



Universidad de Valparaíso  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Civil

## Uso de RAP para una solución rápida, económica y sencilla en la confección de Caminos Básicos

Por:

Felipe Antonio Tobar Osorio

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

Profesor Guía: Guillermo Brante Lara

Julio, 2019

## *Agradecimientos*

*Agradezco a mis Padres, María y Francisco, por haberme brindado la oportunidad de estudiar, por los consejos, valores y principios que me han inculcado junto con todo el sacrificio, paciencia, amor y apoyo entregado durante este largo proceso.*

*A todos los profesores de la escuela de Ingeniería Civil, por haber compartido sus conocimientos en la preparación de esta bella profesión.*

*A mi profesor guía, don Guillermo Brante, por su apoyo y motivación, y a todos los que me ayudaron a realizar esta ardua investigación.*

*Agradezco a Dios por bendecirnos con la vida, por guiarnos a lo largo de nuestra existencia, ser el apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y de debilidad.*

*Dedicatoria*

*A mis sobrinos*

*Emilia, Elena y Efraín.*

# ÍNDICE

Resumen.....	13
Capítulo I.....	15
1.1 Introducción.....	15
1.2 Planteamiento del problema.....	16
1.3 Objetivos.....	18
1.3.1 Objetivo general.....	18
1.3.2 Objetivos específicos.....	18
1.4 Alcances.....	19
1.5 Metodología.....	20
1.5.1 Método de trabajo con el uso de RAP.....	21
1.5.2 Materiales.....	24
1.5.3 Métodos para la investigación.....	24
1.5.4 Análisis de resultados.....	26
Capítulo II.....	27
Antecedentes generales.....	27
2.1 Infraestructura vial en Chile.....	27
2.2 Progreso Vial 2015 - 2016 - 2017.....	29
2.3 Programa de Caminos básicos.....	33
2.3.1 Caminos con estabilizador.....	33
2.3.2 Capa de protección.....	34
2.4 RAP.....	36
2.5 Emulsión Asfáltica.....	40
2.6 Mezclas en frío.....	43
Capítulo III.....	44
Diseño de la investigación.....	44
3.1 Estudio de los materiales de la mezcla de diseño.....	45
3.1.1 Análisis de la emulsión.....	45
3.1.2 Análisis de las propiedades del RAP de la Ruta E-57.....	46
3.2 Normativa para el diseño de mezclas asfálticas.....	47
3.3 Banda granulométrica de trabajo.....	48
3.4 Óptimo de asfalto para la mezcla según diseño Marshall.....	49
3.4.1 Preparación de las muestras.....	51
3.4.2 Procedimiento de ensaye.....	51
3.4.3 Protocolo de fabricación de probetas Marshall.....	52
3.4.4 Porcentaje de Vacíos en el agregado (VAM).....	53

3.5	Descripción del procedimiento según sección 8.302.51 del volumen N°8 del MC. ..	54
3.5.1	Determinación de contenido inicial de emulsión .....	54
3.5.2	Determinación del contenido de agua para premezcla .....	54
3.5.3	Determinación del contenido óptimo de agua para compactación .....	55
3.5.4	Acondicionamiento de ensaye de compactación .....	56
3.5.5	Contenido óptimo de asfalto residual .....	57
3.5.6	Estabilidad Modificada y Fluencia .....	58
3.5.7	Estabilidad Saturada y Fluencia .....	58
3.5.8	Interpretación de los Resultados .....	58
3.5.9	Contenido Óptimo de Asfalto .....	59
3.5.10	Criterios de Diseño .....	59
3.5.11	Tendencias de los Gráficos Resultantes .....	59
Capítulo IV .....		60
Investigación de Laboratorio .....		60
4.1	Análisis de los componentes de la mezcla de diseño .....	61
4.1.1	Emulsión asfáltica CRS-2 .....	61
4.1.1.1	Modo de uso de Emulsión CRS-2 .....	61
4.1.1.2	Análisis Químico .....	61
4.1.2	Propiedades del RAP .....	62
4.1.2.1	Aspectos visuales del RAP .....	62
4.1.2.2	Granulometría del RAP .....	63
4.1.2.3	Compatibilidad con la banda IV-A-12 .....	64
4.1.2.4	Ensaye de Proctor Modificado .....	64
4.1.2.5	Contenido de asfalto en el RAP .....	65
4.1.2.6	Densidad aparente suelta .....	65
4.1.2.7	Densidad real seca .....	65
4.2	Primer procedimiento .....	67
4.2.1	Confección de probetas Marshall .....	67
4.2.2	Densidad real de mezclas asfálticas compactadas .....	68
4.2.3	Conclusiones referentes al primer procedimiento .....	70
4.3	Segundo procedimiento .....	71
4.3.1	Ajuste a la banda de trabajo .....	71
4.3.2	Dosificación de la mezcla .....	73
4.3.2.1	Contenido de agua de premezcla .....	73
4.3.3	Evaluación de mezclas para estabilidad modificada .....	75
4.3.3.1	Densidad de probetas Marshall .....	75
4.3.3.2	Ensaye de estabilidad modificada .....	75
4.3.3.3	Pérdida de estabilidad .....	76

4.3.4	Fluencia promedio saturada y seca .....	77
4.3.5	Interpretación de resultados.....	78
4.3.6	Conclusiones referentes al primer y segundo procedimiento.....	79
4.4	Tercer procedimiento .....	80
4.4.1	Primera prueba para evaluación de mezclas utilizando emulsiones de quiebre controlado y lento en mezclas con 100% de RAP .....	81
4.4.1.1	Estabilidad en mezclas con 100% de RAP y emulsión CQS y CQS-M.....	82
4.4.1.2	Estabilidad de la mezcla con 100% de RAP y emulsión CSS-1h.....	83
4.4.2	Segunda prueba de RAP con polvo de roca y emulsiones de quiebre lento y controlado.....	84
4.4.2.1	Mezcla con agregado de polvo de roca y emulsión CQS y CQS-M.....	84
4.4.2.2	Mezcla con agregado de polvo de roca y con emulsión CSS-1h.....	86
4.4.3	Conclusiones referentes al tercer procedimiento.....	87
Capítulo V	.....	89
	Procedimiento de prueba a escala real usando emulsiones CSS1-h y CRS-2 con 100% de RAP proveniente de la Ruta 68.....	89
5.1	Diferencias granulométricas de los RAP de la Ruta 68 y la Ruta E-57.....	90
5.2	Procedimiento de prueba con CSS-1h y CRS-2 .....	91
5.2.1	Prueba con CSS-1h.....	91
5.2.2	Prueba con CRS-2 .....	91
5.2.3	Observaciones luego de la prueba .....	92
5.3	Observaciones luego de 2 semanas.....	93
5.4	Conclusiones de la primera prueba a escala real .....	94
Capítulo VI	.....	95
	Conclusiones.....	95
	Recomendaciones .....	98
	Apreciación personal .....	101
Referencias	.....	102
Anexos	.....	104
	Anexo N°1: Certificados de Análisis Químicos.....	105
	Anexo N°2: Densidades del RAP .....	108
	Anexo N°3: Análisis del polvo de roca utilizado en esta investigación .....	108
	Anexo N°4: Ensaye de compactación Proctor de RAP.....	110
	Anexo N°5: Resultados generales de probetas Marshall confeccionadas.....	112
	Anexo N°6: Tabla de cálculo estimativo de longitudes de caminos con 7000 m <sup>3</sup> de RAP .....	118
	Anexo N°7: Imágenes de laboratorio .....	119

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla N°2.1 - Longitud total de caminos Nacionales según categoría.....</i>	<i>27</i>
<i>Tabla N°2.2 - Longitud de caminos Nacionales, Regionales y Provinciales según tipo de camino .....</i>	<i>28</i>
<i>Tabla N°2.3 - Longitud de caminos Comunales y de Acceso según tipo de camino.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabla N°2.4 - Longitud de caminos totales según tipo de camino y año .....</i>	<i>29</i>
<i>Tabla N°2.5 - Dinámica de kilómetros según pavimentados básicos y no pavimentados .....</i>	<i>32</i>
<i>Tabla N°2.6 - Rango típico de tamaño de partículas contenidas en el RAP.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabla N°2.7 - Propiedades más usuales del RAP .....</i>	<i>39</i>
<i>Tabla N°2.8 - Clasificación de las emulsiones.....</i>	<i>41</i>
<i>Tabla N°2.9 - Ventajas y desventajas de las emulsiones.....</i>	<i>41</i>
<i>Tabla N°3.1 - Requisitos de las emulsiones .....</i>	<i>45</i>
<i>Tabla N°3.2 - Estabilidad exigida según normativa.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabla N°3.3 - Banda granulométrica IV - A - 12 Graduación Semidensa.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabla N°3.4 - Graduación del material granular .....</i>	<i>48</i>
<i>Tabla N°3.5 - Tabla representativa de resultados .....</i>	<i>49</i>
<i>Tabla N°3.6 - Índice de vacíos mínimo según tamaño nominal.....</i>	<i>53</i>
<i>Tabla N°3.7 - Criterios de diseño para mezclas en frío.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabla N°4.1 - Análisis químico de la emulsión de quiebre rápido entregados por el proveedor .....</i>	<i>61</i>
<i>Tabla N°4.2 - Granulometría del RAP.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabla N°4.3 - Resumen de resultados del analisis de RAP.....</i>	<i>66</i>
<i>Tabla N°4.4 - Dosificación de agua para primeras mezclas .....</i>	<i>67</i>
<i>Tabla N°4.5 - Densidades utilizando 100% de RAP más emulsión y agua .....</i>	<i>68</i>
<i>Tabla N°4.6 - Banda IV-A-12 comparada con los porcentajes que pasan en la granulometría modificada del RAP.....</i>	<i>72</i>
<i>Tabla N°4.7 - Mezcla de diseño con la incorporación de áridos.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabla N°4.8 - Determinación de contenido de agua para la mezcla.....</i>	<i>74</i>
<i>Tabla N°4.9 - Resultados de Estabilidad Seca.....</i>	<i>75</i>
<i>Tabla N°4.10 - Resultados de Estabilidad Saturada.....</i>	<i>76</i>
<i>Tabla N°4.11 - Pérdida de Estabilidad.....</i>	<i>76</i>
<i>Tabla N°4.12 - Fluencias seca y saturada de mezclas con emulsión CRS-2 .....</i>	<i>77</i>
<i>Tabla N°4.13 - Evaluación según criterios de diseño.....</i>	<i>78</i>
<i>Tabla N°4.14 - Dosificaciones para mezclas con 100% de RAP y emulsión CQS.....</i>	<i>81</i>
<i>Tabla N°4.15 - Dosificaciones para mezclas con 100% de RAP y emulsiones CQS-M y CSS-1h .....</i>	<i>81</i>
<i>Tabla N°4.16 - Resultados de estabilidad con emulsión CQS y 100% RAP.....</i>	<i>82</i>
<i>Tabla N°4.17 - Resultados de estabilidad con emulsión CQS-M y 100% RAP .....</i>	<i>82</i>
<i>Tabla N°4.18 - Resultados de estabilidad con emulsión CSS-1h y 100% RAP .....</i>	<i>83</i>
<i>Tabla N°4.19 - Dosificaciones para mezclas con agregado de polvo de roca .....</i>	<i>84</i>

Tabla N°4.20 - Resultados de estabilidad con emulsión CQS, para mezclas con 70% de RAP más 30% polvo de roca .....	84
Tabla N°4.21 - Resultados de estabilidad con emulsión CQS-M, para mezclas con 70% de RAP más 30% polvo de roca .....	84
Tabla N°4.22 - Resultados de estabilidad con emulsión CSS-1h, para mezclas con 70% de RAP más 30% polvo de roca .....	86
Tabla N°4.23 - Ventajas y desventajas para mezclas con 100% de RAP .....	88
Tabla N°4.24 - Ventajas y desventajas para mezclas con 70% de RAP y 30% de polvo de roca .....	88
Tabla N°5.1 - Tabla de granulometrías de la Ruta 68 y Ruta E-57 .....	90
Tabla N°6.1 - Dosificación final de diseño .....	97
Tabla N°7.1 - Densidad aparente suelta del RAP .....	108
Tabla N°7.2 - Densidad real seca, neta y absorción de agua .....	108
Tabla N°7.3 - Granulometría polvo de roca .....	108
Tabla N°7.4 - Analisis del polvo roca, fraccion gruesa .....	109
Tabla N°7.5 - Analisis del polvo roca, fraccion fina .....	109
Tabla N°7.6 - Densidad real seca, neta y absorción de agua del polvo de roca .....	109
Tabla N°7.7 - Resultados ensaye Proctor Modificado .....	110
Tabla N°7.8 - Resultados de corrección de humedad Proctor .....	110
Tabla N°7.9 - Resultados generales de mezclas con emulsión CRS-2 y 100% de RAP .....	112
Tabla N°7.10 - Continuacion de resultados generales de mezclas con emulsión CRS-2 y 100% de RAP .....	113
Tabla N°7.11 - Resultados generales de mezclas con emulsión CRS-2, con 70 % de RAP y 30% de polvo de roca (HUMEDAD ÓPTIMA) .....	113
Tabla N°7.12 - Resultados de estabilidad seca y estabilidad saturada con emulsión CRS-2, con 70% de RAP más 30% polvo de roca .....	114
Tabla N°7.13 - Resultados de fluencia seca y fluencia saturada con emulsión CRS-2, con 70% de RAP más 30% polvo de roca .....	114
Tabla N°7.14 - Resultados generales de mezclas con emulsión CQS y 100% de RAP .....	115
Tabla N°7.15 - Resultados generales de mezclas con emulsión CQS-M y 100% de RAP .....	115
Tabla N°7.16 - Resultados generales de mezclas con emulsión CSS-1h y 100% de RAP .....	116
Tabla N°7.17 - Resultados generales de mezclas con emulsión CQS, con 70% de RAP más 30% polvo de roca .....	116
Tabla N°7.18 - Resultados generales de mezclas con emulsión CQS-M con 70% de RAP más 30% polvo de roca .....	117
Tabla N°7.19 - Resultados generales de mezclas con emulsión CSS-1h, con 70% de RAP más 30% polvo de roca .....	117
Tabla N°7.20 - Table de cálculo etimativo de longitudes de caminos con 7000 m <sup>3</sup> de RAP .....	118

