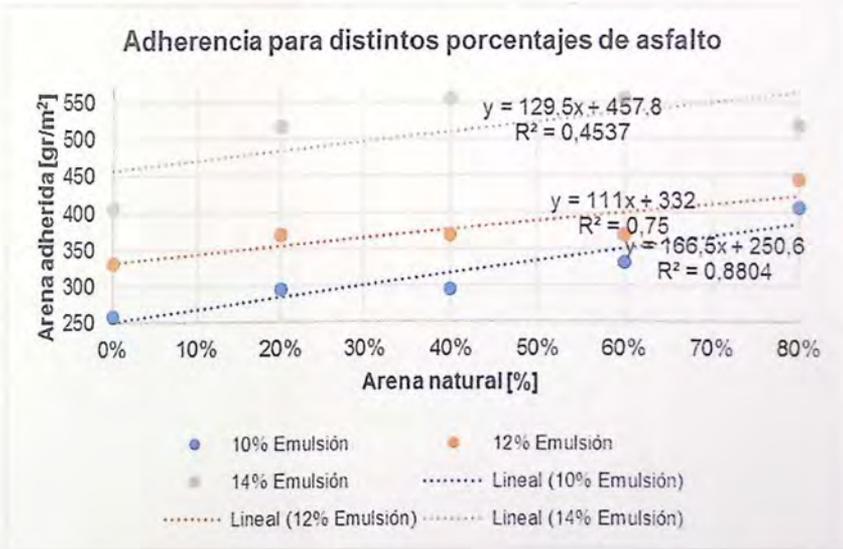


Figura 4.8 - Interpolación de datos en ensayo de rueda de carga

La Figura 4.8 es una representación de la exudación a diferentes porcentajes de arena natural, separado en muestras que presentan el mismo porcentaje de emulsión. El eje de la abscisa presenta como límite desde 0% hasta un 80%, debido a que las probetas a un porcentaje mayor de arena natural sufrieron fallas en la ejecución del ensayo. Esto confirma los límites establecidos en la Figura 4.6, puesto que no sólo se consideran datos alejados de tendencia, sino que las muestras que presentan un 100% se descartan por los resultados de este ensayo.

A partir de los resultados obtenidos, existe una relación entre el contenido de arena natural y la exudación en lechadas asfálticas, concluyendo que la forma del árido afecta de forma negativa en la mezcla de lechadas asfálticas debido a la superficie específica de las partículas. Al existir una menor superficie de contacto dispuesta a ser recubierta con emulsión, existe una mayor de ésta en la mezcla de forma dispersa.

- Analizando las pendientes de las tres rectas generadas de acuerdo a la Figura 4.8, éstas no presentan una tendencia creciente a mayor contenido de asfalto. Por lo tanto, no se puede inferir que un mayor contenido de arena natural genere una mayor tasa de aumento de la exudación.

## 5 Resultados de diseño de lechadas asfálticas

El presente capítulo tiene como objetivo determinar el contenido óptimo de emulsión de acuerdo con los criterios de diseño establecidos en el numeral MC 5.406.202, y adoptar un criterio de aceptación de muestras a partir de las probetas ensayadas, separándolas según el contenido máximo de arena natural (hasta 20% y sobre 20% de arena natural) de acuerdo con el numeral MC 5.406.201(2). Junto con determinar el contenido óptimo de emulsión de acuerdo con los criterios de límites de diseño e intersección de curvas indicados en la sección 2.1.5.5 de este trabajo, se pretende realizar una comparación entre los resultados obtenidos y así concluir acerca de la influencia de la forma del árido en el diseño de lechadas asfálticas desde el punto de vista de la abrasión y exudación resultantes de acuerdo con los gráficos obtenidos en la sección 4.3 y 4.4. **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** del presente Trabajo de Título.

Como análisis adicional, se plantea una prueba de hipótesis para determinar desde el punto de vista estadístico, la influencia de la forma del árido en la dosificación, en términos porcentuales, de la emulsión en el diseño de lechadas asfálticas, ya que las muestras contienen la misma emulsión y presentan la misma consistencia especificada. Se asume que el contenido óptimo de emulsión calculado de acuerdo a los resultados obtenidos en laboratorio presenta una distribución normal y se realiza la prueba de hipótesis en base a una distribución *t-student* por ser recomendado en tamaños de muestra pequeños que se distribuyen de la forma antes mencionada y porque los datos obtenidos impiden formular inferencias con respecto a la desviación estándar de la población  $\mu$  y es posible determinar una distribución de muestreo con un media y una varianza poblacional desconocidos a través de esta manera [42]. El procedimiento para realizar esta prueba de hipótesis consiste en determinar un estadístico de prueba asociado a una hipótesis nula que se determina de la siguiente manera (Ecuación 5.1):

$$t_{prueba} = \frac{\bar{x} - \sigma}{\frac{s}{\sqrt{n}}} \quad (\text{Ecuación 5.1})$$

Donde:

- $t_{prueba}$ : estadístico de prueba para determinar la hipótesis nula
- $\bar{x}$ : promedio de las variables de estudio
- $\sigma$ : media de las muestras supuesto
- $s$ : desviación estándar de las muestras
- $n$ : número de muestras, también llamado grados de libertad

El estadístico de prueba  $t_{prueba}$  se contrasta con una distribución *t-student* tabulada para  $n-1$  grados de libertad con un nivel de significancia  $\alpha$  de un 5% que establece un margen de tolerancia. Si el estadístico de prueba  $t_{prueba}$  se encuentra en la región de rechazo como se presenta en la Figura 5.1, se rechaza la hipótesis nula y se acepta una hipótesis alternativa, la cual niega la hipótesis nula.

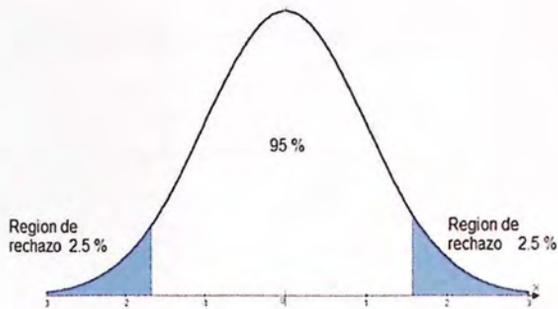


Figura 5.1 - Región de aceptación y rechazo para una distribución t-student con un 5% de significancia  
(Fuente: Google Images)

## 5.1 Determinación del contenido óptimo de emulsión para lechadas asfálticas

De acuerdo a los criterios establecidos en el numeral MC 8.302.52, la Tabla 5.1 detalla el contenido óptimo de asfalto para los porcentajes de arena natural utilizados, separados por el criterio de límites de diseño (C1) y el criterio de intersección de curvas (C2):

$$E_{opt} = \frac{E_{min} + E_{m\acute{a}x}}{2} \quad \text{(Ecuación 2.5)}$$

Tabla 5.1 - Contenido óptimo de asfalto según ambos criterios de diseño

An [%]	1° Criterio			2° Criterio
	Límite mínimo [%]	Límite máximo [%]	Contenido óptimo de asfalto [%]	Intersección curvas [gr/m <sup>2</sup> ]
0%	10,21%	17,62%	13,91%	12,16%
20%	10,74%	14,64%	12,69%	12,20%
40%	11,10%	14,07%	12,59%	12,08%
60%	11,38%	14,19%	12,79%	12,12%
80%	11,96%	15,05%	13,50%	12,64%
100%	-	-	-	-

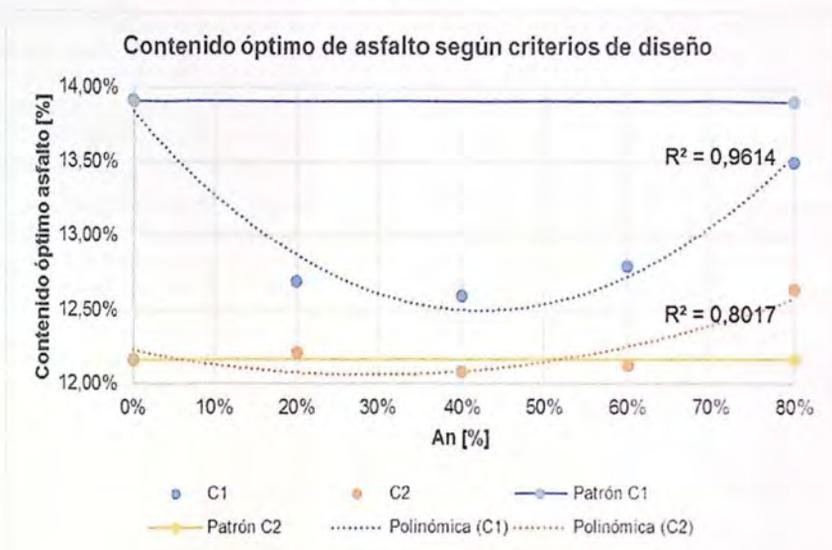


Figura 5.2 - Contenido óptimo de asfalto según ambos criterios de diseño

- La Figura 5.2 muestra el contenido óptimo de emulsión a distintos porcentajes de arena natural. Según los resultados obtenidos, el contenido óptimo de emulsión es mayor bajo el criterio de límites de diseño (C1) comparado con el criterio de intersección de curvas (C2), para todos los porcentajes de arena natural utilizados.

Bajo el primer criterio de diseño (Figura 5.2), se observa un comportamiento parabólico según la interpolación propuesta, el cual se observa una relación decreciente hasta aproximadamente un 40% de arena natural. Pasado este porcentaje, el contenido óptimo de emulsión vuelve a aumentar.

Bajo el segundo criterio de diseño, el comportamiento puede ser interpolado de forma parabólica con un porcentaje estable entre los datos, a excepción del diseño con un 80% de arena natural.

Los resultados del contenido óptimo de emulsión se someten a una prueba de hipótesis. Para esto, se establece la hipótesis nula ( $H_0$ ) y una hipótesis alternativa ( $H_1$ ):

- $H_0$ : El contenido óptimo de emulsión no depende de la forma del árido en el diseño de lechadas asfálticas.
- $H_1$ : El contenido óptimo de emulsión sí depende de la forma del árido en el diseño de lechadas asfálticas.

El objetivo de realizar esta prueba es en determinar si **la dosificación de emulsión es una variable independiente en el estudio del contenido de arena natural en lechadas asfálticas**. En caso de ser positiva la hipótesis nula, se concluye que todas las observaciones en las probetas ensayadas se deben exclusivamente a la forma del árido. En caso de rechazar este supuesto, se concluye que la emulsión asfáltica es una variable dependiente del contenido de arena natural, la cual agrega otras variables de estudio al desarrollo de este trabajo.

De acuerdo con los alcances y la metodología de este trabajo, al considerar constantes todas las variables de diseño a excepción del contenido natural en el árido, estudiar la hipótesis alternativa significa interpretar los resultados de acuerdo al contenido de emulsión y el contenido de arena natural, que se aleja de los alcances del presente trabajo.

Para presentar esta hipótesis en forma gráfica, las rectas "patrón C1" y "patrón C2" en la Figura 5.2 corresponden a una proyección de los resultados de diseño del árido 100% chancado patrón, que representa la hipótesis nula. Los resultados de la prueba de hipótesis se presentan en la Tabla 5.2:

$$t_{prueba} = \frac{\bar{x} - \sigma}{\frac{s}{\sqrt{n}}} \quad (\text{Ecuación 5.1})$$

Tabla 5.2 - Prueba de hipótesis para ambos criterios de diseño

Variable	1° Criterio	2° Criterio
$\bar{x}$	13,10%	12,24%
$s$	0,0058	0,0023
$\sigma$	13,91%	12,16%
$\alpha$	0,05	0,05
$n$	5	5
$t_{tabla}$	$\pm 2,7764$	$\pm 2,7764$
$t_{prueba}$	<b>-3,1429</b>	<b>0,7969</b>
Cumplimiento	<b>Rechazo</b>	<b>Aceptación</b>

Al presentar el mismo número de grados de libertad para ambos criterios de diseño, la región de rechazo se determina como cualquier valor de  $t_{tabla}$  menor a  $-2,7764$  y mayor a  $2,7764$  de acuerdo a la Tabla 5.2 y se compara con el valor de  $t_{prueba}$ . Bajo el primer criterio para determinar el contenido óptimo de asfalto, al ser  $t_{prueba}$  menor al valor límite inferior de la zona de rechazo, se descarta la hipótesis nula y se concluye que la forma del árido sí influye en la dosificación de emulsión asfáltica para el diseño de lechadas asfálticas bajo el criterio de límites de diseño. Por otro lado, bajo el segundo criterio de intersección de curvas, el estadístico  $t_{prueba}$  se encuentra dentro los límites de la zona de aceptación, concluyendo que el criterio de intersección de las rectas de abrasión y adherencia depende no dependen de la emulsión utilizada.

## 5.2 Abrasión y adherencia resultantes a partir del contenido óptimo de asfalto

La Figura 5.3 presenta la adherencia y la abrasión resultante a partir del contenido óptimo de emulsión según el criterio de límites de diseño (C1) y el criterio de intersección de curvas (C2) a distintos contenidos de arena natural:

Tabla 5.3 - Adherencia y abrasión resultante según ambos criterios de diseño a distintos porcentajes de arena natural

An [%]	1° Criterio		2° Criterio	
	AMH [gr/m <sup>2</sup> ]	RC [gr/m <sup>2</sup> ]	AMH [gr/m <sup>2</sup> ]	RC [gr/m <sup>2</sup> ]
0%	279	403	338	338
20%	378	432	405	405
40%	366	444	411	411
60%	352	462	425	425
80%	415	497	473	473
100%	-	-	-	-

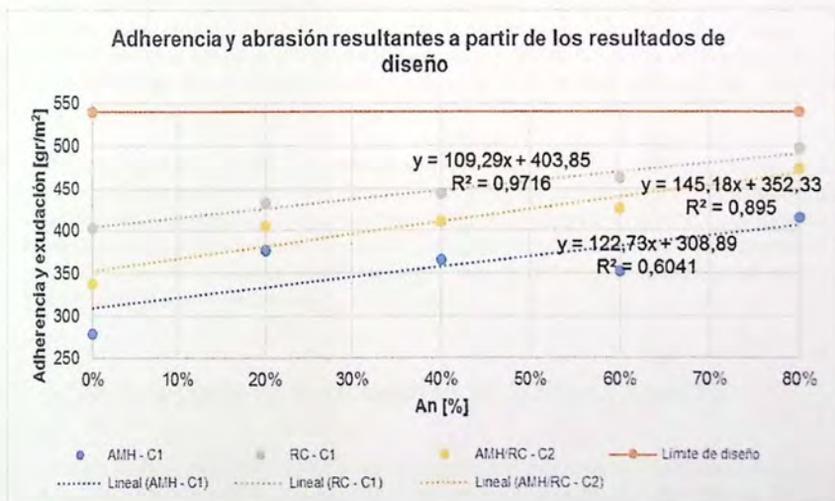


Figura 5.3- Adherencia y abrasión resultante según ambos criterios de diseño a distintos porcentajes de arena natural

- La Figura 5.3 se refiere a la abrasión y exudación resultantes a los distintos porcentajes de arena natural ensayados en este trabajo. Dicho gráfico muestra conclusiones evidentes acerca del comportamiento de los ensayos de forma individual. Desde el punto de vista de la abrasión, como la forma del árido afecta de forma negativa en la adherencia entre el agregado y la emulsión asfáltica, se produce un incremento en la abrasión. Por otra parte, una mayor cantidad de partículas de canto redondeado significa una menor cantidad de emulsión requerida para lograr un recubrimiento, lo que se traduce en una mayor cantidad de emulsión dispersa dispuesta a poder exudarse. Esto implica que la arena natural en las lechadas asfálticas presenta un efecto negativo en el diseño, pero en ningún caso sobrepasa el límite máximo establecido de 540 [gr/m<sup>2</sup>] según lo estipulado en el numeral MC 5.406, y se concluye que, desde el punto de vista teórico, la influencia del contenido de arena natural en lechadas asfálticas cumple con la normativa vigente.
- Como ya fue mencionado anteriormente que en todos los resultados de diseño de lechadas asfálticas bajo el criterio de límites de diseño C1 es mayor comparado al contenido óptimo según el criterio C2 de intersección de curvas, la recta resultante bajo el segundo criterio se encuentra entre las rectas resultantes de abrasión y adherencia bajo el primer criterio de diseño (Figura 5.3), puesto que un contenido menor de emulsión asfáltica genera una mayor abrasión y una menor exudación. Se concluye que depende del criterio del diseñador considerar si la variable de abrasión o exudación es más influyente según los requerimientos del camino.
- Al comparar las pendientes tanto del ensayo de abrasión en medio húmedo (AMH) como del ensayo de rueda de carga (RC) para ambos criterios de diseño, se observa que la pendiente es menor bajo el criterio de límites de diseño (C1) como se observa en la Figura 5.3. Con esto se concluye que a pesar de que se demostró que la dosificación de la emulsión no depende del contenido de arena natural en lechadas asfálticas bajo el criterio C1, se observa que un aumento del contenido de arena natural es más susceptible a los efectos negativos de desgaste y exudación.
- Aun cuando el criterio de diseño de intersección de curvas (C2) no presenta una variación en el contenido óptimo de emulsión para distintas cantidades de arena de canto redondeado en el árido de la lechada asfáltica, se observa un aumento en el desgaste y exudación al aumentar el porcentaje de partículas rodadas. Desde los resultados totales de la muestra patrón hasta las muestras con un 80% de árido rodado bajo las mismas condiciones, la variación de la exudación y la abrasión es aproximadamente un 40% mayor.

### 5.3 Análisis a partir de las muestras de lechada asfáltica

Los resultados teóricos de diseño deben ser contrastados con las probetas realizadas en laboratorio. En esta sección, se pretende analizar las muestras de lechada asfáltica a partir de los resultados finales de diseño, de acuerdo con el contenido óptimo de asfalto calculado por el diseño para lechadas asfálticas.

Se decide realizar una comparación de las probetas con respecto al criterio de intersección de curvas. Las razones de realizar un análisis comparativo radica por la aceptación de la hipótesis de no influencia de la forma de árido en la determinación del contenido óptimo de asfalto (se puede realizar una comparación con las mismas condiciones a excepción del contenido de árido natural en lechadas asfálticas) y de acuerdo con la sección 5.2 del presente Trabajo de Título, el criterio de intersección de curvas por análisis de pendientes presume una situación más desfavorable, al existir

una mayor pérdida de resistencia mecánica a mayor contenido de arena natural. Se estima aproximadamente un contenido óptimo de asfalto aproximado a un 12%.

Siendo el ensaye de rueda de carga el único ensaye que simula el paso de una rueda y por ende el único ensayo que somete las muestras a efectos de carga, se pretende dar una explicación a los fenómenos presentados en las probetas de lechada asfáltica.

### 5.3.1 Análisis de las probetas con porcentaje de arena natural dentro de lo estipulado por el manual de carreteras

Como estipula el numeral MC 5.406.201(2) con respecto al contenido de asfalto "Los áridos deberán ser chancados, aceptándose la incorporación de arena natural hasta el 20% del total del árido.". A partir de los resultados óptimos de diseño según la Figura 5.4 y Figura 5.6, se presenta la probeta según la intersección de las curvas, de aproximadamente 12% de emulsión asfáltica referido al árido seco:

#### 5.3.1.1 Grupo de muestras 100% árido chancado

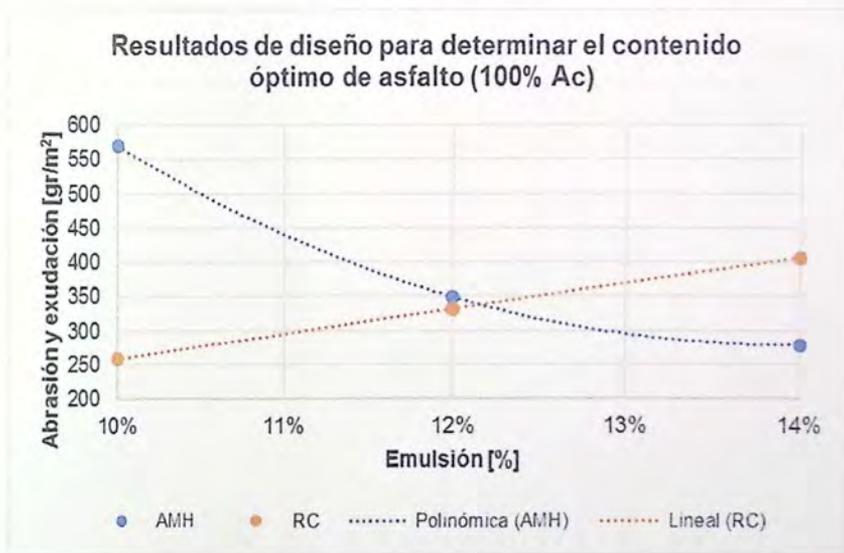


Figura 5.4 - Resultados de diseño para determinar el contenido óptimo de asfalto, árido 100 % Ac



Figura 5.5 - Probeta de lechada asfáltica ensayada a contenido óptimo de emulsión (12 %), árido 100% Ac

- La Figura 5.5 corresponde a una muestra de lechada asfáltica ensayada que presenta un contenido óptimo de asfalto con un 100 % de árido chancado. Finalizado el ensaye de rueda de carga, no se observó ninguna anomalía, y se concluye que las lechadas asfálticas bajo la acción de una carga para esta configuración cumplen con las exigencias establecidas en el Manual de Carreteras y son aptas para ser utilizados en terreno.

### 5.3.1.2 Grupo de muestras 80 % árido chancado, 20 % arena natural

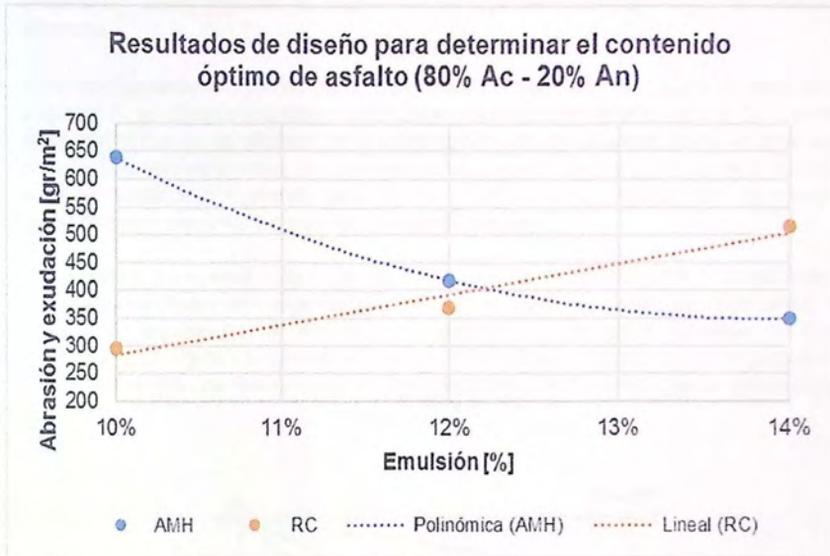


Figura 5.6 - Resultados de diseño para determinar el contenido óptimo de asfalto, árido 80 % Ac - 20 % An



Figura 5.7 - Probeta de lechada asfáltica ensayada a contenido óptimo de emulsión (12 %), árido 80% Ac - 20% An

- En la probeta que presenta un 20% de arena natural, no presentan fisuras atribuibles a la falta de adherencia. Esto implica que el comportamiento de ésta bajo las acciones de cargas cíclicas presenta una buena cohesión, de igual forma que la probeta que presenta un 100 % de árido chancado.
- Al extremo izquierdo de la probeta de lechada asfáltica con un contenido de 20% de arena natural (Figura 5.7), se observa una deformación por sobre el comportamiento general de la probeta ensayada, el cual se ve reflejado por el contorno formado por la arena silícea adherida en la probeta. Bajo esta perspectiva, se concluye que el contenido de arena natural en el diseño de lechadas asfálticas aun cuando tiene alguna influencia en la mezcla, ésta no afecta su comportamiento mecánico y puede ser utilizado en terreno.