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N°1.1 - Proyecto vial sustentable .....	15
Figura N°1.2 - Alerta en el río Aconcagua por extracción de áridos, Fuente Terram [3] .....	17
Figura N°1.3 - Esquema de trabajo .....	21
Figura N°1.4 - Maquinarias.....	23
Figura N°1.5 - Metodología de trabajo .....	25
Figura N°2.1 - Distribución de caminos según tipo de pavimento .....	27
Figura N°2.2 - Kilómetros totales entre los años 2010 y 2017, elaboración a partir de datos entregados por el MOP .....	30
Figura N°2.3 - Kilómetros de caminos con solución básica (Capa de protección) 2010-2017, elaboración propia a partir de datos entregados por el MOP .....	30
Figura N°2.4 - Kilómetros totales según tipo de camino.....	31
Figura N°2.5 - Fresadora asfáltica Wirtgen W 250.....	37
Figura N°2.6 - Máquina Recicladora asfáltica para bases estabilizadas (asfalto espumado).37	37
Figura N°2.7 - Prueba con el uso de un 20% de RAP para mezclas en caliente.....	38
Figura N°2.8 - Esquema de emulsiones tipo, elaboración propia.....	42
Figura N°3.1 - Esquema de confección de probetas Marshall .....	52
Figura N°4.1 - Muestra de RAP .....	62
Figura N°4.2 - Cuarteo de muestra de fresado obtenido de la Ruta E-57 (Los Andes), para determinar granulometría y posterior contenido de asfalto en la muestra.....	63
Figura N°4.3 - Granulometría de RAP y banda IV-A-12.....	64
Figura N°4.4 - Probeta disgregada con RAP, agregado granular fino y emulsión CRS-2.....	70
Figura N°4.5 - Granulometría RAP modificada y banda IV-A-12 .....	71
Figura N°4.6 - Ajuste granulométrico final de la mezcla a banda IV-A-12 .....	72
Figura N°4.7 - Gráfico de densidad procedimiento N°2 .....	75
Figura N°4.8 - Estabilidad Saturada / Estabilidad Seca .....	76
Figura N°4.9 - Gráfico de pérdida de estabilidad .....	77
Figura N°4.10 - Gráficos de fluencia saturada y seca con emulsión CSR-2.....	77
Figura N°4.11 - Probeta Marshall con RAP, polvo de roca y emulsión CRS-2 partida en la mitad.....	79
Figura N°4.12 - Esquema de alternativas para la evaluación para el tercer procedimiento...80	80
Figura N°4.13 - Estabilidades conseguidas con emulsiones CQS, CQS-M, CSS-1h.....	83
Figura N°4.14 - Gráfico de estabilidad con el uso de la emulsión CQS-M, para mezclas con 70% de RAP y 30 de polvo de roca .....	85
Figura N°5.1 - Imagen representativa de área de prueba .....	89
Figura N°5.2 - Partícula de RAP, Ruta 68 .....	90
Figura N°5.3 - Imágenes de confección con 100% de RAP, con emulsión CRS-2 y CSS-1h ..91	91
Figura N°5.4 - Testigos de primera prueba realizada luego de dos semanas .....	93
Figura N°5.5 - Compactadora de rodillo de goma finalizando el trabajo .....	94
Figura N°5.6 - Imágenes de las instalaciones del Campamento Pangal luego de dos semanas .....	94

<i>Figura N°7.1 - Certificado de análisis Químico de la emulsión CSS-1h.....</i>	<i>105</i>
<i>Figura N°7.2 - Certificado de análisis Químico de la emulsión CQS.....</i>	<i>106</i>
<i>Figura N°7.3 - Certificado de análisis Químico de la emulsión CQS-M.....</i>	<i>107</i>
<i>Figura N°7.4 - Gráfico de Humedad/Densidad seca.....</i>	<i>110</i>

## Glosario.

**Agregado pétreo:** Materiales granulares sólidos inertes, que se emplean en las capas constituyentes de la estructura de los pavimentos, con o sin adición de elementos activos y con granulometrías adecuadas.

**Material granular:** La materia granular o materia granulada es aquella que está formada por un conjunto de partículas macroscópicas sólidas lo suficientemente grandes para que la fuerza de interacción entre ellas sea la de fricción.

**Polvo de Roca:** Material fino generado por chancadores, apto para ser utilizado en pavimentos asfálticos, puede referirse al árido que es utilizado en lechadas o riego neblina, debido a la granulometría fina del material.

**MOP:** Ministerio de obras públicas.

**DV:** Dirección de vialidad.

**MC:** Manual de Carreteras de Chile.

**Impacto ambiental:** Efecto que produce la actividad humana sobre el medio ambiente.

**Impermeabilidad:** Que no permite el paso de la humedad, el agua u otro líquido.

**Repefilado:** Consiste en una restitución de la geometría y una mejora en la cohesión del material existente en la superficie mediante escarificación con motoniveladora.

**Recebo de granulares:** Consiste en una reposición del material perdido de la carpeta de rodadura.

**Árido virgen:** Árido extraído en depósitos naturales como canteras y ríos.

**Durabilidad:** Tiempo en el que un material mantiene sus propiedades para lo cual fue diseñado. Se entiende por durabilidad como la cualidad o característica de lo durable, aplicado a los objetos o cosas que pueden durar por un tiempo determinado.

**Vida útil:** Tiempo para el cual se estima el diseño de un pavimento, en este periodo se garantiza el buen funcionamiento de la estructura.

**Base:** Es la capa que recibe la mayor parte de los esfuerzos producidos por los vehículos. La carpeta de rodado es colocada sobre de ella, puesto que la capacidad de carga del material

friccionante es baja. Regularmente esta capa además de la compactación necesita otro tipo de mejoramiento (estabilización) para poder resistir las cargas del tránsito sin deformarse y además de transmitir las en forma adecuada a las capas inferiores. El valor cementante en una base es indispensable para proporcionar una sustentación adecuada a las carpetas asfálticas delgadas. En caso contrario, cuando las bases se construyen con materiales inertes y se comienza a transitar por la carretera, los vehículos provocan deformaciones transversales anticipadas.

**Sub-base:** Cumple una cuestión de economía, ya que ahorra dinero al poder transformar un cierto espesor de la capa de base a un espesor equivalente de material de sub-base (no siempre se emplea en el pavimento), impide que el agua de las terracerías ascienda por capilaridad y evitar que el pavimento sea absorbido por la subrasante. Debe transmitir en forma adecuada los esfuerzos a las terracerías.

**Subrasante:** Tiene como función soportar las cargas que transmite el pavimento y darle sustentación, además de considerarse la cimentación del pavimento. Entre mejor calidad se tenga en esta capa el espesor del pavimento será más reducido y habrá un ahorro en costos sin mermar la calidad. Otra de las funciones de la subrasante es evitar que el terraplén contamine al pavimento y que sea absorbido por las terracerías.

**Emulsión asfáltica:** Las emulsiones asfálticas son mezclas de ligante asfáltico con agua, a las cuales se les agrega una pequeña cantidad de algún agente emulsificador.

**Ligante asfáltico:** Los ligantes asfálticos son elaborados a partir del residuo proveniente de la destilación del petróleo crudo de origen importado.

**Agente emulsificador:** Agente que ayuda en la mezcla de dos sustancias que normalmente son poco miscibles o difíciles de mezclar. De esta manera, al añadir este emulsionante, se consigue formar una emulsión.

**Residuo:** Porcentaje de asfalto contenido por cada litro de emulsión.

**Quiebre de la emulsión:** Consiste en la separación entre el agua y asfalto en una emulsión, ya sea por evaporación o fenómenos electroquímicos. Dependiendo del agente emulsificador de la emulsión el tiempo del quiebre puede ser rápido, medio, controlado o lento. Este proceso ocurre en presencia de los áridos durante el proceso de mezclado, pudiéndose identificar al cambiar de color café oscuro a un color negro brillante.

**Tiempo de quiebre:** Tiempo en el que se produce el quiebre y comienza el curado en un sistema emulsión-agregado. Dependerá no sólo de las características de la emulsión, sino que además de algunas características de los agregados o superficie en contacto con la emulsión.

**Curado de la emulsión:** Ocurre en la etapa posterior al quiebre y es el tiempo requerido para que el sistema árido-asfalto esté apto para su uso.

**Estabilidad Marshall:** Valor que indica la capacidad de resistencia máxima para producir la rotura de la probeta con el uso del aparato Marshall. Se limita sólo a las mezclas asfálticas, utilizándose cementos asfálticos de penetración usual, y con agregados de diámetro máximo de una pulgada (2,54 cm.) o menos, logrando conocer la capacidad de resistencia al desprendimiento y cohesión. La medición de este ensaye está en Newton y se utiliza normalmente para analizar el contenido óptimo de ligante asfáltico.

**RAP:** Término dado por sus siglas en inglés, Reclaimed Asphalt Paviment, o en español, pavimento asfáltico recuperado. Es el material que se obtiene luego del proceso de trituración de los caminos mediante el uso de una fresadora asfáltica.

**Caminos básicos:** Programa de Chile implementado en el 2003, el cual consiste en la mejora de caminos sobre el mismo trazado y características actuales, aplicando sobre la superficie de rodadura alguna solución sin cambiar la geometría, de tal manera de disminuir ostensiblemente o eliminar la emisión de polvo al paso de los vehículos. Realizar una obra de mejoramiento integral del camino se hace imposible dados los requisitos de rentabilidad exigidos, producto del bajo tránsito que solicitan caminos no pavimentados, naciendo la necesidad de este programa.

**Solución básica:** Comprende diversas técnicas de bajo costo relativo, tales como estabilizadores naturales y químicos, capa de protección asfáltica, entre otros, y aplicada a la carpeta de rodadura de un camino no pavimentado. Su objetivo es brindar una durabilidad mayor que la obtenida con una conservación tradicional, reduciendo la frecuencia de intervenciones de conservación periódica y rutinaria. También cumple la función de mejorar la rugosidad, disminuir la emisión de polvo y generación de lodo.

**Reciclado:** Procedimiento consistente en la reutilización de materiales que forman parte de obras viales, generalmente con la adición de materiales nuevos. Se aplica principalmente a materiales de bases y pavimentos, especialmente asfálticos, para producir nuevas bases o capa de pavimento.

**Fresado:** Recorte, mediante equipos especialmente diseñados, de un espesor determinado de pavimento de hormigón o mezcla asfáltica.

**Newton (N):** Unidad de medida que indica la cantidad de fuerza aplicada durante 1 segundo a una masa de 1 kg, para que esta adquiera la velocidad de 1m/s respecto a la velocidad colineal que tenía previamente a la aplicación de la fuerza.

## Resumen

Desde la implementación del Programa de Caminos Básicos en el año 2003, se han mejorado más de 14.500 kilómetros de vías mediante una capa de protección o estabilizante granular, generando un beneficio importante en temas de seguridad y conectividad. No obstante, según datos entregados por el Ministerio de Obras Públicas hasta el 2017, cerca del 60% de caminos en Chile siguen sin pavimentar.

Al optar por una solución que conlleve el uso de materiales asfálticos recuperados, y el de una emulsión que permita generar una trabajabilidad adecuada en terreno, se estaría desarrollando una nueva alternativa para el mejoramiento de caminos de ripio, a través de una técnica sencilla y con reducidos costos de implementación.

El proceso de confección que se estudió en esta Memoria de Título consiste en extender el RAP sobre un camino de ripio, dosificarlo con emulsión, mezclarlo con motoniveladoras y volver a extender la mezcla de manera uniforme, para inmediatamente realizar la compactación con máquina compactadora, permitiendo de esta manera una solución rápida y con pronta apertura al tránsito normal de vehículos.

Cabe señalar que en la actualidad no existe una normativa para la dosificación en frío con esta metodología, ni tampoco estudio y manejo apropiado del RAP. La presente investigación se basó en parámetros y métodos propuestos por el Manual de Carreteras de Chile, desarrollando los ensayos pertinentes en el Laboratorio de Vialidad de la Región de Valparaíso y Laboratorio Nacional de Vialidad.

En el proceso de evaluación se requirió de la elaboración de mezclas para probetas Marshall, cuyos contenidos de agua y emulsión fueron variando a medida que se notaban mezclas más homogéneas y trabajables. Sin embargo, se determinó tempranamente que la solución no presentó condiciones óptimas para esta propuesta, ya que se produjo la disgregación instantánea en todas las probetas que se hicieron, luego de extraerlas de la piscina a 60°C para el ensaye de estabilidad. Por lo tanto, en forma secundaria se incorporó un 30% de agregado de polvo de roca para estar dentro de la banda IV-A-12, y así mejorar la adhesión entre las partículas al proporcionar más puntos de contacto dentro de la mezcla, puesto que la granulometría del RAP mostraba bajo contenido de material fino. Se evaluó la mezcla con un 30% de agregado mediante el método de diseño de mezclas en frío con emulsión, descrito en la sección 8.302.51 del Manual de Carreteras, logrando un valor óptimo de estabilidad modificada saturada. Pero se pudo observar en este segundo procedimiento, que a pesar de cumplir con las condiciones de este método, la emulsión de quiebre rápido no permite una cobertura suficiente en los agregados y al igual que en el primer procedimiento, no se pudo lograr una estabilidad Marshall a 60°C. Conjuntamente, el tiempo de quiebre no permite un proceso adecuado de trabajo a escala real y se dio por finalizado el análisis con emulsiones de quiebre rápido.

Para dejar un antecedente de mejor funcionalidad, y también debido al atractivo que implica el uso de materiales reciclados asfálticos para beneficios medio ambientales, aspectos económicos y prácticos, se decidió dar paso a un tercer procedimiento con el uso de otras emulsiones, con el fin de obtener una mejor trabajabilidad y resistencia sin dejar de lado la condición de una propuesta sencilla y económica.

En un último procedimiento se consideró el uso de emulsiones de quiebre lento, quiebre controlado y quiebre controlado modificado con polímeros. Las tres emulsiones mencionadas arrojaron resultados positivos en cuanto a trabajabilidad, cobertura y resistencia. La emulsión de quiebre lento, tuvo un tiempo de quiebre mayor a 4 horas, mientras que la emulsión de quiebre controlado tuvo un tiempo de poco más de 1 hora, cumpliendo en ambos casos con la mayoría de las expectativas planteadas para el desarrollo del trabajo a escala real.

En el transcurso de la investigación, se tuvo la oportunidad de disponer del material fresado proveniente de la Ruta 68, cuya aplicación fue realizada en un área aproximada de 600 m<sup>2</sup> con la misma técnica de confección que se estudió en este proceso de investigación, permitiendo evidenciar de esta manera el comportamiento de las emulsiones CRS-2 y CSS-1h, pudiendo de esta manera reafirmar los resultados y conclusiones que se obtuvieron en los ensayos de laboratorio.

Por lo tanto, mediante ensayos de laboratorio y con el desarrollo de una prueba a escala real, se comprobó y se concluyó que la aplicación de emulsiones de quiebre rápido en mezclas con el uso de RAP, no es la alternativa más apropiada para esta técnica de confección, ya que el uso de emulsiones de quiebre controlado y lento fueron mucho más convenientes de usar, debido principalmente al tiempo de quiebre, resistencia y trabajabilidad que estas emulsiones permiten.

# Capítulo I

## 1.1 Introducción

En el presente Trabajo de Título se desarrolla el estudio de una nueva alternativa de mejoramiento de caminos no pavimentados, con la utilización de material recuperado de caminos asfálticos, descrito más sencillamente como RAP. Esta solución establece un trabajo de confección simple, mediante un procedimiento de rápida apertura para el tránsito normal de vehículos, lo cual abordaría a la vez diversos factores que conllevan a un desarrollo vial sustentable, ya que se generarían beneficios sociales, económicos, estéticos, medio ambientales y también en recursos naturales.

La investigación tiene como meta principal, obtener la dosificación de emulsión óptima para la elaboración de carpetas de rodado con el uso de RAP, mediante un trabajo en terreno sobre caminos de ripio para generar una mayor durabilidad y seguridad en este tipo de vías, y también contribuir en la reducción del uso de áridos nuevos.

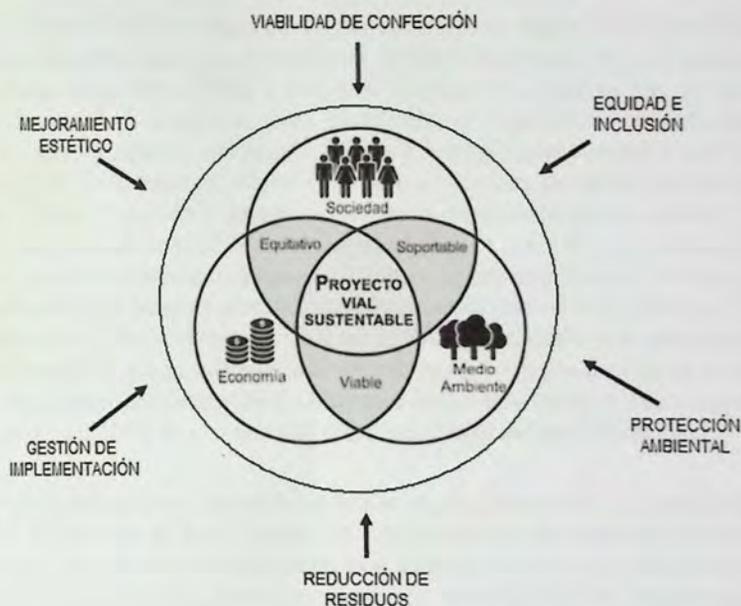


Figura N°1.1 - Proyecto vial sustentable

## 1.2 Planteamiento del problema

Según informes realizados en 2017 por la Dirección de Vialidad (DV) del Ministerio de Obras Públicas (MOP), Chile posee una red vial conformada por más de 85 mil kilómetros de caminos totales para tránsito vehicular, siendo hasta entonces un 59% de caminos a base de ripiaduras, reperfilados y recebos de material granular entre otros [1]. Tales obras no pavimentadas, si bien solucionan el problema de conectividad, presentan una baja serviciabilidad, baja durabilidad y elevados costos de conservación. También se perjudica a la comunidad al generar excesos de polvo en verano, barro en invierno y se producen efectos nefastos sobre el medio ambiente, consecuencia de la extracción de áridos desde ríos o pozos de empréstito para la constante reposición del material desgastado [2].

Desde otro punto de vista, los caminos pavimentados son estructuras que se utilizan permanentemente, sufriendo como en ningún otro tipo de estructura un daño constante e inevitable con el pasar de los años, debido principalmente por la ininterrumpida carga vehicular y/o factores climatológicos, causando una dinámica de renovación y mantención importante, lo cual genera grandes cantidades de material asfáltico triturado.

El pavimento asfáltico recuperado o por sus siglas en inglés RAP (Reclaimed Asphalt Pavement), es el término dado por materiales de pavimento extraídos y/o procesados de nuevo, siendo un material de alta calidad y con gran potencial de reutilización, ya que contiene partículas chancadas, homogéneas, bien distribuidas y compuestas de agregados pétreos cubiertos de cemento asfáltico endurecido. Es usado generalmente para relleno de bases con el uso de máquinas recicladoras de asfalto y también en mezclas en caliente confeccionadas en planta para carpetas de rodado, mediante un desarrollo de implementación costoso y usando un porcentaje muy reducido de RAP dentro de la mezcla [4]. No obstante, las inmensas cantidades de RAP que se producen siguen quedando en la espera de pocas opciones de utilidad, generando enormes volúmenes en desuso y destinándolos únicamente para rellenos. Sólo en la Ruta 68 se generaron durante el año 2018 más de 7.000 m<sup>3</sup> de RAP [5], el cual puede estar disponible para más alternativas de las que ya existen y también para la solución que se propone en este Trabajo de Título, lo que permitiría desarrollar 6 kilómetros de caminos bidireccionales mejorados, si se considera el uso del 100% de este material como reemplazo del árido tradicional.

Un problema adicional que se ha generado en los últimos años, a causa de la constante mantención de caminos, la gran cantidad de kilómetros que aún están sin pavimentar y las diversas obras civiles que están en progreso, es el aumento excesivo en la extracción de áridos, los cuales en su mayoría son obtenidos de cauces naturales que en muchos casos no son autorizados y/o regularizados, generando y manteniendo un importante deterioro ambiental.



*Figura N°1.2 - Alerta en el río Aconcagua por extracción de áridos, Fuente Terram [3]*

Para efectos de la presente investigación, se desarrolla una solución a estas problemáticas con la utilización de material de pavimentos asfálticos recuperados, mediante una propuesta que consiste en incorporar este material en una nueva mezcla asfáltica, cuya confección es realizada en terreno por medio de una emulsión, permitiendo de esta manera una implementación relativamente inmediata y de bajo costo. Esta propuesta establece que el material conserva gran parte de las propiedades mecánicas que se exigen, y considera también, que es factible usar una emulsión para el desarrollo de una carpeta de rodadura como una alternativa nueva en la elaboración de caminos básicos.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo general

- Evaluar el uso de RAP en una nueva propuesta de mezclas para carpetas de rodado con emulsión, mediante una técnica sencilla, económica y de rápida confección para caminos básicos.

### 1.3.2 Objetivos específicos

- Analizar las propiedades del RAP y de los materiales constituyentes de la mezcla de diseño.
- Abordar las características necesarias para esta metodología y establecer los ensayos más apropiados para un correcto análisis.
- Establecer la dosificación para una resistencia óptima y que genere al mismo tiempo, una correcta trabajabilidad en el proceso de mezclado y compactación.
- Estudiar diferentes alternativas, ya sea con o sin agregado de materiales pétreos, y también con el uso de distintas emulsiones, para dar a conocer la mejor elección en esta técnica con el uso de RAP.
- Definir la dosificación de diseño en la mezcla con el uso de RAP.
- Generar una propuesta válida para reducir el uso de áridos vírgenes que se ocupan en la reposición de material para caminos de ripio.
- Proveer caminos de mayor estándar y funcionalidad que las de un camino de ripio, al aumentar la movilidad, accesibilidad, seguridad y otorgar más comodidad en el tránsito de vehículos.
- Obtener datos y procedimientos de análisis como referencia para futuras investigaciones con otros tipos de RAP y con esta misma metodología.

## 1.4 Alcances

- Se considera en este Trabajo de Título, la evaluación de una solución económica y de rápida implementación para caminos básicos, con el uso de material fresado (RAP), cuya única procedencia es de la Ruta E-57.
- Se considera en el análisis de laboratorio, mezclas asfálticas con un 100% de RAP más emulsión y agua, realizando el mezclado de forma manual.
- Se considera en el análisis de laboratorio, una mezcla asfáltica con un determinado porcentaje de agregado pétreo, para ajustarse a la banda IV-A-12, banda granulométrica usual para carpeta de rodadura de tráfico ligero establecida en la sección 5.409 del volumen N°5 del MC, y de esta manera realizar un análisis comparativo entre las mezclas.
- El RAP es tratado como un árido común en el proceso de esta investigación, no sometándolo al calentamiento excesivo (inferior a 65°C), para evitar la reactivación del asfalto que contiene y no cambiar las propiedades con las que este material es usado.
- Las emulsiones que se utilizan para la mezcla de diseño son de quiebre rápido (CRS-2), de quiebre controlado (CQS), de quiebre controlado modificado con polímero (CQS-M), y de quiebre lento (CSS-1h), incluyéndose en esta Memoria de Título los aspectos químicos (Anexo N°1).
- El espesor de la capa de rodado no es determinado en los análisis de esta Memoria de Título, pero se considera una carpeta lo suficientemente gruesa (mínimo 10 cm.) para asegurar una adecuada funcionalidad, sin considerar en este espesor, el aporte estructural que pudiese obtenerse.
- El terreno sobre el cual sería implementado la solución es de ripio previamente compactado y sin ningún tratamiento adicional, es decir, sin estabilizadores ni tampoco imprimación asfáltica.
- No se considera el análisis económico en esta investigación.
- Las máquinas que se necesitan para la técnica propuesta en esta Memoria de Título son: camión regador, motoniveladora, compactadora de tambor vibratorio, compactadora de rodillo de goma.
- Los ensayos correspondientes son realizados en el Laboratorio de Vialidad de la Región de Valparaíso y Laboratorio Nacional de Vialidad.

## 1.5 Metodología

El procedimiento para determinar el diseño de una carpeta de rodado con el uso de RAP es realizado según lo establecido en las recomendaciones e indicaciones para mezclas asfálticas en frío, definidas en la sección 5.409 del volumen N°5 del MC, donde también se mencionan métodos evaluativos y bandas de trabajo para desarrollar un análisis comparativo y consistente con esta nueva solución de caminos básicos.

El estudio comienza con el análisis de los materiales constituyentes de la mezcla, principalmente en las características del RAP, tales como su composición granulométrica, densidades y contenido asfáltico. Las características propias de las emulsiones se obtienen desde el análisis químico, cuyos valores se encuentran dentro del informe que entrega la empresa fabricante, conteniendo también antecedentes de gran importancia para la realización de las mezclas, entre los cuales se detallan porcentaje de residuo y temperaturas adecuadas de empleo.

Durante el proceso evaluativo es de especial interés el comportamiento que existe en el proceso del mezclado, ya que es en este paso donde se conocen valores de gran importancia para el diseño de esta solución, tales como el tiempo de quiebre, homogeneidad de la mezcla, capacidad de cubrimiento de la emulsión y trabajabilidad, los cuales son aspectos que se determinan de forma visual.

Se establece que una trabajabilidad adecuada se obtiene a través de una correcta capacidad de cubrimiento de emulsión sobre el RAP, en un tiempo de quiebre compatible al tiempo de trabajo que requiere esta solución en terreno (sobre 1 hora) y que permita además, generar una mezcla que logre una cierta capacidad de adherencia entre las partículas de RAP.

En una segunda instancia, se considera la adopción de una banda granulométrica para carpetas de rodadura de tráfico ligero, es decir, vías locales y pasajes [6], ocupando material granular extra para lograr estar dentro de los rangos de la banda, con la finalidad de evaluar el uso del RAP con y sin material agregado mediante los ensayos de la sección 8.302 del volumen N°8 del MC, que refieren a métodos de muestreo, ensayo y control de mezclas asfálticas.