Considerando que el ensayo de rueda cargada indica usar carga constante y normalizada, las deformaciones diferenciales obtenidas en probetas con distinto contenido de arena natural, son posibles de explicar con el fenómeno de resistencia a esfuerzos cortantes en suelos friccionantes. La Figura 5.8 representa la resistencia al esfuerzo cortante de forma esquemática de una arena bajo una misma carga en tres condiciones de densidad: suelta, compactada y cementada.

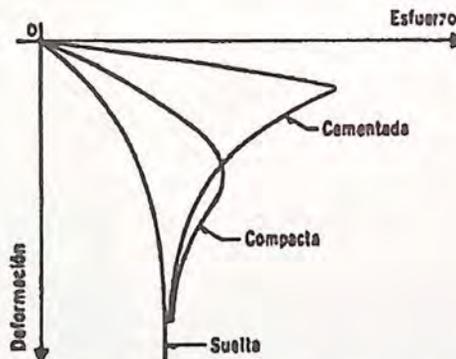


Figura 5.8 - Gráfico esfuerzo-deformación para una arena en estado suelta, compacto y cementado bajo una misma presión normal (Fuente: [35])

Una aplicación más estricta según lo señalado en la Figura 5.8 considera la masa de un árido de forma discreta compuesto como un conjunto de partículas actuando en los puntos de contacto entre partículas adyacentes. Los puntos de contacto varían según el tamaño de los áridos, y una buena granulometría ofrece una mayor cantidad de puntos de contacto [35].

De acuerdo a la composición de las lechadas asfálticas, la emulsión asfáltica incorporada al árido ofrece la adherencia entre las partículas del árido, que resulta en la cohesión de la mezcla, y de acuerdo a la Figura 5.8 la composición de una lechada asfáltica es similar al caso cementado de un suelo. El comportamiento característico de este tipo de suelos corresponde a un tipo de falla frágil, ya que observa un aumento del esfuerzo a una mayor deformación hasta alcanzar un esfuerzo máximo para finalmente decrecer hasta un valor final de esfuerzo, aproximado a la resistencia del mismo árido en estado suelta o compactado [35].

La resistencia al corte por cargas normales puede extenderse a otros factores tales como el tamaño de las partículas, su granulometría, la cementación y principalmente para este Trabajo de Título, la forma de las partículas. La resistencia al corte máximo se ve disminuida al aumentar el tamaño del árido y una mala granulometría. Un material con una mejor cohesión otorga una resistencia inicial que contribuye a la resistencia máxima del material. La forma del árido tiene un valor relevante en los valores máximos de resistencia, puesto que la deformabilidad decrece y la resistencia crece ante una mayor cantidad de áridos angulosos que en áridos de canto redondeado [35].

La forma del árido desde el punto de vista macroscópico puede ser presentado a partir de una analogía desde el punto de vista de la dilatación, que consiste en la variación de volumen por acción de esfuerzos tangenciales. En un árido compactado los granos se encuentran imbricados, y cuando se produce una falla por corte, desde el punto de vista macroscópico, las partículas tienden a desplazarse entre las partículas vecinas, generando el efecto antes mencionado [43], como se puede ver en la Figura 5.9.

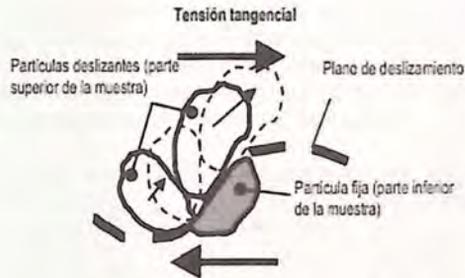


Figura 5.9 - Dilatación de un suelo (Fuente: [43])

Al considerar el efecto de la forma del árido bajo el análisis de dilatación, una partícula redondeada ofrece una superficie más lisa implicando una menor fricción superficial, generando consiguientemente un mayor desplazamiento macroscópico comparado con partículas angulosas de igual tamaño, lo que produce una diferencia de volumen debido al efecto del desplazamiento. Al incluir la variable del asfalto como agente cementante, omitiendo la cantidad de emulsión en la mezcla, un mayor desplazamiento implica mayor esfuerzo asociado principalmente por la cohesión de la lechada asfáltica.

Asociar todo lo mencionado anteriormente a la deformación presentada en la probeta de 80 % Ar – 20 % An puede ser explicado según la Figura 5.8. como ya fue mencionado, al existir un menor roce entre las partículas debido a la forma del árido se concluye que existe una menor resistencia máxima a los esfuerzos de corte, lo que significa un mayor desplazamiento ante la misma acción de una carga, comparado con el árido patrón 100 % chancado. La Figura 5.10 representa de forma esquemática la deformación total de un árido a distintas condiciones de esfuerzo constante.

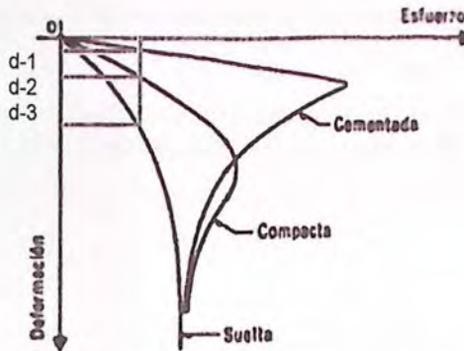


Figura 5.10 - Deformación de un suelo a un esfuerzo constante para distintas condiciones del suelo (Fuente: adaptado de [35])

Según la Figura 5.10, el desplazamiento para un árido cementado (d-1) es menor que para un árido compacto (d-2) y menor aún que para un árido uno suelto (d-3). La analogía para estimar el comportamiento de una lechada asfáltica con el contenido de arena natural, es similar a lo presentado en un suelo en distintas condiciones. Lo mencionado anteriormente se justifica con el desplazamiento observado al final del ensaye de rueda de carga.

- Al no presentar algún mecanismo de falla en las probetas dentro del límite permitido por el Manual de Carreteras, se puede llegar a la conclusión de que para ambos casos la deformación se produce antes del valor *peak* de su resistencia al corte.

### 5.3.2 Análisis de las probetas con porcentaje de arena natural fuera de lo estipulado por el manual de carreteras

De manera análoga a los resultados de diseño con el porcentaje de arena natural dentro del porcentaje máximo permitido, se analiza el mismo procedimiento a partir del contenido óptimo de asfalto según el criterio de intersección de curvas y se analiza el diseño desde el punto de vista de la resistencia al corte y de la dilatancia. La Figura 5.11, Figura 5.13, Figura 5.15 y Figura 5.17 consisten en una representación gráfica del contenido óptimo de asfalto según la unión de las rectas de abrasión y adherencia a distintos porcentajes de arena natural con las respectivas probetas ensayadas al porcentaje de emulsión óptimo.

5.3.2.1 Grupo de muestras 60 % árido chancado, 40 % arena natural

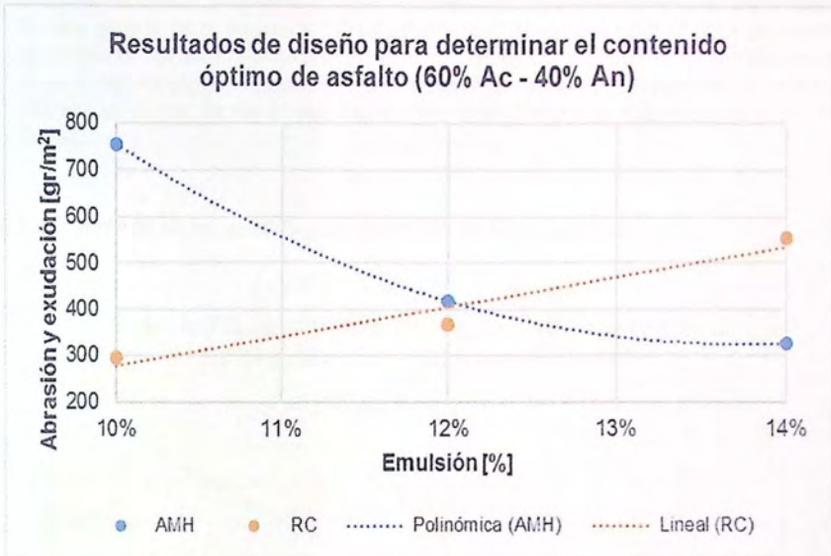


Figura 5.11 - Resultados de diseño para determinar el contenido óptimo de asfalto, árido 60 % Ac - 40 % An



Figura 5.12 - Probeta de lechada asfáltica ensayada a contenido óptimo de emulsión (12 %), árido 60% Ac - 40% An

- En la probeta que presenta un 40% de arena natural (Figura 5.12), se producen pequeñas grietas que evidencian que en algunos sectores se superó la resistencia máxima a esfuerzos de corte. Se puede considerar el supuesto de que las grietas presentadas en la probeta no son un indicio de falla general de la probeta ensayada, puesto que no genera ninguna zona propensa a desprenderse debido al paso de las cargas, asociando esta falla al proceso de confección de la probeta. Sin embargo, si se toma en cuenta el factor de escala para evaluar una lechada para utilizarla en terreno, se puede acentuar el número de grietas y se puede descartar por este motivo.