### 1.5.1 Método de trabajo con el uso de RAP

Se considera en el diseño un único procedimiento de confección, el cual consiste en las siguientes etapas:

1. Extender el RAP uniformemente con motoniveladoras sobre el camino de ripio previamente compactado.
2. Según la dosis de diseño de emulsión y agua, dosificar a la temperatura adecuada mediante el uso de camión regador sobre el RAP.
3. Mezclar los contenidos mediante el uso de una motoniveladora.
4. Repetir el punto 2 y 3 hasta lograr una mezcla homogénea y con la dosis correcta de diseño.
5. Volver a extender el material ya mezclado utilizando nuevamente la motoniveladora.
6. Compactar hasta lograr una superficie uniforme y lisa, con el uso del compactador de tambor vibratorio y finalizando con compactadora de rodillos de goma.

Esquema de solución:

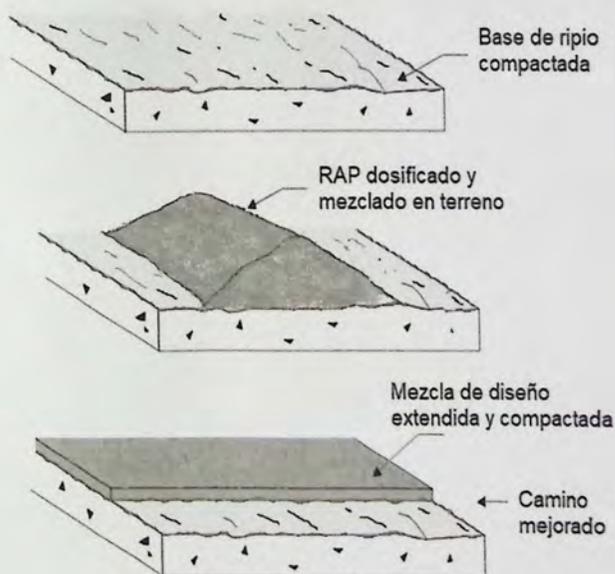


Figura N°1.3 - Esquema de trabajo

Este procedimiento estaría desarrollando una transición progresiva en la mejora de caminos, desde un camino de ripio común de baja serviciabilidad, hasta un camino convencional, otorgando la posibilidad de dar una solución durable, eficiente y con mayores cualidades que las de un camino de ripio que además de reducir la constante extracción de áridos desde cauces naturales, conlleva a los siguientes beneficios:

- Disminución del volumen de material fresado a botaderos.
- Reducción de costos en pavimentación en maquinaria necesaria y extracción de áridos nuevos.
- Disminución en los tiempos de intervención en el camino al generar una solución de rápida implementación.
- Disminución en las importaciones de los productos asociados a la obra (disminución del porcentaje de cemento asfáltico).
- Ahorro energético en la producción, en relación con caminos convencionales.
- Reducción importante de polvo en verano y barro en invierno, lo que genera también vías más seguras.

A continuación se muestra el equipo necesario para desarrollar la técnica descrita anteriormente.



Camión regador de asfalto



Motoniveladora



Compactador de tambor vibratorio



Compactador rodillo de goma

*Figura N°1.4 – Máquinas necesarias para el desarrollo de esta propuesta*

## 1.5.2 Materiales

Los materiales para el desarrollo de esta investigación son proporcionados por el Laboratorio de Vialidad de la Región de Valparaíso, Laboratorio Nacional de Vialidad y empresas distribuidoras de emulsión. Los materiales son:

- Material fresado (Para el estudio, las muestras provienen de material entregado por trabajos viales de la Ruta E-57, comuna Los Andes).
- Emulsión asfáltica de quiebre rápido, CRS-2.
- Emulsión asfáltica de quiebre lento, CSS-1h.
- Emulsión asfáltica de quiebre controlado, CQS.
- Emulsión asfáltica de quiebre controlado, CQS-M (modificada con polímeros).
- Material granular fino (polvo roca).
- Equipamiento de laboratorio.

## 1.5.3 Métodos para la investigación

Para caracterizar el RAP se toman en cuenta los siguientes métodos:

- Método para determinar granulometría, descrito en la sección 8.202.3 del volumen N°8 del MC.
- Método para encontrar el contenido de asfalto en el RAP, descrito en la sección 8.302.56 del volumen N°8 del MC.
- Método para determinar densidad aparente suelta, descrito en la sección 8.202.19 del volumen N°8 del MC.
- Método para determinar densidad real seca, descrito en la sección 8.202.20 del volumen N°8 del MC.
- Método para determinar la relación humedad densidad según Ensaye Proctor modificado, descrito en la sección 8.102.7 del volumen N°8 del MC.

Para caracterizar la mezcla de diseño se cuenta con los siguientes métodos:

- Método de diseño para mezclas en frío con emulsión, descrito en la sección 8.302.51 del volumen N°8 del MC.
- Método para determinar la densidad real de mezclas asfálticas compactadas, descrito en la sección 8.302.38 del volumen N°8 del MC.
- Método para determinar la resistencia a la deformación plástica de mezclas asfálticas utilizando el aparato Marshall, descrito en la sección 8.302.40 del volumen N°8 del MC.

La metodología se ordena en el siguiente diagrama de flujo:

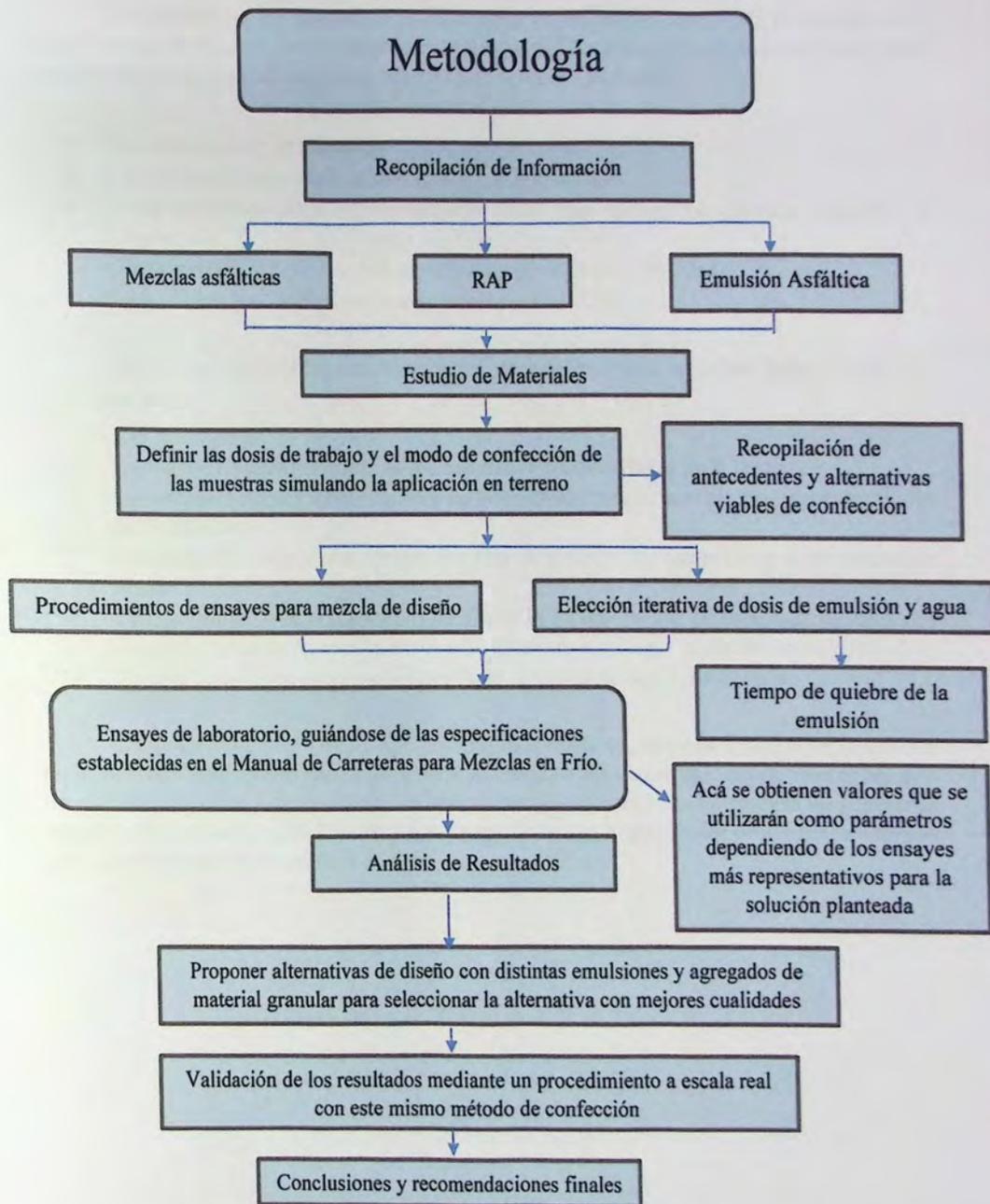


Figura N°1.5 - Metodología de trabajo

### 1.5.4 Análisis de resultados

Los análisis de los resultados se concentran en las propiedades tanto positivas como negativas que se obtengan en las mezclas confeccionadas. Idealmente, la mezcla de diseño debe cumplir con todos los requisitos que necesita esta solución, es decir:

- Generar una mezcla trabajable.
- Con adecuada capacidad de cubrimiento de la emulsión.
- Tener un tiempo de quiebre suficiente como para realizar un correcto mezclado y compactado.
- Obtener una dosis que permita una máxima resistencia y densidad.
- Cumplir con las condiciones que se establecen en el MC.

Para lograr cumplir los requisitos anteriormente descritos, se deben llevar a cabo los siguientes puntos:

- Estudio de las características de los materiales constituyentes de la mezcla.
- Los análisis visuales serán cruciales para desarrollar un correcto diseño y procedimiento de confección.
- Desarrollo de ensayos más apropiados para caracterizar los materiales y la propuesta de diseño.
- Generar un análisis comparativo mediante la incorporación de agregado de material granular, ya sea filler, arena o grava para ajustarse a la banda de diseño correspondiente.
- Generar un análisis comparativo mediante el uso de distintas emulsiones.

Las propiedades del RAP, el tipo y origen de la emulsión, como también las proporciones en la que estos se disponen dentro de la mezcla, son aspectos que se evalúan en todo el proceso de esta investigación. Los resultados de laboratorio se analizan con el propósito de generar la mezcla más adecuada, según la dosis y tipo de emulsión que logre el valor de óptima resistencia para el mejoramiento de caminos de ripio.

## Capítulo II

### Antecedentes generales

A continuación, se expondrán los antecedentes requeridos y necesarios para validar el propósito de esta investigación, entre los cuales se encuentran temas relacionados al mejoramiento de caminos, infraestructura vial actual, análisis de tendencias constructivas en obras viales, RAP y emulsiones.

#### 2.1 Infraestructura vial en Chile

La red vial en Chile está compuesta por una longitud total de 85.220,9 kilómetros, datos entregados por el Departamento de Gestión Vial hasta diciembre del año 2017 [7], los cuales han sido registrados en base a la información recibida en terreno, a los levantamientos con tecnología GPS que ha realizado la DV y a la homologación de las redes viales. Las tablas que se muestran a continuación son generadas en base a el documento de “Dimensionamiento y Características de la Red Vial Nacional”, desarrollado por el Departamento de Gestión Vial de la Subdirección de Desarrollo de la DV, en el cual resume la longitud de la Red Vial Nacional de acuerdo con los distintos tipos de pavimento que existen.

Tipo de pavimento	Red Vial Pavimentada				Soluciones Básicas		Red Vial no Pavimentada	
	Asfalto	Hormigón	Asfalto/Hormigón	Básicos Intermedios	Capa de Protección	Granular Estabilizado	Ripio	Tierra
Kilómetros	17.776,85	1.879,12	533,83	392,44	8.457,83	5.820,98	34.535,79	15.824,02
%	20,86%	2,21%	0,63%	0,46%	9,92%	6,83%	40,53%	18,57%
Total 100%	85220,86 kilómetros							

Tabla N°2.1 - Longitud total de caminos Nacionales según categoría

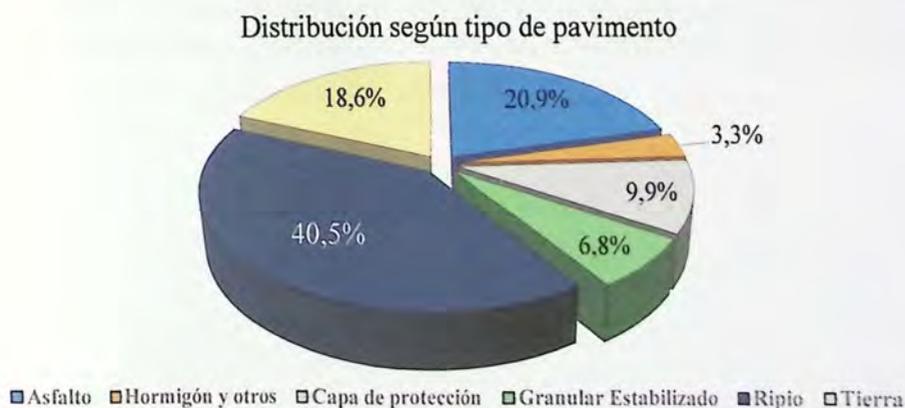


Figura N°2.1 - Distribución de caminos según tipo de pavimento

La distribución de caminos nacionales, regionales y provinciales los cuales suman en total 26.919,5 kilómetros, se presentan según el tipo de pavimento en el siguiente cuadro:

Tipo de pavimento	Red Vial Pavimentada				Soluciones Básicas		Red Vial no Pavimentada	
	Asfalto	Hormigón	Asfalto/Hormigón.	Básicos Intermedios	Capa de Protección	Granular Estabilizado	Ripio	Tierra
Kilómetros	14.865,60	1.629,73	533,83	162,44	1.562,74	1.899,95	4.817,26	1.447,99
%	55,22%	6,05%	1,98%	0,60%	5,81%	7,06%	17,90%	5,38%
Total 100%	<b>26919,5 kilómetros</b>							

Tabla N°2.2 - Longitud de caminos Nacionales, Regionales y Provinciales según tipo de camino

Por último, la distribución de caminos comunales y de acceso, los cuales suman en total 58.301,35 kilómetros, se presentan según el tipo de pavimento en el siguiente cuadro:

Tipo de pavimento	Red Vial Pavimentada				Soluciones Básicas		Red Vial no Pavimentada	
	Asfalto	Hormigón	Asfalto/Hormigón.	Básicos Intermedios	Capa de Protección	Granular Estabilizado	Ripio	Tierra
Kilómetros	2.911,26	249,40	0	230	6.895,10	3.921,03	29.718,53	14.376,03
%	4,99%	0,43%	0,00%	0,39%	11,83%	6,73%	50,97%	24,66%
Total 100%	<b>58301,35 kilómetros</b>							

Tabla N°2.3 - Longitud de caminos Comunales y de Acceso según tipo de camino

Nota: Los tipos de superficies de rodadura denominadas Capas de Protección, corresponden a una Solución Básica con aplicación de una capa asfáltica de protección (tratamiento superficial simple, doble riego de neblina, lechada asfáltica), en tanto que las Capas Granulares Estabilizadas corresponden a una Solución Básica que se caracteriza por la aplicación de un ligante o estabilizador de suelos, cuya función es mantener la cohesión en la matriz pétre a través de incorporación de químicos. Los caminos de Asfalto/Hormigón son aquellos caminos mixtos cuyas calzadas se presentan con pistas de diferente capa de rodadura.

## 2.2 Progreso Vial 2015 - 2016 - 2017

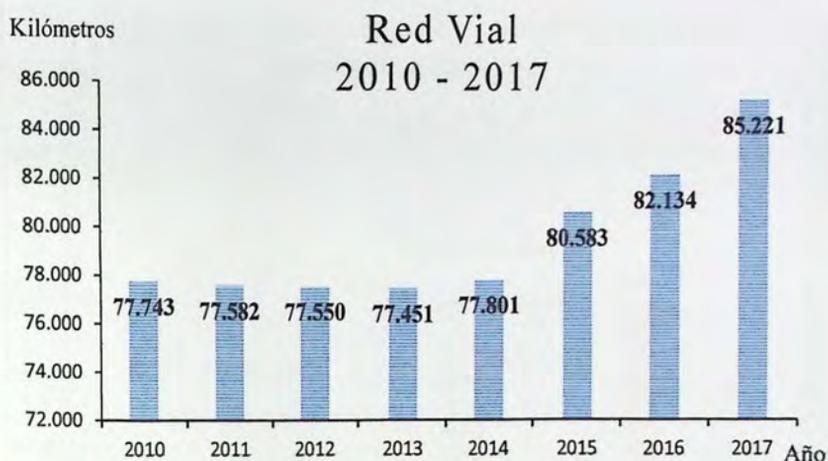
En la siguiente tabla se ordenan los valores correspondientes a las longitudes en kilómetros de caminos pavimentados, no pavimentados y aquellos que se implantó una solución básica entre los años 2010 y 2017.

Tipo de pavimento	Red Vial Pavimentada				Soluciones Básicas		Red Vial no Pavimentada		TOTAL
	Asfalto	Hormigón	Asfalto/ Hormigón	Básicos Intermedios	Capa de Protección	Granular Estabilizado	Ripio	Tierra	
Kilómetros 2010	15.573	2.055	499	0	3.595	5.465	32.720	17.836	77.743
Kilómetros 2011	16.068	1.839	509	0	3.824	5.455	32.209	17.678	77.582
Kilómetros 2012	16.278	1.821	522	0	4.362	5.475	31.791	17.302	77.550
Kilómetros 2013	16.514	1.878	521	152	5.160	5.326	31.081	16.820	77.451
Kilómetros 2014	16.975	1.846	527	207	5.813	5.516	30.543	16.374	77.801
Kilómetros 2015	17.164	1.890	527	269	6.505	5.753	32.202	16.273	80.583
Kilómetros 2016	17.545	1.874	533	367	7.255	5.588	32.837	16.134	82.134
Kilómetros 2017	17.777	1.879	534	392	8.458	5.821	34.536	15.824	85.221

Tabla N°2.4 - Longitud de caminos totales según tipo de camino y año, elaboración a partir de datos entregados por el MOP

Desde el año 2014, la cantidad de kilómetros totales ha tenido un aumento importante, siendo los caminos de ripio y caminos básicos los que más han participado en este crecimiento.

Según datos entregados por la DV, se muestra a continuación, los kilómetros de caminos totales que han sido registrados por cada año:



*Figura N°2.2 - Kilómetros totales entre los años 2010 y 2017, elaboración a partir de datos entregados por el MOP*

A partir del año 2010, los kilómetros en los que se han implementado una capa de protección mediante una solución básica han ido incrementando constantemente, promediando 695 kilómetros por año. El siguiente gráfico muestra el aumento progresivo de esta solución:



*Figura N°2.3 - Kilómetros de caminos con solución básica (Capa de protección) 2010-2017, elaboración propia a partir de datos entregados por el MOP*

El siguiente gráfico muestra la evolución de caminos nuevos pavimentados, no pavimentados y aquellos que se aplicó una solución básica, según el tipo de pavimento entre los años 2014 y 2017:

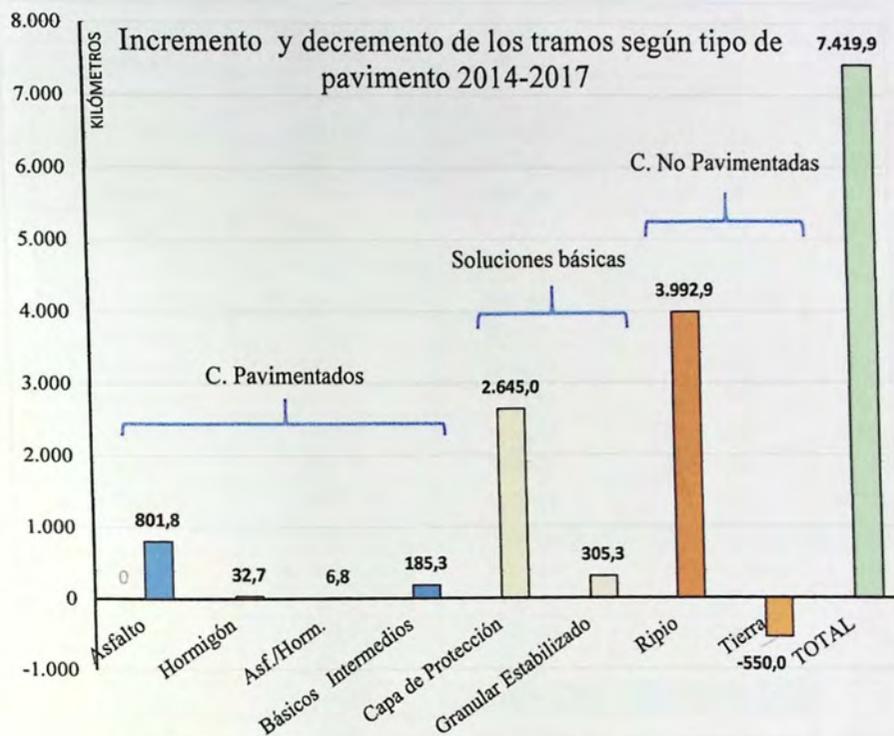


Figura N°2.4 - Kilómetros totales según tipo de camino, elaboración propia a partir de datos entregados por el MOP

La cantidad de caminos nuevos totales es de 7.419,9 kilómetros, pudiéndose observar que las soluciones de caminos básicos junto con los caminos nuevos a base de ripio son los que más han incrementado la cantidad total de caminos en este periodo de tiempo.

Según sea camino nacional, regional, provincial, comunal o de acceso, la variación de las longitudes entre los años 2014 y 2017 son las siguientes:

Longitud en kilómetros 2014					
	Tipo de Camino	Pavimentados	Básicos	No pavimentados	Total
A	Nacionales	9102,19	780,85	1424,85	11307,89
B	Regionales	5161,14	747,07	2498,97	8407,18
C	Provinciales	2644,48	1118,06	2714,92	6477,46
D	Comunales	2227,91	<b>5873,31</b>	<b>18570,65</b>	26671,87
E	Acceso	289,6	<b>2809,24</b>	<b>21698,96</b>	24797,8
	Total	19564,13	11328,53	46908,35	77801,01
Longitud en kilómetros 2017					
	Tipo de Camino	Pavimentados	Básicos	No pavimentados	Total
1	Nacionales	9353,89	824,62	1251,5	11430,01
2	Regionales	5779,11	1323,11	2718,03	9820,25
3	Provinciales	2058,61	1314,95	2295,71	5669,27
4	Comunales	3095,95	<b>7881,92</b>	<b>25573,48</b>	36551,35
5	Acceso	294,71	<b>2934,2</b>	<b>18521,08</b>	21749,99
	Total	20582,27	14278,8	50359,8	85220,87
Diferencia 2017 - 2014					
	Diferencia	Pavimentados	Básicos	No pavimentados	Total
	A - 1	251,7	43,77	-173,35	122,12
	B - 2	617,97	576,04	219,06	1413,07
	C - 3	-585,87	196,89	-419,21	-808,19
	D - 4	868,04	<b>2008,61</b>	<b>7002,83</b>	9879,48
	E - 5	5,11	124,96	-3177,88	-3047,81
	Total	1018,14	2950,27	3451,45	7419,86
	%	13,7%	39,8%	46,5%	100%

Tabla N°2.5 - Dinámica de kilómetros según pavimentados, básicos y no pavimentados (elaboración propia)

Se puede destacar en base a los datos de la tabla N°2.5, que el aumento de kilómetros es notablemente mayor en las soluciones básicas y caminos no pavimentados, siendo estos dos de tipo comunal. Los caminos comunales, normalmente tienen una baja densidad de tránsito, por lo tanto son caminos candidatos para implantar una solución básica y también, candidato ideal para implantar la propuesta en estudio.

Desde otro punto de vista, estos datos ayudan a visualizar la extensa longitud de caminos que pueden ser mejorados con la solución que se plantea en esta Memoria de Título, dándole un propósito aún mayor a esta investigación.

## 2.3 Programa de Caminos básicos

El MOP, mediante de la DV, implementó en el año 2003 el programa “Caminos Básicos”, el cual consiste en mejorar las condiciones de servicio de aquellas carpetas de rodadura en base de rípios, y que deben esperar muchos años para la pavimentación convencional de asfalto producto de su bajo tránsito. Esta mejora de caminos se realiza sobre el mismo trazado y características que posee una carpeta deteriorada o de base granular compactada, logrando una superficie más confortable al aplicar sobre la base una solución sin mejorar la geometría, cambiando la forma tradicional de conservar la red vial no pavimentada del país a un modo más económico y sencillo.

La cobertura con esta solución ha ido aumentando paulatinamente con metas autoimpuestas por el nivel central. El MOP amplió los recursos destinados al programa en un 10% durante el 2017, con el fin de cumplir la meta de 15.000 kilómetros de caminos básicos para el periodo 2014-2018 [8].

En los Caminos Básicos se interviene la capa de rodadura para:

- Evitar el polvo.
- Mejor comodidad.
- Mayor durabilidad.
- Evitar desgaste del material de carpeta y por consiguiente, una reposición frecuente.
- Evitar extracción excesiva desde las fuentes de áridos.

Para esto se emplea dos tipos de intervención, los cuales son:

- Aplicación de Estabilizadores/Inhibidores de Polvo.
- Aplicación de una capa delgada de asfalto (Capa de protección).

### 2.3.1 Caminos con estabilizador

Consiste en la aplicación de materiales que permiten mantener cohesionados los componentes de la carpeta, ya sea por reacciones químicas y/o por mantener a estos permanentemente húmedos. Esto evita la liberación de polvo al paso de los vehículos, aplicándose masivamente en la zona norte del país. Los más empleados son el cloruro de sodio (sal) y el cloruro de magnesio hexahidratado (Bischofita). En lo que respecta a las técnicas de conservación de este tipo de solución, se distinguen las siguientes operaciones:

**Bacheo granular:** Se aplica cuando la carpeta de rodadura presenta baches aislados. La operación consiste básicamente en extraer el material necesario, rellenar con material granular mezclado con la sal y compactar. Esto se encuentra especificado en el volumen N°7 del MC, tópico 7.306.3b.

**Riego superficial:** Se trata de una conservación preventiva, restituyendo el cloruro superficial que se ha perdido por el tránsito. Se aplica con camión aljibe y requiere que la superficie se encuentre con una buena regularidad superficial (sin calaminas, deformaciones ni baches). Esta operación se aplica para la Bischofita, que es el cloruro que mejor se disuelve en agua formando una salmuera. En el caso del cloruro de sodio es difícil lograr una disolución adecuada y se está planteando una nueva operación que consiste en colocar la sal en estado sólido sobre la superficie, para luego regar con agua sobre ella. El riego superficial no está especificado en el volumen N°7 del MC.