### 5.3.2.2 Grupo de muestras 40 % árido chancado, 60 % arena natural

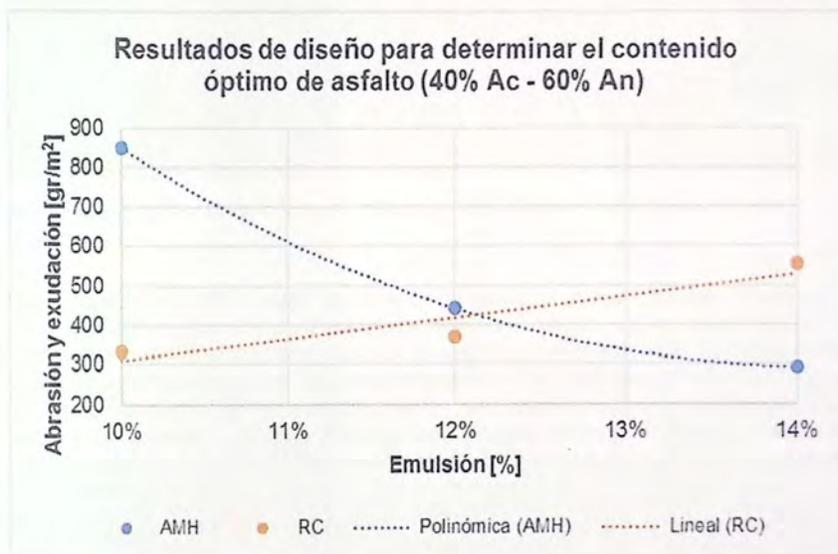


Figura 5.13 - Probeta de lechada asfáltica ensayada a contenido óptimo de emulsión (12 %), árido 40 % Ac - 60 % An

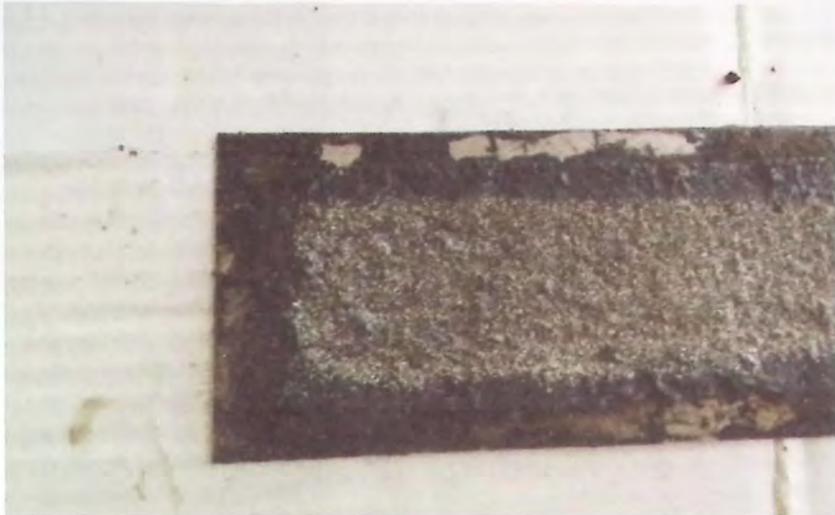


Figura 5.14 - Probeta de lechada asfáltica a un 12% de asfalto, árido 40% Ac - 60% An

- La probeta con un 60% de arena natural según la Figura 5.14, presenta una falla más acentuada que la probeta mencionada anteriormente. La deformación debido a una carga normal ya excede su resistencia máxima y la adherencia entre las partículas pierde efectividad. Al existir un mayor desplazamiento entre las partículas, además de generar deformaciones, por efecto de dilatación, el cambio de volumen genera esfuerzos internos que superan la cohesión de la lechada. Desde este punto de vista, el efecto de la arena natural adquiere real importancia ya que desde este porcentaje se generan fallas frágiles en la estructura, descartando esta probeta para ser utilizada en terreno.

### 5.3.2.3 Grupo de muestras 20 % árido chancado, 80 % arena natural

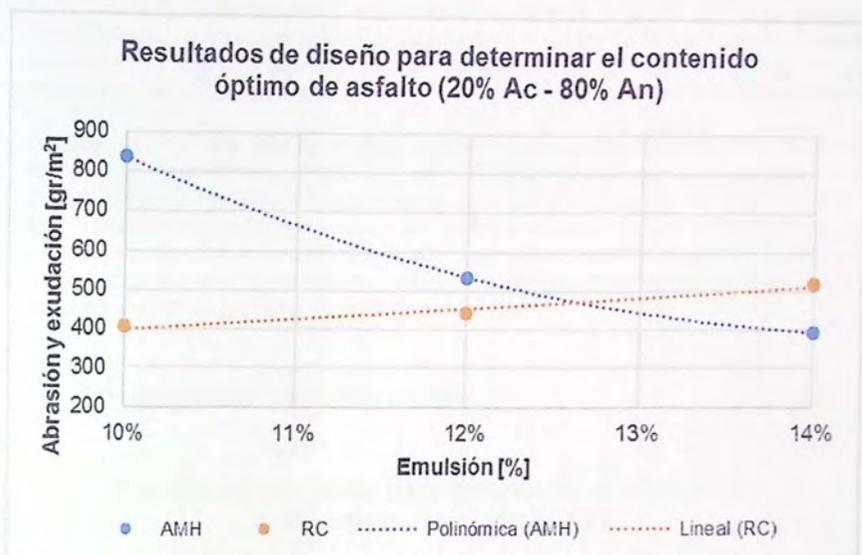


Figura 5.15 - Probeta de lechada asfáltica ensayada a contenido óptimo de emulsión (12 %), árido 20 % Ac - 80 % An



Figura 5.16 - Probeta de lechada asfáltica a un 12% de asfalto, árido 20% Ac - 80% An

- Las probetas con un porcentaje de arena natural superior a un 80% (Figura 5.16 y Figura 5.18) presentan un comportamiento inestable con un resultado irregular comparado a la forma original de la probeta. El comportamiento mecánico de las probetas se considera deficiente, generando un nuevo plano de falla, que acentúa el desplazamiento de las partículas hacia sus costados, atribuibles a la mínima trabazón entre sus partículas y a la adhesión insuficiente entre las partículas y la emulsión, generando una baja cohesión, generando grietas en la lechada asfáltica.

Las fallas longitudinales para estos casos se pueden atribuir principalmente por el efecto de la dilatación. De acuerdo con la Figura 5.16, el efecto de la carga presenta una deformación que produce un cambio de volumen, que produce una expansión de la lechada a los costados de ésta. A pesar de que para el caso con un 60% de arena natural se presentó una falla frágil, para este tipo de probetas el comportamiento de la lechada es más inestable, llegando a la conclusión, de acuerdo al diagrama de resistencia a esfuerzos cortantes, un comportamiento de este estilo es similar a un comportamiento de un árido más suelto.

#### 5.3.2.4 Grupo de muestras 100 % arena natural

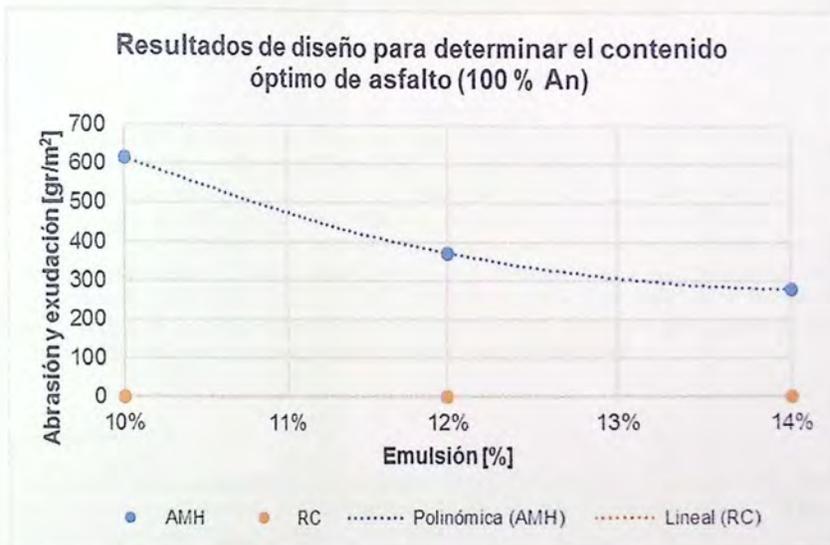


Figura 5.17 - Resultados de diseño para determinar el contenido óptimo de asfalto, árido 100 % An



Figura 5.18 - Probeta de lechada asfáltica ensayada a contenido óptimo de emulsión (12 %), árido 100% An

- La probeta 100% de arena natural como fue mencionado anteriormente no presentó bajo ningún porcentaje de asfalto un comportamiento estable, comportándose muy similar a la Figura 5.16. La muestra de lechada asfáltica adquiere una cohesión entre las partículas muy débil y para ningún caso se recomienda utilizar este tipo de áridos para lechadas asfálticas. Bajo los fundamentos teóricos detrás de los ensayos solicitados para determinar el contenido óptimo de emulsión en lechadas asfálticas, ningún porcentaje de emulsión dentro de los rangos estudiados fueron capaces de resistir el efecto de una carga en su superficie. Esto significa que los requisitos para áridos en lechadas asfálticas para este caso no son suficientes para lograr un diseño óptimo, principalmente por la adherencia emulsión – agregado pétreo.

#### Comentarios

- El procedimiento de análisis para las probetas más allá del contenido de arena natural señalado por el Manual de Carreteras es regido bajo las mismas consideraciones estipuladas en la sección 5.3.1 del presente Trabajo de Título.
- Todas las muestras que están dentro de esta clasificación sufrieron algún tipo de falla al final de este ensayo. El tipo de falla común en todas las muestras son del tipo de grietas longitudinales a lo largo de la probeta. Este tipo de fallas se produce principalmente por la superación de la resistencia máxima de ésta.

Al igual que los casos anteriores a excepción de la muestra patrón de árido chancado, presentan deformaciones perceptibles visualmente por efecto de la carga aplicada en el ensayo de rueda de carga. De la misma forma, la carga aplicada es la misma en todos los casos y aumentar el contenido de arena natural implica una menor resistencia al corte máximo, ocasionando mayores deformaciones por este efecto, similar a lo mencionado en la Figura 5.10.

El efecto de la dilatancia se acentúa por una menor resistencia al deslizamiento macroscópico en las partículas, generando un desplazamiento de éstas aún mayores a mayor contenido de asfalto hasta el punto de percibir grietas transversales por la deformación entre las partículas. Si dicho desplazamiento genera un esfuerzo mayor al máximo permitido, la probeta sufre fallas rompiendo la adherencia entre el asfalto y el árido.

## 5.4 Análisis de muestras de lechada asfáltica por medio de la resistencia al deslizamiento

De manera complementaria al diseño de lechadas asfálticas, es necesario estudiar el efecto del canto del árido en parámetros aplicables a la utilización de lechadas asfálticas, y uno de estos factores es la resistencia al deslizamiento. Esto da pauta para analizar, por una parte, la influencia de la forma del árido desde el concepto de la microtextura, y por otro lado determinar de forma indirecta el contenido de arena natural utilizado en terreno.

Para determinar dicho parámetro, se utiliza la Ecuación 2.6, Ecuación 2.7 y Ecuación 2.8. Los resultados de la resistencia al deslizamiento a distintos porcentajes de arena natural se presentan en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4 - Resultados ensayo para determinar la resistencia al deslizamiento por péndulo británico

Muestra	T [°C]	Fa(20)	BPN <sub>1</sub>	BPN <sub>2</sub>	BPN <sub>3</sub>	BPN <sub>4</sub>	BPN <sub>5</sub>	BPN	BPN <sub>A</sub>	RD
100 % A <sub>c</sub>	21,6	1,008	86	86	86	89	86	86,6	87,3	0,87
80 % A <sub>c</sub> - 20 % A <sub>n</sub>	21,9	1,010	88	85	86	85	85	85,8	86,7	0,87
60 % A <sub>c</sub> - 40 % A <sub>n</sub>	21,7	1,009	85	85	82	84	84	84,0	84,8	0,85
100 % A <sub>n</sub>	25,1	1,028	31	33	30	30	30	30,8	31,7	0,32

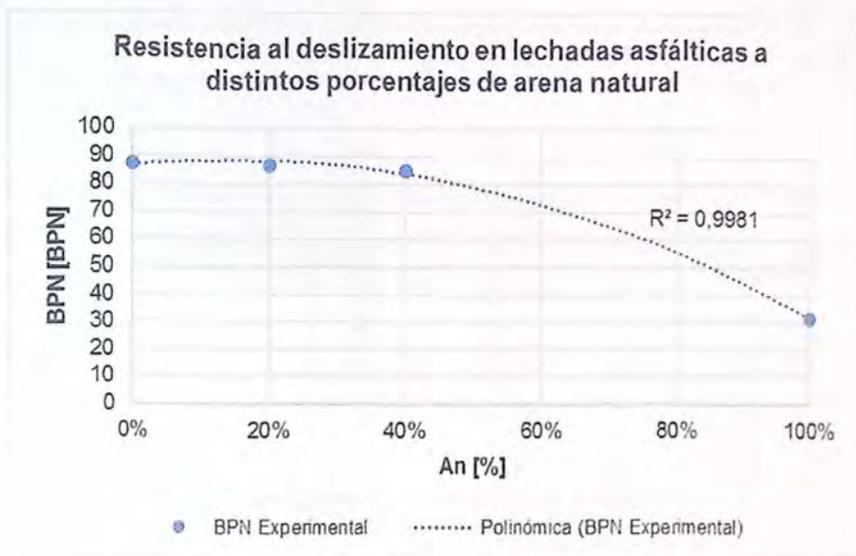


Figura 5.19 - Resistencia al deslizamiento a diferentes porcentajes de arena natural

- Las muestras fueron ensayadas en condiciones de clima soleado y sin corrientes de viento que afecten los resultados de este ensaye.
- Las muestras fueron construidas bajo el segundo criterio de diseño de lechadas (intersección de las curvas de abrasión en medio húmedo y adherencia de arena) para realizar una comparación bajo las mismas condiciones, exceptuando el contenido de arena natural.
- Los puntos seleccionados corresponden a los resultados a partir del análisis de probetas de lechada asfáltica. Se seleccionaron muestras con porcentajes de arena natural permitido por el Manual de Carreteras, de un 40% de An y 100% An. Se seleccionaron dichos puntos para realizar una comparación entre la zona con resultados buenos/aceptables y un dato extremo para comparar la diferencia de resistencia al deslizamiento.
- La tendencia entre la resistencia al deslizamiento a mayor contenido de arena natural se considera decreciente ajustada de forma polinómica de acuerdo a la Figura 5.19. Se observa que en el rango 0% - 40% de arena natural la diferencia de dos puntos de BPN (Tabla 5.4), y se concluye que en dicho rango la microtextura puede ser considerada constante. Para el punto extremo con un contenido de 100% arena natural, la disminución de resistencia al deslizamiento se reduce drásticamente. La rugosidad mínima exigida por el Manual de Carreteras (RD) es de 0,45 o BPN=45, siendo un valor bastante inferior a los resultados de este ensaye a excepción del punto extremo (100% An), el cual no cumple con los requisitos mínimos de resistencia al deslizamiento. Se llega a la conclusión de que un árido 100% de arena natural no presenta las propiedades necesarias para ser utilizado en lechadas asfálticas desde el punto de vista de la poca rugosidad de la lechada, ya que resulta un diseño inseguro.

Para poder establecer un criterio que determine el contenido de arena natural en terreno, se propone un rango de tolerancia para el contenido de arena natural. La Tabla 5.5 pretende calcular el contenido de arena natural a partir de la curva característica (Figura 5.20) proponiendo una tolerancia máxima del BPN del 2%.

Tabla 5.5 - Propuesta de criterio para establecer un rango de tolerancia para la resistencia al deslizamiento

Muestra	BPN Ajustado Experimental	Límite BPN Inferior	Error relativo BPN	Arena natural límite	Tolerancia
100 % $A_c$	86,6	84,9	1,96%	-	-
80 % $A_c$ - 20 % $A_n$	88,3	86,5	2,04%	31,30%	11,30%
60 % $A_c$ - 40 % $A_n$	83,7	82,0	2,03%	44,04%	4,04%
100 % $A_n$	31,8	31,2	1,89%	-	-

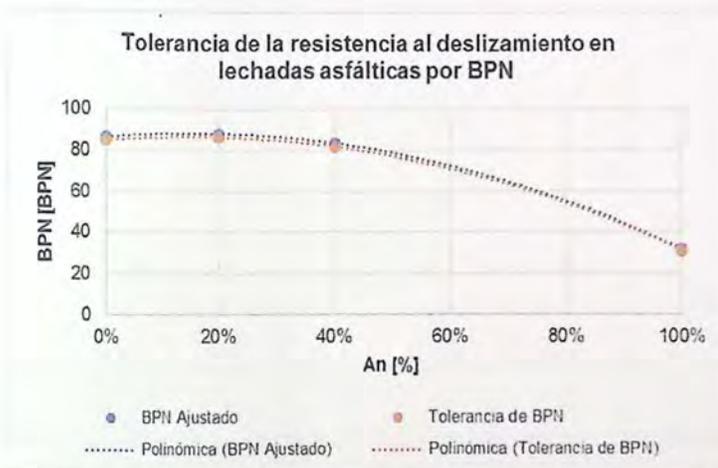


Figura 5.20 - Propuesta de criterio para establecer un rango de tolerancia para la resistencia al deslizamiento

### Observaciones

- No se han considerado los puntos extremos del contenido de asfalto, puesto que no presentan un sentido físico, debido a que el objetivo de analizar un árido 100% chancado no tiene sentido para el objetivo de este ensaye, y no existe un contenido de arena natural mayor al 100%, además de descartar este punto por las razones mencionadas anteriormente.
- La Tabla 5.5 tiene como objetivo establecer un margen del contenido de arena natural máximo a partir de establecer un margen de tolerancia de BPN. En la columna de valores en la columna BPN ajustado experimental, corresponden a la resistencia al deslizamiento por medio de la interpolación de los resultados obtenidos. El límite de BPN corresponde a la tolerancia que se ha estimado en un 2%, como se observa en la Figura 5.20. La columna "arena natural límite", corresponde al máximo porcentaje de arena natural ingresado a la lechada asfáltica que

presenta la misma resistencia al deslizamiento que el rango de tolerancia establecido. Por ejemplo, para el punto con 20% de arena natural, una disminución de un 2% del BPN corresponde a un aumento en la arena natural en un 11,30%. De igual forma, una disminución de un 2% del BPN para el caso con 40% de arena natural, supone un aumento de 4,04%. Se llega a la conclusión que bajo este criterio de diseño, a mayor contenido de arena natural en la lechada asfáltica, la tolerancia disminuye. Esto se detalla de mejor manera en la Figura 5.21.

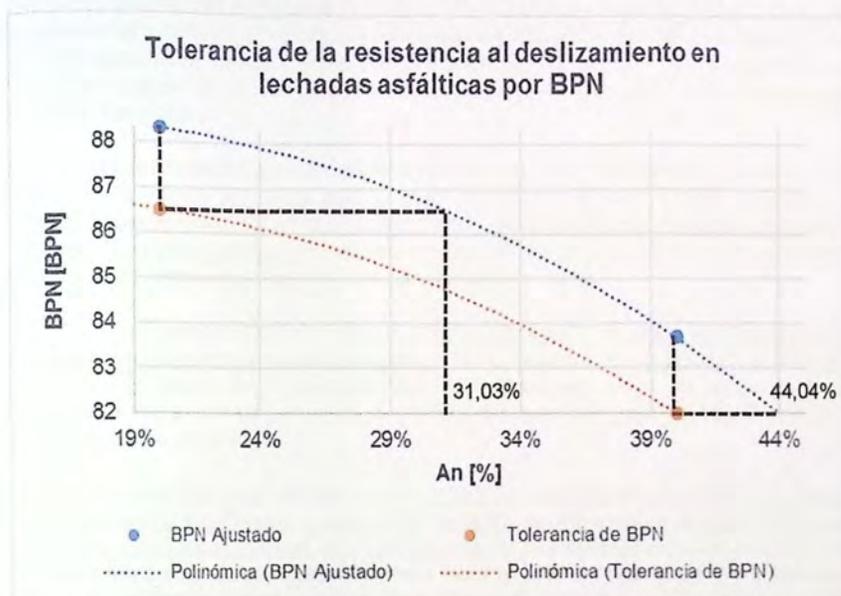


Figura 5.21 - Tolerancia de arena natural de acuerdo al rango de tolerancia de BPN (Zoom)

- La Tabla 5.5 propone estimar una tolerancia máxima de arena natural de aproximadamente un 10%. Este rango se considera arbitrario y por lo tanto se recomienda realizar una investigación para desarrollar este tema.

## 6 Conclusiones

### 6.1 Conclusiones generales

- Los áridos utilizados en el presente Trabajo de Título cumplieron con los requisitos de áridos para lechadas asfálticas a excepción del porcentaje de partículas chancadas de la arena natural. Ambos materiales se consideraron no plásticos, sin exceso de material fino, un bajo índice de trituración y presentan el mismo grado de adherencia por el ensayo según método estático y por el ensayo Riedel-Weber.

El resultado de la adherencia presentó vital importancia desde el punto de vista comparativo. Al presentar los mismos resultados para el árido chancado y la arena natural, se llegó a la conclusión que la adherencia entre las partículas del material y la emulsión asfáltica utilizada no dependen de la forma del árido. Por lo tanto, se concluyó que un incumplimiento en los ensayos de adherencia dependerá exclusivamente de la emulsión a utilizar.

- Debido a las variables utilizadas, el resultado para determinar el contenido asfáltico teórico es independiente del contenido de arena natural, es exclusivamente por el cálculo de la superficie específica. Al estudiar los fundamentos para determinar este valor, se concluye que la metodología actual corresponde a una simplificación, puesto que omite las características de forma y densidad de los áridos.
- Se concluyó que el porcentaje de agua de premezclado necesario para lograr una mezcla estable de lechada asfáltica, disminuye al aumentar el contenido de arena natural debido a una menor resistencia al deslizamiento de las partículas rodadas. Esto se complementa con que los puntos de contacto entre partículas rodadas es menor comparado a un caso similar entre partículas chancadas, facilitando su desplazamiento. Sin embargo, la variación entre el porcentaje máximo y mínimo de agua de premezclado es de un 0,4%, que puede ser considerado despreciable.
- La trabajabilidad de la mezcla fue similar en todas las mezclas de lechada asfáltica para todos los porcentajes de arena natural utilizados en este trabajo. Por ello, se llega a la conclusión de que el uso de arena natural en lechadas asfálticas no presenta un efecto negativo en la mezcla para ser preparada en terreno.
- Los resultados obtenidos en el ensayo de abrasión en medio húmedo indicaron que la arena natural tiene un efecto negativo en la abrasión. Al utilizar la misma emulsión asfáltica en todos los casos, se concluyó que la forma del árido tiene directa relación con la cohesión de la lechada asfáltica, debido a que la microtextura de las partículas con canto redondeado generan una menor trabazón entre partículas, facilitando el desprendimiento de éstas, y generando una menor adherencia con la emulsión utilizada. Esto se comprobó comparando los resultados de las probetas con igual porcentaje de asfalto.

Nótese que para estimar la relación entre el contenido de arena natural y la abrasión en probetas con igual porcentaje de emulsión para mezclas con diferente porcentaje de arena natural, se descartó el grupo de probetas 100% de arena natural. Realizando el ensayo para determinar la resistencia al deslizamiento mediante péndulo británico, este valor alejado de la tendencia puede ser explicado por este fenómeno, puesto que al existir un mínimo roce en la superficie, una superficie más lisa dificulta el proceso de abrasión.