**Reperfilado con compactación:** Cuando se tienen deformaciones longitudinales (ahuellamiento) y transversales (calaminas) se requiere restituir la geometría original y la cohesión del material de la superficie, por lo que se debe realizar la operación de reperfilado con compactación, la que consiste en escarificar con motoniveladora hasta una profundidad de unos 3 a 5 cm del espesor de la carpeta de rodadura, reperfilarse, agregar el estabilizador y compactar. Su especificación se encuentra establecida en 7.306.1d del volumen N°7 del MC.

**Recebo granular con adición de cloruro:** Si el material de la carpeta de rodadura se ha desgastado, llegando a tener un espesor remanente muy bajo (2 a 3 cm), se debe reponer el material perdido. La operación consiste en escarificar la superficie, agregar el material granular de reposición en el que se debe incluir la sal (a granel o disuelta, según corresponda) y compactar. Su especificación se encuentra en el tópico 7.306.4f del volumen N°7 del MC.

**Solución con cloruro de calcio:** El cloruro de calcio se emplea como solución no asfáltica en la Región del Bío Bío, con el objetivo de eliminar el polvo en la temporada estival. Se debe aplicar a fines de cada año y consiste en el riego de una solución al 33-38 % de concentración, sobre una superficie reperfilada y compactada, a una tasa entre 1,5 y 2,0 litros por metro cuadrado.

### 2.3.2 Capa de protección

Es otra forma de solucionar los problemas de los caminos de ripio y se basa en colocar una capa que mantenga el material estable a través de una protección con mezcla asfáltica, sin ser parte de la estructura que soporta a los vehículos. Las técnicas para este tipo de capas se describen a continuación.

**Riego de neblina:** empleado para rejuvenecer superficies, sellar pequeñas fisuras y grietas de ancho pequeño. Es un riego de asfalto líquido del tipo emulsión asfáltica de quiebre lento, diluida en agua en proporción 1:1 y a una tasa entre 0,5 a 1,9 kg por metro cuadrado.

**Lechada asfáltica:** además de rejuvenecer la carpeta asfáltica, detiene el desgaste superficial y mejora la fricción entre pavimento y neumático. La lechada es una mezcla de emulsión asfáltica de quiebre lento, agua, arena y eventualmente un relleno fino-filler, para adicionar la fracción fina que pueda faltar. Se aplica en condiciones bastante fluidas, lo que

permite ingresar en grietas y nivelar fácilmente. La lechada asfáltica en sí también es una de las soluciones básicas descritas.

**Sello de agregados:** se aplica con los mismos objetivos que las lechadas asfálticas. Se trata de un tratamiento superficial simple, es decir, un riego de una emulsión de quiebre rápido seguido de un riego de gravilla de tamaño máximo de 10 milímetros. Al igual que en el caso anterior, el tratamiento superficial simple en sí es una de las soluciones básicas mencionadas. Cuando el tratamiento se aplica sobre una base granular se denomina tratamiento superficial simple, y cuando se aplica para conservar una capa asfáltica se le denomina sello de agregados o sello tipo tratamiento superficial simple.

**Cape Seal:** Este método corresponde a una combinación de un tratamiento superficial simple, pero con la diferencia de que en su superficie posee una lechada asfáltica, los cuales tienen como objetivo rellenar la textura rugosa y abierta del tratamiento superficial (este sello se encuentra especificado en la sección 5.404 del MC).

**Otta Seal:** Es un caso particular de sello de agregados. En Chile se ha aplicado sólo a nivel experimental. Al igual que en los tratamientos superficiales, se le puede aplicar sobre una superficie antigua, bajo las mismas condiciones que las que se aplica sobre una base granular. La ventaja es que se logra una mejor adherencia al regar un ligante asfáltico a una temperatura sobre los 150° C.

La decisión de cuál solución colocar depende de diversos factores, tales como cantidad y tipo de tránsito, clima y geometría del camino.

## 2.4 RAP

El RAP, por sus siglas en inglés Reclaimed Asphalt Paviment, o en español Pavimento Asfáltico Recuperado, es un material que se compone por partículas granulares, chancadas y envueltas en asfalto, siendo en la mayoría de las ocasiones un asfalto duro y envejecido. Este material contiene una gran cantidad de agregados pétreos de alta calidad, por lo tanto, es un producto con gran potencial de reutilización.

Se obtiene principalmente de los pavimentos asfálticos superficialmente deteriorados, dañados, o envejecidos, de los cuales es necesario realizar un proceso de demolición o trituración para remover deformaciones o imperfecciones de la rasante, dejando una superficie texturizada que sirva de base para una nueva colocación de mezcla asfáltica.

El equipo que tritura y retira el material se denomina máquina fresadora, la cual es autopropulsada con potencia propia, conteniendo la tracción y estabilidad suficientes para mantener con exactitud el espesor de corte y pendiente transversal del pavimento del resto de la calzada, permitiendo establecer con exactitud y automáticamente el espesor de corte a ambos extremos frontales de la máquina, tomando como referencia el pavimento existente por medio de un sistema de patines o zapatos que ayudan a generar una correcta lisura longitudinal y pendiente transversal. Cuenta además con una cinta transportadora que traslada el material fresado durante el avance de la máquina a un camión tolva. La mezcla asfáltica extraída se transporta generalmente a un acopio o botadero, previamente propuesto por el contratista de la obra y aprobado por la Inspección Técnica de Obras (I.T.O).

Según lo indicado en el capítulo N°12 del Manual de Obras de Vialidad, Pavimentación y Aguas Lluvias, el fresado del pavimento se ejecuta a la temperatura ambiente, sin recurrir al impacto de martillos, uso de solventes o ablandadores que puedan afectar la granulometría de los agregados pétreos y las propiedades del asfalto existente, además, en la extracción se mantiene humedecido para controlar la generación de polvo durante el fresado y se evita la contaminación del material removido con agentes extraños al mismo.

Las características y las propiedades del RAP varían según los materiales constituyentes, existiendo diferencias sustanciales en este tipo de material, ya sea en la calidad del agregado, tamaños, tipo de mezcla asfáltica (capa de rodadura, capa de base, etc.) y profundidad de fresado (superficial, profundo, total o parcial). También factores climatológicos le dan una característica singular a cada RAP, ya que dependiendo de la condición climática, el pavimento se puede reseca o humedecer en exceso, generando distintos tipos de deterioro para distintas condiciones ambientales.

Considerando los miles de kilómetros de caminos pavimentados que constantemente se reacondicionan debido al permanente uso, se generan volúmenes significativos de RAP, el cual es acopiado por extensos periodos para su reutilización, destinándolo principalmente en rellenos para bases estabilizadas.



*Figura N°2.5 - Fresadora asfáltica Wirtgen W 250*

La reutilización con este material ha crecido durante los últimos años, principalmente con el uso de máquinas recicladoras asfálticas para bases estabilizadas en un proceso denominado “asfalto espumado”, permitiendo usar el 100% del material existente.



*Figura N°2.6 – Máquina Recicladora asfáltica para bases estabilizadas*

También, según lo establecido en la sección 5.423 del volumen N°5 del MC, es permitido incorporar hasta un 20% de RAP en mezclas en caliente para carpetas de rodado, mediante el uso de máquina finisher y con una mezcla procesada en planta, generando resultados positivos al disminuir la dosis de asfalto en la mezcla, ya que aprovecha el asfalto existente en el RAP y también ahorra cierto porcentaje de árido virgen. Sin embargo, este trabajo que se ha desarrollado en caminos tales como en la Ruta F-50, sector Lo Orosco-Quilpué en el año 2012, sólo aprovecha un 20% de RAP dentro de la mezcla de diseño [9], además, debido a la cantidad de áridos nuevos y maquinaria que se necesita en este proceso, sigue siendo una alternativa con un costo elevado y de difícil confección.



*Figura N°2.7 – Prueba con el uso de un 20% de RAP en mezclas en caliente, Ruta F-50*

El asfalto contenido en el RAP se encuentra típicamente en el rango de 4% a 6% [10] y el asfalto adherido al agregado es más rígido que el asfalto nuevo, producto de la oxidación o envejecimiento natural del pavimento.

#### **Ventajas y desventajas:**

Entre las principales ventajas del empleo del material fresado, con la solución que se propone en este Trabajo de Título, tenemos:

- Desde un punto de vista ambiental, se ve beneficiado al evitar por una parte la explotación de cauces naturales disminuyendo la cantidad de empréstitos existentes, y por otra parte se evita la acumulación de material fresado en sitios de usos públicos.
- Es un proceso de construcción de una capa asfáltica que ahorra más energía que el convencional, al necesitar menos maquinaria para su implementación.
- Se economizan honorarios profesionales en la búsqueda de materiales de la zona, que de acuerdo a las normas, sirvan para la construcción de una estructura multicapa, así como en la supervisión de la construcción de una capa de pavimento.
- Se reduce el costo por adquisición de materiales de agregado a cero, a la par de que se evita el transporte tanto para el bote del material fresado, como el propio de la mezcla asfáltica.

Las desventajas son:

- Falta de una metodología para determinar con precisión el grado de mezclado entre emulsión y RAP.
- Gastos en investigación para un correcto manejo de este material.
- Menor trabajabilidad y capacidad de compactación de la mezcla.
- Variabilidad en las fuentes de RAP (Granulometría, contenido de asfalto, etc.).

### Propiedades típicas del RAP:

De acuerdo con los estudios realizados en Estados Unidos por la "Federal Highway Administration", se presenta a continuación los rangos típicos de tamaños de partículas contenidas en el RAP luego del fresado.

Tamiz	Porcentaje que pasa luego del fresado
37.5 mm (1.5 in)	100
25 mm (1.0 in)	95 - 100
19 mm (3/4 in)	84 - 100
12.5 mm (1/2 in)	70 - 100
9.5 mm (3/8 in)	58 - 95
75 mm (No. 4)	38 - 75
2.36 mm (No. 8)	25 - 60
1.18 mm (No. 16)	17 - 40
0.60 mm (No. 30)	10 - 35 <sup>a</sup>
0.30 mm (No. 50)	5 - 25 <sup>b</sup>
0.15 mm (No. 100)	3 - 20 <sup>c</sup>
0.075 mm (No. 200)	2 - 15 <sup>d</sup>
a. Normalmente menos del 30 por ciento b. Normalmente menos del 20 por ciento c. Normalmente menos del 15 por ciento d. Normalmente menos del 10 por ciento	

Tabla N°2.6 - Rango típico de tamaño de partículas contenidas en el RAP

A continuación se muestra el resumen de las propiedades más usuales del RAP (elaboración propia a partir de datos entregados por "Federal Highway Administration"):

Propiedades del RAP	Rango de valores típicos
Densidad	1940 - 2300 (kg/m <sup>3</sup> )
Contenido de humedad	Normal: 5 % Máximo: 8 %
Contenido de asfalto	Normal: 4,5 - 6 % Máximo: 3 - 7 %
Penetración de betún	10 - 80 dmm a 25°C
Índice de penetración	Cercano a cero
Punto de ablandamiento	65 a 70°C
Viscosidad absoluta de betún	4000 - 25000 poises a 60°C

Tabla N°2.7 - Propiedades más usuales del RAP, elaboración propia

## 2.5 Emulsión Asfáltica

Las emulsiones asfálticas son ligantes líquidos compuestas por cemento asfáltico, agua y aditivo emulsificador. El aditivo emulsificador es un agente químico (sales de amonio, amina grasa entre otros), el cual cumple dos importantes funciones que son:

- Proporcionar un material homogéneo y estable entre los compuestos que contiene, eliminando la tensión de interfase entre el agua y asfalto, generándose de este modo un fluido manipulable y que permite, con la dosis adecuada, una excelente trabajabilidad para mezclas asfálticas.
- Genera la condición de quiebre rápido, medio, lento o controlado.

A diferencia de otros tipos de mezclas asfálticas sin emulsificante, el proceso de curado ocurre luego de la separación entre el asfalto y el agua, fenómeno que se denomina rompimiento o quiebre de la mezcla, siendo en esta instancia cuando se cumple con el objetivo final de adhesión entre el compuesto asfáltico y el material pétreo. Su uso se ha ampliado con el pasar de los años debido a que no producen contaminación, ya que el solvente que se evapora es agua.

El tiempo de quiebre puede ser variable, puesto que influyen aspectos tales como:

- Tipo de árido.
- Condiciones ambientales.
- Agua contenida en la mezcla.
- Tipo y contenido de aditivo emulsificador.
- Temperatura de aplicación.

Las emulsiones asfálticas pueden ser clasificadas de acuerdo con la carga del emulsificante, y que pueden ser las que se indican a continuación:

- Aniónica.
- Catiónica.
- No aniónica (sin carga).

Clasificación de la emulsión de acuerdo con el tiempo de ruptura:

- Emulsión de quiebre lento o en inglés, slow setting (SS).
- Emulsión de quiebre medio o en inglés, medium setting (MS).
- Emulsión de quiebre rápido o en inglés, rapid setting (RS).
- Emulsión de quiebre controlado, o en inglés quick setting (QS).