- Los resultados del ensayo de rueda de carga para determinar la exudación en lechadas asfálticas determinaron que la forma del árido tiene un efecto negativo en la exudación de la mezcla, debido a una menor superficie específica de la arena natural comparado al árido chancado para ser recubierta con la emulsión asfáltica, lo que se traduce en una mayor cantidad de asfalto disperso. a tal punto que las probetas del grupo de muestras con 100% de arena natural fallaron, concluyendo que no es posible la confección de una lechada asfáltica elaboradas exclusivamente de arena natural.
- El contenido óptimo de asfalto varió según el criterio de diseño a utilizar. De acuerdo al criterio de límites de diseño, el contenido óptimo de asfalto se comportó de forma parabólica con valores decrecientes hasta un 40% de contenido de arena natural. Al estudiar la hipótesis de que el contenido óptimo de emulsión no depende de la forma del árido en el diseño de lechadas asfálticas por este criterio, se concluyó que, bajo el criterio de diseño de límites de diseño, el contenido óptimo de emulsión es una variable dependiente del contenido de arena natural en lechadas asfálticas, lo que significa que el comportamiento mecánico depende tanto de la forma del árido como de la emulsión utilizada.

Realizando el mismo análisis según el criterio de intersección de las curvas de abrasión en medio húmedo y de exudación, se concluyó que estos valores se comportaron de manera estable, con valores decrecientes hasta aproximadamente un 30% de arena natural. Realizando la misma hipótesis de no influencia de la forma del árido en contenido óptimo de emulsión bajo este criterio de diseño, se concluyó que la intersección de las curvas de abrasión y exudación en lechadas asfálticas depende principalmente de la granulometría.

- Comparando el contenido óptimo de asfalto de ambos criterios de diseño, se llegó a la conclusión de que el contenido óptimo de asfalto en todos los casos es menor bajo el criterio de intersección de curvas. Debido a ello, se observó que un menor contenido de asfalto produce una mayor abrasión y una menor exudación según los fundamentos de diseño de lechadas asfálticas. Al igual que lo concluido en los ensayos individuales de abrasión en medio húmedo y rueda de carga, los resultados de diseño indicaron que se presentan una mayor abrasión y exudación a mayor contenido de arena natural. Sin embargo, en ningún caso bajo 80% de arena natural se observa una abrasión y exudación mayores al límite máximo de 540 gr/m<sup>2</sup> según lo indicado en el numeral MC 5.406.3. Esto supone que la arena natural de VI Región cumple con los requisitos establecidos en el Manual de Carreteras dentro de los límites establecidos en este trabajo desde el punto de vista teórico.
- Al comparar las muestras de lechada asfáltica luego del ensayo de rueda de carga bajo el criterio de intersección de curvas, se observó que finalizado el ensayo las probetas de lechada asfáltica presentaron fallas en porcentajes de arena natural mayores al 20%. Esto se debe a que la arena natural presenta una menor resistencia al corte comparado a un árido chancado. Un material que presente una menor resistencia al corte sufre mayores deformaciones bajo la acción de una carga, observándose de manera más notoria en probetas con alto porcentaje de arena natural. Esto se debe a una mayor capacidad de desplazamiento de las partículas debido a una menor resistencia al desplazamiento entre éstas, efecto conocido como dilatación. Por lo tanto, se concluyó que no se recomienda utilizar porcentajes de arena natural mayores a los establecidos por el Manual de Carreteras.

- Se comprobó que la forma del árido tiene un efecto negativo en la superficie de la lechada asfáltica a porcentajes altos de arena natural. Al realizar el ensaye de resistencia al deslizamiento por medio del péndulo británico, se concluyó que desde el punto de vista de la seguridad no se recomienda utilizar un 100% de arena natural en lechadas asfálticas debido a que no cumple con los requisitos de rugosidad de acuerdo al Manual de Carreteras. Sin embargo, bajo la normativa vigente, el contenido de arena natural no presenta inconveniente alguno desde el punto de vista de la resistencia al deslizamiento.

Se propuso una metodología para establecer de forma indirecta el contenido de arena natural en lechadas asfálticas por medio del ensaye de péndulo británico, estableciendo una tolerancia máxima según los resultados de BPN obtenidos en laboratorio. Dicha metodología presentó la ventaja de reducir la tolerancia del contenido de arena natural a mayores porcentajes de arena natural debido a la curva caracterizada de acuerdo a la Tabla 5.5.

- Considerando todo lo anterior, al momento de diseñar una lechada asfáltica con cualquier porcentaje de arena natural, significa una menor resistencia máxima al corte y una menor cohesión entre las partículas.

Al realizar los distintos ensayos para determinar el contenido óptimo de asfalto por diseño, las consideraciones adoptadas por el Manual de Carreteras son válidos dentro de los límites establecidos por éste. Al usar porcentajes de arena natural superiores al 20% en lechadas asfálticas, toman importancia valores que no son válidos en este rango principalmente por la simplificación de la superficie específica y el grado de adherencia insuficiente debido a la forma del árido.

El efecto negativo del contenido de arena natural en lechadas asfálticas es evidente a tal punto que bajo ningún punto de vista se puede considerar un árido 100% natural, debido a que es una mezcla inestable a cualquier porcentaje de asfalto, sin presentar condiciones mínimas de rugosidad superficial, tomando en consideración los requisitos vigentes.

## 6.2 Discusiones y recomendaciones

A pesar del efecto negativo de la arena natural en lechadas asfálticas, al adoptar las consideraciones en el presente Trabajo de Título, se dejan abiertas distintas aristas que pueden ser tomadas en cuenta a la hora de realizar nuevas investigaciones en este tema:

Ya que se estudió el efecto de la forma del árido en lechadas asfálticas, se propone un estudio centrado en las emulsiones utilizadas para evaluar, desde el punto de vista del asfalto si es viable una lechada asfáltica con porcentajes de arena natural superiores al 20% con el uso de asfaltos modificados con polímeros.

El uso de asfaltos modificados presenta diversas ventajas comparado a las emulsiones tradicionales. Estudios afirman que el contenido de polímero genera una mayor resistencia de liga entre las partículas, que las emulsiones más dúctiles favorecen la adherencia y que el residuo asfáltico tiene relevancia en la resistencia de liga debido a que se requiere un menor porcentaje de ésta para lograr la adherencia deseada [44]. Esto presenta nuevos horizontes para evaluar si definitivamente se puede utilizar un mayor contenido de arena natural con el uso de asfaltos modificados.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el presente Trabajo de Título, al establecer que el grado de adherencia depende exclusivamente del tipo de emulsión utilizado, el ensaye Riedel – Weber presenta vital importancia. Se recomienda utilizar emulsiones con un grado de adherencia mayor a 0 – 5 de acuerdo con el numeral MC 5.406.201.A y establecer nuevas exigencias en caso de ser un diseño viable. Dicho estudio tendrá consecuencias directas en la determinación de la abrasión de una lechada, logrando un menor contenido óptimo de asfalto, llegando a presentar consecuencias positivas principalmente desde el punto de vista económico.

El establecer nuevas exigencias requiere adoptar nuevas consideraciones debido a los resultados obtenidos en el presente Trabajo de Título. De acuerdo al fundamento teórico para determinar la superficie específica, se concluyó que la fórmula utilizada no representa de forma verídica al árido, debido a que no se considera la forma del árido y la densidad real seca del mismo. Esto significa que se debe recalcular esta fórmula para determinar la superficie específica de un árido en función del porcentaje de arena natural. Respecto a lo anterior, una menor superficie específica implica un menor contenido de asfalto teórico, lo cual tendrá consecuencias directas en el estudio de la exudación de la lechada.

Finalmente, estudiar el efecto de la cohesión de la lechada y la adherencia entre las partículas es de vital importancia para lograr una mezcla que presente una buena resistencia al corte, poca exudación y comportamiento estable, cosa que no puede ser asegurada con el uso de arena natural para obtener una mezcla más económica de la forma tradicional.

## 7 Referencias

- [1] C. Pardo, Trabajo de Título: Utilización de Escoria de Cobre como Agregado Pétreo para Solución de Caminos Básicos de la Región de Valparaíso, 2017.
- [2] J. Albornoz y F. Salazar. [En línea]. Available: [https://www.u-cursos.cl/usuario/6a38e82823d4d6be95f489524f47eeca/mi\\_blog/r/Laboratorio\\_No2-\\_Albornoz\\_-\\_Salazar.pdf](https://www.u-cursos.cl/usuario/6a38e82823d4d6be95f489524f47eeca/mi_blog/r/Laboratorio_No2-_Albornoz_-_Salazar.pdf).
- [3] RT Dynal, *Lechadas Asfálticas*.
- [4] Ministerio de Obras Públicas, Manual de Carreteras - Volumen V, sección 5.406: Lechada Asfáltica, 2017.
- [5] V. Roco, C. Fuentes y S. Valverde, «Evaluación de la resistencia al deslizamiento en pavimentos chilenos».
- [6] Ministerio de Obras Públicas, «Red Vial Nacional - Dimensionamiento y Características,» 2016.
- [7] Ministerio de Obras Públicas, «Red Vial Nacional - Dimensionamiento y Características,» 2010 - 2016.
- [8] Ministerio de Obras Públicas, [En línea]. Available: [http://www.vialidad.cl/proyectos/caminosbasicos/Documents/Soluciones\\_tecnicas.pdf](http://www.vialidad.cl/proyectos/caminosbasicos/Documents/Soluciones_tecnicas.pdf).
- [9] Laboratorio Nacional de Vialidad, [En línea]. Available: <http://www.vialidad.cl/areasdevialidad/laboratorionacional/MaterialCursos/lechadas%20y%20Microag%20en%20fr%C3%ADo.pdf>.
- [10] Instituto Chileno del Asfalto, «Boletín Técnico N°1: Lechadas asfálticas y micropavimentos, aclarando conceptos,» 2000.
- [11] M. Jimenez, D. Sibaja y D. Molina, «Sellos de lechada asfáltica "Slurry Seals" en Costa Rica, conceptos, ensayos y especificaciones,» 2009.
- [12] Caltrans Division of Maintenance, «MTAG Volume I: Flexible Pavement Preservation,» 2007.
- [13] Laboratorio Nacional de Vialidad, «Curso de Laboratorista Vial, Volumen V: Mezclas asfálticas».
- [14] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, «ASTM D 3910: Standard Practices for Design, Testing, and Construction of Slurry Seal,» 1998.
- [15] Ministerio de Obras Públicas, «Manual de Carreteras - Volumen VIII, sección 8.302.45: Método para determinar la consistencia de lechadas asfálticas,» 2017.
- [16] Ministerio de Obras Públicas, «Manual de Carreteras - Volumen VIII, sección 8.302.52: Método de diseño de lechadas asfálticas y microaglomerados en frío,» 2017.

- [17] Ministerio de Obras Públicas, «Manual de Carreteras - Volumen VIII, sección 8.302.46: Método de abrasión en medio húmedo para lechadas asfálticas,» 2017.
- [18] Ministerio de Obras Públicas, «Manual de Carreteras - Volumen VIII, sección 8.302.53: Método para determinar el porcentaje máximo de ligante en lechadas asfálticas usando la rueda de carga,» 2017.
- [19] Ministerio de Obras Públicas, Manual de Carreteras - Volumen VIII, sección 8.502.16: Método para determinar el coeficiente de resistencia al deslizamiento con péndulo británico (TRRL), 2017.
- [20] Laboratorio Nacional de Vialidad, 2015. [En línea]. Available: <http://www.vialidad.cl/areasdevialidad/laboratorionacional/MaterialCursos/Mezclas%20Asf%C3%A1lticas.pdf>.
- [21] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, «ASTM D 2419: Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate,» 2002.
- [22] Ministerio de Obras Públicas, Manual de Carreteras - Volumen VIII, sección 8.202.9: Método para determinar el equivalente de arena, 2017.
- [23] C. Crespo, de *Mecánica de suelos y cimentaciones*, 2004, p. 69.
- [24] Ministerio de Obras Públicas, Manual de Carreteras - Volumen VIII, sección 8.102.3: Método para determinar el límite líquido, 2017.
- [25] Ministerio de Obras Públicas, Manual de Carreteras - Volumen VIII, sección 8.102.4: Método para determinar el límite plástico, 2017.
- [26] Ministerio de Obras Públicas, Manual de Carreteras - Volumen VIII, sección 8.302.29: Método estático para determinar la adherencia agregado - ligante asfáltico, 2017.
- [27] Ministerio de Obras Públicas, Manual de Carreteras - Volumen VIII, sección 8.302.30: Método para determinar la adherencia agregado - ligante asfáltico mediante carbonato de sodio (Riedel-Weber), 2017.
- [28] Ministerio de Obras Públicas, «Manual de Carreteras - Volumen VIII, sección 8.202.8: Método para determinar el índice de trituración,» 2017.
- [29] Ministerio de Obras Públicas, «Manual de Carreteras - Volumen VIII, sección 8.202.11: Método para determinar el desgaste mediante la máquina de los ángeles,» 2017.
- [30] Ministerio de Obras Públicas, «Manual de Carreteras - Volumen VIII, sección 8.202.6: Método para determinar la cubicidad de las patículas,» 2017.
- [31] R. Rodríguez, V. Castaño y M. Martínez, «Documento Técnico N° 23: Emulsiones asfálticas,» 2001.
- [32] Laboratorio Nacional de Vialidad, «Curso de Laboratorista Vial, Volumen IV: Ligantes asfálticos y Sellos de Juntas».

- [33] Ministerio de Obras Públicas, «Manual de Carreteras - Volumen VIII, sección 8.301.5: Especificaciones para emulsiones asfálticas catiónicas,» 2017.
- [34] Ministerio de Obras Públicas, «Manual de Carreteras - Volumen VIII, sección 8.004: Glosario de términos,» 2017.
- [35] E. Juárez y A. Rico, de *Mecánica de Suelos - Tomo 1, Fundamentos de mecánica de suelos*, 2005.
- [36] J. Miro, Metodología para la caracterización de ligantes asfálticos mediante el empleo del ensayo Cantabro, 1994, pp. 78-79.
- [37] Ministerio de Obras Públicas, Manual de Carreteras - Volumen VIII, sección 8.202.13: Método para determinar la superficie específica, 2017.
- [38] R. Mercado, C. Bracho y J. Avendaño, Emulsiones asfálticas usos-rompimiento, p. 1.
- [39] International Slurry Surfacing Association, «Technical Bulletin N°113: Test Method for Determining Mix Time for Slurry,» 2017.
- [40] J. Mitchel, Fundamentals of Soil Behavior, 2005.
- [41] M. Flores, J. Gómez y P. Garnica, de *Mejoramiento de la resistencia al deslizamiento por medio de mezclas de agregado*, *Publicación Técnica N° 340*, 2010.
- [42] G. Canavos, Probabilidad y estadística - aplicaciones y métodos, 1998.
- [43] Universidad de Cantabria, [En línea]. Available: <https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1555/course/section/2012/capitulo6.pdf>.
- [44] L. Oliveros, «Evaluación de la adherencia entre capas de pavimento empleando diferentes emulsiones asfálticas,» 2013, p. 97.

## **Anexo 1: Cálculos**

### **Anexo 1.1 Ajuste para determinar las propiedades de la arena natural de acuerdo a las propiedades del árido chancado**

La metodología para poder estimar las propiedades del árido natural desde el punto de vista de la granulometría patrón (árido chancado), consistirá en determinar el aporte porcentual para cada fracción del árido (gruesa y fina), y realizar una relación entre el árido chancado y el árido natural. El objetivo de ello es debido a que gran parte de la determinación de las propiedades se determinan según la fracción de cada árido.

Para ello, se realizará el siguiente procedimiento:

- Separar la fracción gruesa y fina del árido natural.
- Determinar el porcentaje de cada tamiz que pertenecientes en la fracción gruesa y fina, tanto para el árido producto del chancado como el árido natural de canto redondeado.
- Determinar un factor de corrección que relaciona cuánto debe variar la fracción del árido natural de canto redondeado para lograr una granulometría igual al árido producto de chancado, desde el punto de vista porcentual.
- Descomponer las propiedades del árido natural según el porcentaje y multiplicar por el factor de corrección asociado a cada tamiz.
- Sumar para obtener valores asociados a la granulometría a utilizar.

Se presenta la granulometría de la arena natural.

TAMICES		Peso retenido	% retenido	% que pasa
[mm]	ASTM			
12,500	1/2"			
10,000	3/8"			100,0%
5,000	#4	157,5	3,9%	96,1%
2,500	#8	492,5	12,3%	83,8%
1,250	#16	72,0	10,1%	73,7%
0,630	#30	132,5	18,5%	55,2%
0,315	#50	197,0	27,5%	27,7%
0,160	#100	139,5	19,5%	8,2%
0,080	#200	42,0	5,9%	2,3%
R	< #200	2,0		

A partir de la granulometría, contrastado con la granulometría patrón de árido chancado, se determina el factor de corrección según cada tamiz:

TAMICES		Porcentaje retenido Arena natural [%]	Aporte fracción [%]	Porcentaje retenido Árido chancado [%]	Aporte fracción [%]	Factor	Nota
[mm]	ASTM						
12,500	1/2"						Fracción gruesa
10,000	3/8"						
5,000	#4	3,9%	24,1%	10,0%	25,1%	1,044	
2,500	#8	12,3%	75,9%	29,8%	74,9%	0,986	
1,250	#16	10,1%	12,1%	17,6%	29,2%	2,426	Fracción fina
0,630	#30	18,5%	22,1%	12,7%	21,1%	0,956	
0,315	#50	27,5%	32,8%	9,3%	15,4%	0,471	
0,160	#100	19,5%	23,3%	6,4%	10,6%	0,457	
0,080	#200	5,9%	7,0%	3,9%	6,5%	0,920	
R	< #200	2,3%	2,7%	10,3%	17,1%	6,234	

La columna "aporte fracción" corresponde al porcentaje en peso retenido en cada tamiz con respecto a la masa total tanto para la fracción gruesa (retenido por el tamiz #8) como para la fracción fina (que pasa por el tamiz #8). El factor de corrección es una relación entre el aporte a la fracción del árido chancado con el aporte a la fracción de la arena natural.

Los valores obtenidos en los ensayos de densidad y absorción de agua se descomponen por el porcentaje retenido en cada tamiz, y se multiplica por el factor de corrección calculado.

- Fracción gruesa

Propiedades	Valor obtenido	Aporte tamiz				Valor corregido
		1/2"	3/8"	#4	#8	
Densidad real del pétreo saturado superficialmente seco [kg/m <sup>3</sup> ]	2668,9			670,8	1998	2668,8
Densidad real pétreo e seco [kg/m <sup>3</sup> ]	2629,3			660,8	1968,4	2629,2
Densidad neta [kg/m <sup>3</sup> ]	2737,6			688,1	2049,4	2737,5
Absorción de agua [%]	1,5			0,4	1,1	1,5

- Fracción fina

Propiedades	Valor obtenido	Aporte tamiz						Valor corregido
		#16	#30	#50	#100	#200	< #200	
Densidad real del pétreo saturado superficialmente seco [kg/m <sup>3</sup> ]	2489,6	714,3	515,6	377,6	259,8	158,2	716,3	2741,8
Densidad real pétreo e seco [kg/m <sup>3</sup> ]	2481,3	711,9	513,9	376,3	258,9	157,7	713,8	2732,5
Densidad nota [kg/m <sup>3</sup> ]	2502,1	717,9	518,2	379,5	261,1	159	720	2755,7
Absorción de agua [%]	0,3	0,1	0,1	0	0	0	0	0,2

Los valores corregidos se multiplican respectivamente por el porcentaje de la fracción gruesa y fina con respecto al peso de la muestra, determinando finalmente las propiedades de la arena natural con respecto al árido chancado. Nótese que la densidad aparente suelta se determina en base al árido en su conjunto y por lo tanto el valor corregido corresponde a la suma de la multiplicación entre el porcentaje retenido en la arena natural por el factor de corrección para todos los tamices utilizados, cuyo resultado es de 1,000182.

## Anexo 1.2 Resultados de los ensayos para los áridos utilizados

### Anexo 1.2.1 Equivalente de arena

Los resultados de este ensayo se realizaron en base a la Ecuación 2.9:

$$EA = \frac{N_a}{N_t} 100 \quad (\text{Ecuación 2.9})$$

- Árido chancado

	Muestra 1	Muestra 2
Nivel de arena (Nt) [mm]	97	86
Nive de arcilla (Na) [mm]	140	132
Equivalente de Arena [%]	69	65
<b>Promedio [%]</b>	<b>67</b>	

- Arena natural

	Muestra 1	Muestra 2
Nivel de arena (Nt) [mm]	102	110
Nive de arcilla (Na) [mm]	105	116
Equivalente de Arena [%]	97	95
<b>Promedio [%]</b>	<b>96</b>	

### Anexo 1.2.2 Índice de trituración total

Los cálculos se realizaron en base a la Ecuación 2.11 y Ecuación 2.12.

$$IT_p = \frac{B}{A} 100 \quad (\text{Ecuación 2.11})$$

$$IT_t = \sum IT_p \frac{n_i}{100} \quad (\text{Ecuación 2.12})$$

- Árido chancado

Tamaño partícula [mm]	Masa inicial [gr]		Masa que pasa [gr]		Ponderado [%]		Promedio [%]	% Pasa por granulometría
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2		
1,25-2,5	638,6	641,0	16,4	14,3	2,6	2,2	2,4	17,6
0,63-1,25	629,1	639,9	16,7	13,9	2,7	2,2	2,4	12,7
	<b>Total [%]</b>						<b>2,40</b>	

- Arena natural

Tamaño partícula [mm]	Masa inicial [gr]		Masa que pasa [gr]		Ponderado [%]		Promedio [%]	% Pasa por granulometría
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2		
1,25-2,5	634,4	623,6	8,2	11,8	1,3	1,9	1,6	17,6
0,63-1,25	640,3	624,9	6,2	3,8	1,0	0,6	0,8	12,7
	<b>Total [%]</b>						<b>1,25</b>	

### Anexo 1.2.3 Cubicidad de partículas

$$Ch = \frac{B_I + D_I}{A_I} 100 \quad (\text{Ecuación 2.13})$$

$$R = \frac{C_I + E_I}{A_I} 100 \quad (\text{Ecuación 2.14})$$

$$L = \frac{D_I + E_I}{A_I} 100 \quad (\text{Ecuación 2.15})$$

- Árido chancado

Tipo de Partícula	Masa [%]	Porcentaje [%]
Partículas chancadas	496,0	98,8
Partículas rodadas	6,0	1,2
Partículas lajeadas	0,0	0,0
<b>Total</b>	<b>502,0</b>	<b>100,0</b>

- Arena natural

Tipo de Partícula	Masa [%]	Porcentaje [%]
Partículas chancadas	31,0	7,4
Partículas rodadas	389,5	92,4
Partículas lajeadas	1,0	0,2
<b>Total</b>	<b>421,5</b>	<b>100,0</b>

## Anexo 1.3 Propiedades de la emulsión utilizada

Se presenta una copia del informe de laboratorio con las propiedades de la emulsión CSS-1h utilizada y verificar sus condiciones para ser utilizadas en terreno como emulsión para lechadas asfálticas.