Clasificación de emulsión de acuerdo con la ruptura y carga de particula:

Velocidad de quiebre	Catiónica	Aniónica	Aplicaciones
Rápida (Riegos)	CRS	SS	Tratamientos superficiales
Media	CMS	MS	Mezclas abiertas
Lenta	CSS	SS	Mezclas densas y Lechadas
Controlado	CQS	-	Mortero asfáltico

Tabla N°2.8 - Clasificación de las emulsiones

En la siguiente tabla se muestran las ventajas de las emulsiones.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ahorro de materiales (aplicaciones y mezclas en frío de bajo espesor, tales como tratamientos superficiales simples, dobles y triples).</li> <li>• Ahorro energético (los agregados pétreos se trabajan en frío, no se requiere de planta de asfalto).</li> <li>• Rapidez del proceso constructivo.</li> <li>• Menor tiempo de intervención en la vía.</li> <li>• Menor requerimiento de recursos humanos y de maquinaria.</li> <li>• Seguridad de manipulación (se trabajan a bajas temperaturas y no emiten gases tóxicos).</li> <li>• Son productos amigables con el medio ambiente, debido a que tienen viscosidades considerablemente más bajas que las del asfalto puro, por lo que puede usarse a menor temperatura.</li> <li>• La preparación de la emulsión a temperatura ambiente evita la oxidación del ligante asfáltico.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si se sobrecalientan o congelan pueden romperse anticipadamente y volverse inusables.</li> <li>• No son compatibles con asfaltos cortados ni entre otras emulsiones.</li> <li>• Las emulsiones aniónicas y catiónicas son incompatibles, no deben mezclarse.</li> <li>• Necesita de condiciones climáticas adecuadas para su uso.</li> </ul>

Tabla N°2.9 - Ventajas y desventajas de las emulsiones

### Emulsiones para el desarrollo de esta Investigación:

**CRS-2:** Emulsión catiónica de quiebre rápido. Se usa en obras viales que requieren periodos muy cortos de curado, principalmente para tratamientos superficiales simples y dobles, como también para sellos de conservación de caminos o carreteras con cierto grado de desgaste.

**CSS-1h:** Emulsión asfáltica catiónica de quiebre lento, de residuo duro y se aplica principalmente en relleno de juntas, lechadas asfálticas o como riego por penetración de pavimentos de hormigón o asfalto. Su modo de aplicación es en frío.

**CQS:** Emulsión catiónica de quiebre controlado, de residuo duro, su gran ventaja frente a las emulsiones de quiebre lento, al aplicarlas en lechadas asfálticas, es la rápida apertura al tránsito (1-2 horas). Se usa también, para la fabricación de sellos superficiales de conservación denominado Slurry seals (lechadas asfálticas) en una mezcla que se fabrica con arena, agua y filler tipo cemento o cal.

## Emulsiones modificadas con polímeros

Las emulsiones asfálticas modificadas con polímeros son aquellas a las que se le incorporan plastómeros o elastómeros, mejorando las propiedades del asfalto en términos de elasticidad, resistencia a la tracción y susceptibilidad térmica. No varía su comportamiento ante bajas y altas temperaturas y son usadas generalmente para tecnologías en frío, especialmente para riegos de liga de alta prestación, tratamientos superficiales en base a gravillados, lechadas y microaglomerados asfálticos en frío. Se identifican con una sigla “M” al final de su nombre.

Otras observaciones:

- Los números que acompañan el nombre de la emulsión indican el grado de viscosidad a cierta temperatura medida en Saybolt Furol (SFs). La viscosidad es determinada por el porcentaje de residuo contenido en la emulsión [11].
- Los requisitos de la emulsión CSS-1h y CQS son idénticas.
- La letra “h” indica que se trata de un residuo asfáltico duro.
- Las emulsiones de quiebre medio no tienen actualmente un uso en particular.
- El aditivo emulsificante varía entre 0,5 y 2 % dentro del contenido de la emulsión [12].
- Cuando se usan emulsiones catiónicas o aniónicas del tipo RS o MS, el mecanismo de quiebre es a través de fenómenos electroquímicos. Por otro lado, al utilizar emulsiones del tipo SS o QS, el mecanismo de quiebre se basa en la evaporación del agua, lo que hace que el tiempo de ruptura sea más prolongado.

A continuación, se muestra un esquema explicativo para determinar el nombre de cada emulsión:

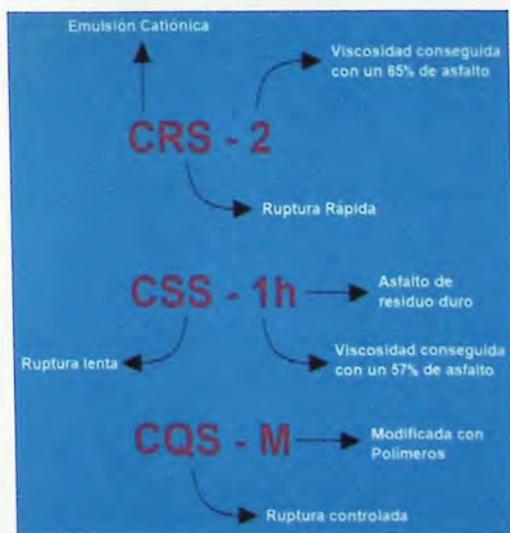


Figura N°2.8 - Esquema de emulsiones, elaboración propia

## 2.6 Mezclas en frío

Consiste en una mezcla de agregado mineral no calentado y emulsión asfáltica o asfaltos cortados. Se pueden usar como carpeta de rodado para caminos de tráfico medio y ligero.

No existe un método de diseño universalmente aceptado para mezclas asfálticas en frío y por lo general se basan en modificaciones de otros [13], por lo tanto, los procedimientos de diseño con emulsión se relacionan con la Humedad-Estabilidad y la influencia de la humedad en la afinidad con el agregado de emulsión, parámetros que han sido estudiados por ingenieros del laboratorio nacional de vialidad y que han establecido a través del tiempo este método, el cual aborda la evaluación de los siguientes puntos:

- Determinación del contenido de emulsión.
- Determinación del contenido de agua de premezcla.
- Determinación del contenido de agua a compactar.

En el volumen N°5 del MC, específicamente en la sección 5.409, se describen los alcances y las indicaciones para mezclas asfálticas en frío, señalando dos procedimientos según el tipo de graduación. Si la granulometría de la mezcla es de graduación gruesa se diseñan según el método 8.302.51, mientras que para una mezcla de graduación abierta se designa el método ubicado en la sección 8.302.48 del volumen N°8 de MC.

Las principales variables que pueden influir en la mezcla de diseño son:

- Tipo de emulsión, ya sea por cantidad de residuo asfáltico, aditivo emulsificante o modificación polimérica.
- Graduación de la mezcla.
- Tipo de agregados.
- Condiciones climáticas.

Observación: En la sección 8.302.51 del volumen N°8, se describe el método para mezclas asfálticas en frío con emulsión, refiriéndose a una granulometría densamente graduada y no a una granulometría de graduación gruesa. En la sección 5.409 del volumen N°5 del MC no están las bandas relacionadas a una granulometría gruesa. La propuesta en estudio se asemeja en gran medida a una mezcla asfáltica en frío, por lo tanto, se tomarán los parámetros y requisitos asociados a este tipo de mezclas y por medio de este método.

## **Capítulo III**

### **Diseño de la investigación**

Basándose en los antecedentes descritos, el método de confección y el propósito de esta solución, se menciona a continuación los parámetros y procedimientos elegidos para comprender las características de la mezcla de diseño.

Se considera en el análisis mezclas con 100% de RAP o con agregados pétreos (agregados pétreos adecuados para mezclas asfálticas), evaluando a la vez distintas alternativas para el desarrollo de esta técnica, con el fin de seleccionar la emulsión y dosis que permita conseguir las propiedades óptimas que requiere este procedimiento de rápida implementación.

### 3.1 Estudio de los materiales de la mezcla de diseño

#### 3.1.1 Análisis de la emulsión

La siguiente tabla muestra los requisitos químicos que deben cumplir las emulsiones CRS-2, CSS-1h, CQS y CQS-M, de acuerdo con lo descrito en la sección 8.301.5 y 8.301.7 del volumen N°8 del MC:

Requisitos para Emulsión tipo CRS-2			
ENSAYOS	NORMA	MIN	MAX
Viscosidad Saybolt Furol a 50°C (sSF)	8.302.12	100	400
Estabilidad al Almacenamiento, 1 día (%)	8.302.5	-	1
Demulsibilidad (%)	8.302.5	40	-
Carga de Partícula	8.302.5	Positiva	
Tamizado (%)	8.302.5	-	0,1
Residuo por Destilación (%)	8.302.5	65	-
Aceite (%)	8.302.5	-	3
Penetración a 25°C, 100gr, 5 s (1/10 mm)	8.302.3	100	250
Ductilidad a 25°C, 5cm/min. (cm)	8.302.8	40	-
Solubilidad en Tricloroetileno (%)	8.302.11	97,5	-
Ensayo de la Mancha (%Xilol)	8.302.7	-	30
Requisitos para Emulsiones de tipo CSS-1h y CQS			
ENSAYOS	NORMA	MIN	MAX
Viscosidad Saybolt Furol a 25°C (sSF)	8.302.12	20	120
Estabilidad al Almacenamiento, 1 día (%)	8.302.5	-	1
Mezcla con cemento (%)	8.302.5	-	2
Carga de Partícula	8.302.5	Positiva	
Tamizado (%)	8.302.5	-	0,1
Residuo por Destilación (%)	8.302.5	57	-
Penetración a 25°C, 100gr, 5 s (1/10 mm)	8.302.3	40	90
Ductilidad a 5°C, 5cm/min. (cm)	8.302.8	40	-
Solubilidad en Tricloroetileno (%)	8.302.11	97,5	-
Ensayo de la Mancha (%Xilol)	8.302.7	-	30
Requisitos para Emulsión de tipo CQS modificada con polímeros			
ENSAYOS	NORMA	MIN	MAX
Viscosidad Saybolt Furol a 25°C (sSF)	8.302.12	20	50
Sedimentación a 7 días	8.302.5	-	5
Carga de Partícula	8.302.5	Positiva	
Tamizado retenido N°20 (%)	8.302.5	-	0,1
Residuo por Destilación (%)	8.302.5	62	-
Penetración a 25°C, 100gr, 5 s (1/10 mm)	8.302.3	40	90
Punto de ablandamiento	8.302.16	Informar	
Ductilidad a 25°C, 5cm/min. (cm)	8.302.8	40	-
Recuperación elástica por torsión	NTL 329	20	-
Índice Fraass	8.302.7	-	-17

Tabla N°3.1 - Requisitos de las emulsiones, elaboración propia

Como se puede apreciar en la tabla, las emulsiones CQS y CSS-1h tienen los mismos requisitos, siendo las principales variaciones las que se mencionan a continuación:

- Contenido de residuo.
- Agente aditivo emulsificador.

### **3.1.2 Análisis de las propiedades del RAP de la Ruta E-57**

El análisis del RAP se realizará de acuerdo con los siguientes puntos:

- Aspectos visuales.
- Granulometría según lo descrito en la sección 8.202.3 del volumen N°8 del MC.
- Contenido asfáltico según lo descrito en la sección 8.302.56 del volumen N°8 del MC.
- Densidad máxima según ensaye Proctor modificado según lo descrito en la sección 8.102.7 del volumen N°8 del MC.
- Densidad aparente suelta según lo descrito en la sección 8.202.19 del volumen N°8 del MC.
- Densidad real seca según lo descrito en la sección 8.202.20 del volumen N°8 del MC.

### 3.2 Normativa para el diseño de mezclas asfálticas

Para determinar la viabilidad de esta solución y definir la dosis de diseño, se trabaja con parámetros y métodos de evaluación de mezclas asfálticas en frío. Los procedimientos de diseño de una mezcla asfáltica en frío se indican en la sección 5.409 del volumen N°5 del MC, teniendo en cuenta dos métodos que dependen de la graduación, ya sea gruesa o abierta, determinados por la banda granulométrica de trabajo. Uno de los parámetros que se exigen para carpetas de rodadura es la estabilidad Marshall, cuyo valor debe ser consistente con la siguiente tabla.

TIPO DE MEZCLA	ESTABILIDAD (N)
ASFALTCA	Mín.
Rodadura	9.000
Intermedia	8.000
Base Gruesa	6.000
Superficie Fina	4.000

Tabla N°3.2 – Estabilidad exigida según normativa (extraída del volumen N°5 del MC)

Los métodos utilizados para esta solución son los que se describen en las secciones 8.302.40 y 8.302.51 del volumen N°8 del MC.

### 3.3 Banda granulométrica de trabajo

La banda de trabajo que se utiliza para esta investigación es la IV - A - 12 de graduación semidensa, la cual se indica en la tabla 5.409.201.B del volumen N°5 del MC, y es la que habitualmente se usa en carpetas de rodadura para tráfico ligero. Por lo tanto, es indispensable determinar la granulometría del RAP y establecer su graduación.

La banda IV - A - 12 se muestra a continuación:

DENOMINACIÓN		IV - A - 12
TAMICES		% QUE PASA EN PESO
(mm)	(ASTM)	
20	3/4"	100
12,5	1/2"	80 - 95
10	3/8"	70 - 85
5	N°4	43 - 58
2,5	N°8	28 - 42
0,63	N°30	13 - 24
0,315	N°50	8 - 17
0,16	N°100	6 - 12
0,08	N°200	4 - 8

Tabla N°3.3 - Banda granulométrica IV - A - 12 Graduación Semidensa (extraída del volumen N°5 del MC)

La graduación de la mezcla se establece según el siguiente cuadro:

Tipo de Graduación	Porcentaje que pasa el tamiz N°8
Abierta	5 - 20
Gruesa	20 - 35
Semidensa	<b>28 - 42</b>
Densa	35 - 50

Tabla N°3.4 - Graduación del material granular

### 3.4 Óptimo de asfalto para la mezcla según diseño Marshall

Este método se encuentra descrito en la sección 8.302.40 del volumen N°8 del MC, el cual determina la resistencia a la deformación plástica de mezclas asfálticas utilizando el aparato Marshall.

El ensaye de estabilidad Marshall está pensado para simular las condiciones más desfavorables que puede experimentar una carpeta de rodado, por lo tanto, es de especial interés el desarrollo de este ensaye, para conocer en un primer procedimiento, el comportamiento de la mezcla de diseño con el uso de RAP.