ENSAYES	MÉTODO	• ESPECIFICACIÓN		RESULTADO	ESTADO
		Mín	Máx		
<b>Ensayes de la emulsión:</b>					
Viscosidad , Saybolt Furol a 25°C, SFs	8.302.12 (LNV 39)	20	100	38	Cumple
Ensaye de estabilidad en almacenamiento, 24 h, %	8.302.5 (LNV42)	--	1	0,4	Cumple
<b>Capacidad de cubrimiento y Resistencia al agua:</b>					
Ensaye de carga de partícula	8.302.5 (LNV42)		Positiva	Positiva	Cumple
Ensaye de tamizado, % (1)	8.302.5 (LNV42)	--	0,1	0,05	Cumple
Ensaye de mezcla con cemento, %	8.302.5 (LNV42)	--	2,0	0,8	Cumple
<b>Destilación:</b>					
Residuo, %	8.302.5 (LNV42)	57	--	60	Cumple
<b>Ensayes al residuo de la destilación:</b>					
Penetración a 25° C, 100g, 5 s, 0,1 mm	8.302.3 (LNV34)	40	90	75	Cumple
Ductilidad a 25°C, 5 cm/min, cm	8.302.8 (LNV35)	40	--	> 50	Cumple
Solubilidad en tricloroetileno, %	8.302.11 (LNV37)	97,5	--	99	Cumple
<b>Ensaye de la Mancha:</b>					
Heptano/xilol , %, Xilol	8.302.7 (LNV25)	--	25	22	Cumple

## Anexo 1.4 Resultados de la superficie específica y contenido de emulsión teórico

La superficie específica se determinó por medio de la Ecuación 2.1 y el contenido de emulsión teórico de acuerdo a la Ecuación 2.2:

$$\text{Superficie específica} = \frac{0,17a + 0,33b + 2,3c + 12d + 135e}{100} \quad (\text{Ecuación 2.1})$$

a [%]	b [%]	c [%]	d [%]	e [%]
0	10	69,4	10,3	10,3

$$\text{Superficie específica} = 16,77 \left[ \frac{\text{m}^2}{\text{kg}} \right]$$

$$E_t = \frac{4,5 \sqrt[3]{\text{Superficie específica}}}{R} - 1 \quad (\text{Ecuación 2.2})$$

$$R = 0,6 \text{ (Anexo 1.3)}$$

$$E_t = 12,2 \% \approx 12\%$$

## Anexo 1.5 Resultados del ensaye de consistencia

La graduación de los círculos en la base para poder calcular el desplazamiento, ésta tiene una separación de 0,8 centímetros entre círculos. Por lo tanto, el desplazamiento por consistencia será la resultante del promedio de cada medición ( $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$  y  $M_4$ ) restado en 2 centímetros debido a que en esa circunferencia se observó un desplazamiento nulo, multiplicado por un factor 0,8, que relaciona la marca de desplazamiento de la hoja con el desplazamiento real, siendo la corrección observada según la siguiente fórmula:

$$\text{Desplazamiento} = 0,8 \left( \frac{M_1 + M_2 + M_3 + M_4}{4} \right)$$

Porcentaje An [%]	Porcentaje Ac [%]	Medición 1 [cm]	Medición 2 [cm]	Medición 3 [cm]	Medición 4 [cm]	Desplazamiento [cm]
0	100	4	2	5,5	7	2,1
20	80	4	5	4	5	2
40	60	4	4	6	4	2
60	40	5	5	4	4	2
80	20	6	4	4	4	2
100	0	6	5	5,5	2	2,1

## Anexo 1.6 Ensaye de abrasión en medio húmedo

### Anexo 1.6.1 Resultados del ensaye

Los resultados de este ensaye fueron realizados en base a la (b 2.3).

$$AMH = \frac{M_i - M_f}{A} \quad (b\ 2.3)$$

- 100% Árido chancado

Asfalto [%]	Mi [gr]	Mf [gr]	φ Abrasión [cm]	AMH [gr/m2]
10%	1.288,5	1.264,0	23,4	570
12%	1.252,5	1.237,5	23,4	349
14%	958,0	946,0	23,4	279

- 80% Árido chancado, 20% Arena natural

Asfalto [%]	Mi [gr]	Mf [gr]	φ Abrasión [cm]	AMH [gr/m2]
10%	797,5	770,0	23,4	639
12%	1.052,5	1.034,5	23,4	419
14%	1.203,5	1.188,5	23,4	349

- 60% Árido chancado, 40% Arena natural

Asfalto [%]	Mi [gr]	Mf [gr]	φ Abrasión [cm]	AMH [gr/m2]
10%	1.128,5	1.096,0	23,4	756
12%	932,0	914,0	23,4	419
14%	815,5	801,5	23,4	326

- 40% Árido chancado, 60% Arena natural

Asfalto [%]	Mi [gr]	Mf [gr]	φ Abrasión [cm]	AMH [gr/m2]
10%	984,0	947,5	23,4	849
12%	1.155,5	1.136,5	23,4	442
14%	1.250,5	1.238,0	23,4	291

- 20% Árido chancado, 80% Arena natural

Asfalto [%]	Mi [gr]	Mf [gr]	$\phi$ Abrasión [cm]	AMH [gr/m <sup>2</sup> ]
10%	1.124,0	1.088,0	23,4	837
12%	1.011,5	988,5	23,4	535
14%	947,5	930,5	23,4	395

- 100% Arena natural

Asfalto [%]	Mi [gr]	Mf [gr]	$\phi$ Abrasión [cm]	AMH [gr/m <sup>2</sup> ]
10%	1.140,5	1.114,0	23,4	616
12%	982,0	966,0	23,4	372
14%	959,5	947,5	23,4	279

### Anexo 1.6.2 Interpolación de las curvas

Asfalto [%]	Abrasión en Medio Húmedo según el porcentaje de Arena Natural [gr/m <sup>2</sup> ]					
	0%	20%	40%	60%	80%	100%
10,0%	570	639	756	849	837	616
10,5%	501	570	649	723	746	541
11,0%	441	510	557	614	666	475
11,5%	390	460	480	520	595	419
12,0%	349	419	419	442	535	372
12,5%	317	387	373	380	485	335
13,0%	295	365	342	335	445	307
13,5%	282	352	326	305	415	288
14,0%	279	349	326	291	395	279

## Anexo 1.7 Ensaye de rueda de carga

### Anexo 1.7.1 Resultados del ensaye

Los resultados de este ensaye fueron realizados según Ecuación 2.4.

$$S_a = \frac{M_i - M_f}{A} \quad (\text{Ecuación 2.4})$$

- 100% Árido chancado

Asfalto [%]	Mi [gr]	Mf [gr]	Superficie Adherencia [cm <sup>2</sup> ]	Adherencia [gr/m <sup>2</sup> ]
10%	512,5	516,0	135,5	258
12%	462,5	467,0	135,5	332
14%	459,0	464,5	135,5	406

- 80% Árido chancado, 20% Arena natural

Asfalto [%]	Mi [gr]	Mf [gr]	Superficie Adherencia [cm <sup>2</sup> ]	Adherencia [gr/m <sup>2</sup> ]
10%	419,5	423,5	135,5	295
12%	437,5	442,5	135,5	369
14%	473,5	480,5	135,5	517

- 60% Árido chancado, 40% Arena natural

Asfalto [%]	Mi [gr]	Mf [gr]	Superficie Adherencia [cm <sup>2</sup> ]	Adherencia [gr/m <sup>2</sup> ]
10%	537,0	541,0	135,5	295
12%	433,5	438,5	135,5	369
14%	451,0	458,5	135,5	554

- 40% Árido chancado, 60% Arena natural

Asfalto [%]	Mi [gr]	Mf [gr]	Superficie Adherencia [cm <sup>2</sup> ]	Adherencia [gr/m <sup>2</sup> ]
10%	490,0	494,5	135,5	332
12%	578,5	583,5	135,5	369
14%	442,0	449,5	135,5	554

- 20% Árido chancado, 80% Arena natural

Asfalto [%]	Mi [gr]	Mf [gr]	Superficie Adherencia [cm <sup>2</sup> ]	Adherencia [gr/m <sup>2</sup> ]
10%	480,5	486,0	135,5	406
12%	544,0	550,0	135,5	443
14%	478,0	485,0	135,5	517

- 100% Arena natural

Asfalto [%]	Mi [gr]	Mf [gr]	Superficie Adherencia [cm <sup>2</sup> ]	Adherencia [gr/m <sup>2</sup> ]
10%	FALLA (490 pasadas)		135,5	0
12%	FALLA (512 pasadas)		135,5	0
14%	FALLA (594 pasadas)		135,5	0

### Anexo 1.7.2 Interpolación de las rectas

Asfalto [%]	Abrasión en Medio Húmedo según porcentaje de arena natural [gr/m <sup>2</sup> ]					
	0%	20%	40%	60%	80%	100%
10,0%	258	283	277	307	400	0
10,5%	277	310	309	335	414	0
11,0%	295	338	341	363	428	0
11,5%	314	366	374	391	441	0
12,0%	332	394	406	418	455	0
12,5%	351	421	438	446	469	0
13,0%	369	449	471	474	483	0
13,5%	388	477	503	502	497	0
14,0%	406	505	536	529	511	0

## Anexo 2: Fotografías



Ilustración 1 - Secado del material



Ilustración 2 - Tamizado del material



Ilustración 3 - Almacenamiento del material tamizado



Ilustración 4 - Lavado del material

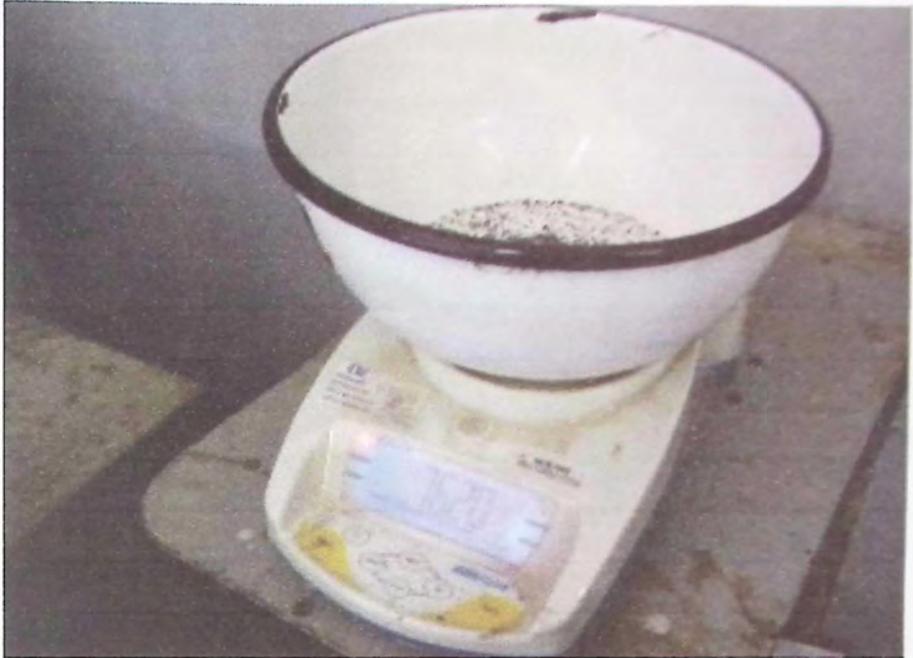


Ilustración 5 - Confección de las muestras, pesado por tamiz



Ilustración 6 - Árido con agua de premezclado



Ilustración 7 - Mezcla de lechada asfáltica con contenido óptimo de emulsión



Ilustración 8 - Moldes para ensayo de rueda de carga



**Ilustración 9 - Moldes para ensayo de abrasión en medio húmedo**



**Ilustración 10 - Muestra de lechada asfáltica sumergida en agua, ensayo de abrasión en medio húmedo**



Ilustración 11 - Probeta sometida al ensaye de rueda de carga



Ilustración 12 - Probeta luego del primer ciclo de cargas