El contenido de emulsión adecuado es determinado por los valores máximos de densidad y estabilidad, en base al promedio de 3 probetas representativas por cada dosis usada. Los valores para el análisis de estabilidad van de acuerdo con la siguiente tabla:

Emulsión	Agua de premezcla	Estabilidad (Newton)			Promedio	Valor Corregido
		Valor 1,1	Valor 1,2	Valor 1,3		
4%	Porcentaje apropiado de agua para generar correcta distribución de la emulsión en el agregado	Valor 2,1	Valor 2,2	Valor 2,3	Promedio 1	Corrección 1
5%		Valor 3,1	Valor 3,2	Valor 3,3	Promedio 2	Corrección 2
6%		Valor 4,1	Valor 4,2	Valor 4,3	Promedio 3	Corrección 3
7%		Valor 5,1	Valor 5,2	Valor 5,3	Promedio 4	Corrección 4
8%					Promedio 5	Corrección 5

Tabla N°3.5 - Tabla representativa de resultados

La corrección se realiza según la altura de la probeta y los coeficientes que se indican en la tabla 8.302.40.A del volumen N°8 del MC, y también se corrige mediante la calibración determinada por la máquina Marshall usada.

Los instrumentos que se requieren son los que se describen a continuación:

- Moldes de Compactación: Constituidos por una placa base, molde y collar. El molde debe tener un diámetro Interior de  $101,6 \pm 0,1$  mm y una altura de 80 mm; la placa base y el collar se diseñan de modo de poder ajustarse a cualquier extremo del molde.
- Extractor: Que sirva para sacar las probetas del molde; debe estar provisto de un disco desplazador de 100 mm de diámetro por 10 mm de espesor.

- **Martillo de Compactación:** Consiste en una cara circular de 100 mm de diámetro equipada con un peso de  $4.515 \pm 15$  g y construido de modo de obtener una altura de caída  $460 \pm 2$  mm. Las condiciones señaladas aseguran la obtención de una energía por caída de 20, 75 J.
- **Pedestal de Compactación:** Consiste en un poste de madera de 205 x 205 x 455 mm cubierto con una placa de acero de 305 x 305 x 25 mm. El poste va empotrado en hormigón mediante cuatro perfiles de ángulo; debe quedar a plomo y la placa de acero debe quedar firmemente afianzada y a nivel. El poste puede ser de roble, pino u otra madera que tenga una densidad seca media de 0,67 a 0,77 gr/cm<sup>3</sup>.
- **Sujetador de Molde:** Consiste en un aro con resorte diseñado para mantener centrado y fijo el molde en el pedestal durante la compactación.
- **Mordaza:** Consiste en dos segmentos de cilindro, superior e inferior, con un radio Interno de  $51 \pm 0,2$  mm, diseñado transmitir la carga a la probeta en el ensaye.
- **Máquina Marshall:** Aparato eléctrico, diseñado para aplicar carga a las probetas durante el ensaye, a una velocidad de deformación de  $50 \pm 1$  mm/min. Está equipada con un anillo de prueba calibrado para determinar la carga aplicada, de una capacidad superior a 25 (kN) y una sensibilidad de 45 (N) con un dial graduado de 0,0025 mm y un medidor de flujo con una precisión de 0,01 mm. Para determinar la deformación que se produce en la carga máxima. Se puede emplear también esta máquina equipada con sensor y registrador de estabilidad versus fluencia.
- **Hornos:** Horno de convección forzada y placas calientes, que deben incluir un termostato capaz de controlar y mantener la temperatura requerida dentro de  $\pm 3$  °C.
- **Baño de Agua:** De a lo menos 150 mm de profundidad y controlado termostáticamente a  $60 \pm 1$  °C, el cual será modificado a  $22,2 \pm 1,1$  °C. El estanque debe tener un fondo falso perforado y un termómetro centrado y fijo.

#### Equipo Misceláneo:

- Bol, para mezclar el asfalto y agregado.
- Espátulas, para el mezclado manual de la mezcla.
- Mezclador mecánico, opcional.
- Termómetros de rango 10 a 200 °C para determinar las temperaturas de la mezcla bituminosa.
- Balanzas.
- Poruñas.
- Guantes aislantes.
- Pintura o tinta de marcación indeleble para identificación de probetas.

### 3.4.1 Preparación de las muestras

En base a la granulometría del material se generan muestras representativas de 1100 gramos. Se coloca el material seco y a temperatura ambiente en un bol, para luego mezclar con una cantidad de agua necesaria para lograr una correcta cobertura de la emulsión sobre el agregado. La temperatura del agua debe estar ajustada a  $22,2 \pm 1,7^{\circ}\text{C}$  previo a la mezcla. Se agrega el agua y se mezcla durante 1 minuto o hasta que el agua esté completamente dispersa en el agregado. Se agrega la emulsión con la temperatura correspondiente de aplicación (detallado en el informe químico entregado por la empresa que lo proporciona) en el agregado previamente humedecido de forma lenta.

Para la colocación y confección del ensaye se sigue el siguiente procedimiento:

- a) Se limpia completamente el molde y la cara de compactación del martillo. Se coloca un papel circular en la base del molde antes de introducir la mezcla. Se ensambla el molde para luego colocar toda la mezcla en él (1100 gr de RAP o mezcla con agregados pétreos, emulsión y agua) y con una espátula se realiza un acomodamiento de 15 veces a lo largo del perímetro y 10 veces en el interior del molde. Con la espátula se suaviza la superficie de la mezcla con suaves movimientos circulares.
- b) Se coloca el molde en el pedestal de compactación y luego se procede a realizar los golpes con el martillo de compactación, usando una caída libre de 46 cm (18 pulgadas), aplicando 75 golpes por cara del molde.
- c) Se cura la probeta sin desmoldar, durante 24 horas a temperatura ambiente, manteniendo una circulación de aire homogénea por ambos lados de la probeta.
- d) Se cura la probeta desmoldada a temperatura ambiente durante 24 horas más.
- e) Luego de transcurridas las 24 horas, se desmolda y se calcula la densidad real de las probetas según método indicado en la 8.302.38 del MC.

### 3.4.2 Procedimiento de ensaye

El procedimiento va de acuerdo con los siguientes puntos:

- Se coloca las probetas Marshall en un baño de agua a  $60 \pm 1^{\circ}\text{C}$  de 30 a 40 minutos antes de ensayar.
- Se remueve la probeta del baño y se coloca rápidamente en el aparato Marshall.
- Se aplica la carga a una velocidad constante de  $50 \pm 1$  mm por minuto, hasta que la probeta falle. Se define como estabilidad Marshall como el número total de newtons (N) para que se produzca la falla de la probeta.
- El procedimiento no debe durar más de 30 segundos.

### 3.4.3 Protocolo de fabricación de probetas Marshall

Para la realización de este ensaye de estabilidad, se muestra a continuación el esquema para la confección de probetas Marshall.

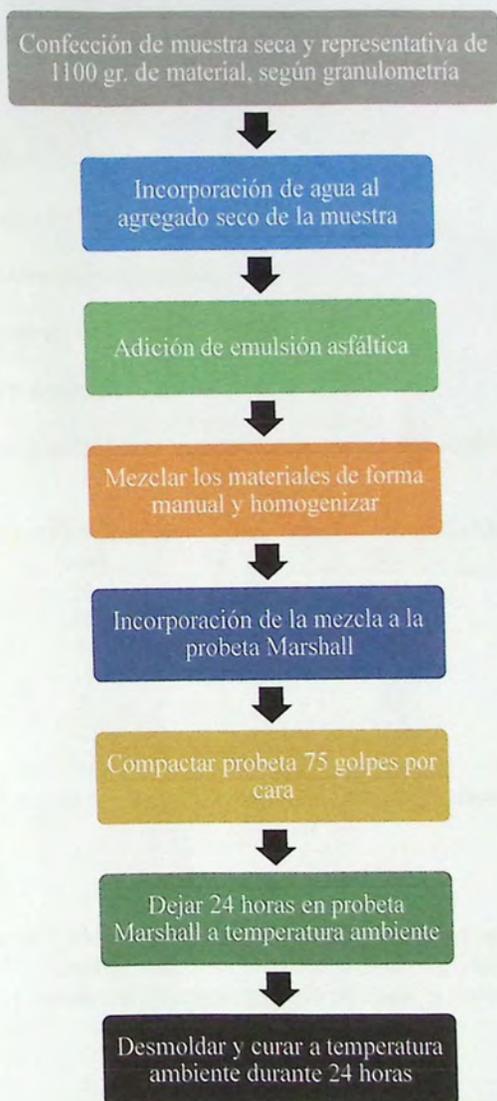


Figura N°3.1 - Esquema de confección de probetas Marshall

### 3.4.4 Porcentaje de Vacíos en el agregado (VAM)

Según el tamaño nominal del RAP indicados en la tabla N°3.6, descrita más adelante, se verifica el mínimo de vacíos en las mezclas confeccionadas, valor que se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$VAM = 100 - \left[ \frac{G}{\rho_{RS}} \times \frac{100}{(100 + Pb)} \right] \times 100 \quad \text{Ecuación N°1}$$

Donde:

VAM: % de vacíos en el agregado mineral.

G: Densidad de la mezcla compactada.

$\rho_{RS}$ : Densidad real seca del agregado.

Pb: % de asfalto referido al agregado.

Los valores conseguidos tienen que estar conforme a las condiciones de la siguiente tabla:

TAMAÑO NOMINAL (mm)	MÍNIMO DE VACIOS (VAM) (%)
25	13,0
20	14,0
12,5	15,0
10	16,0
5	18,0
2,5	21,0
1,25	23,5

Tabla N°3.6 - Índice de vacíos mínimo según tamaño nominal

Observaciones:

Para determinar el VAM, es necesario realizar la densidad real seca según lo descrito en el método 8.202.20 del volumen N°8 del MC, tratando el RAP como un árido común dentro de la mezcla, realizando el secado a una temperatura que no cause la reactivación de asfalto en el RAP.

### 3.5 Descripción del procedimiento según sección 8.302.51 del volumen N°8 del MC.

Para evaluar la mezcla de diseño, se considera el “MÉTODO DE DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRÍO CON EMULSIÓN”, cuyo procedimiento se describe en la sección 8.302.51 del capítulo N°8 del MC y comprende las siguientes etapas:

- Contenido inicial de emulsión.
- Contenido de agua de premezcla.
- Contenido óptimo de agua para compactación.
- Contenido óptimo de asfalto residual.

El método mencionado está orientado a mezclas en frío con emulsión para caminos de bajo volumen de tránsito, con agregados densamente graduados y con un tamaño menor o igual a 1 pulgada, lo cual se asemeja en gran medida a las características de esta nueva metodología. A continuación, se detallan las condiciones y evaluaciones que se mencionan en este método.

#### 3.5.1 Determinación de contenido inicial de emulsión

El contenido inicial se puede estimar a partir de la siguiente fórmula:

$$\%E = [(0,05 \times A) + (0,1 \times B) + (0,5 \times C)] \times 0,7 \quad \text{Ecuación N}^\circ 2$$

Donde:

%E: Porcentaje en peso de emulsión asfáltica, sobre el peso del agregado seco

A: Porcentaje del agregado retenido en malla N°8 (2,5 mm)

B: Porcentaje del agregado pasante por la malla N°8 (2,5 mm) y retenido en la malla N°200 (80µm)

C: Porcentaje de agregado pasante por malla N°200 (80µm)

#### 3.5.2 Determinación del contenido de agua para premezcla

Es el agua contenida para la mezcla de agregados y residuo, es decir, agua libre más agua contenida en la emulsión. El porcentaje de agua en la premezcla se elige luego de evaluar visualmente distintos contenidos, incrementando la cantidad en 1% de agua en relación con el peso del agregado seco con el mismo porcentaje de emulsión, determinado en la sección 3.5.1 de este capítulo, realizando este procedimiento hasta que la mezcla quede empapada o comience a segregarse.

Se señala que, si la emulsión es de quiebre lento, se recomienda comenzar con un 3% de contenido de agua para premezcla, si es de curado medio, se comienza con un 0% y si es de quiebre rápido no se mencionan recomendaciones.

En este punto se toman además las siguientes consideraciones:

- Se combinan los materiales de forma manual (no se utiliza ningún dispositivo mecánico para la mezcla).
- Se realiza el mezclado hasta que el asfalto esté adecuadamente distribuido en toda la mezcla o en un tiempo máximo de 1 minuto.

Nota: Se indica en este método una prueba de adhesión, el cual no se evaluará en este Trabajo de Título, al requerir del uso de horno para calentar a 60°C por 24 horas, lo que provocaría la reactivación de asfalto en el RAP, y la prueba no podría ser representativa.

### 3.5.3 Determinación del contenido óptimo de agua para compactación.

La cantidad de agua para la compactación se obtiene mediante el procedimiento Marshall para cada uno de los tres contenidos de agua de compactación a utilizar y se obtiene por medio de las siguientes formulas:

$$\text{Masa de agregado (W):} \quad W = \frac{a}{100-b} \times 100$$

$$\text{Masa de emulsión asfáltica (X):} \quad X = \frac{a \times c}{d}$$

$$\text{Masa de agua libre adicional para premezcla (Y):} \quad Y = a \times \left( f - b - \frac{(e \times c)}{d} \right) \div 100$$

$$\text{Masa de pérdida de agua para compactación (Z):} \quad Z = a \times \frac{(f-g)}{100}$$

Donde:

a: Masa de agregado seco

b: Porcentaje de agua contenida en el agregado seco al aire

c: Contenido de asfalto residual determinado en la sección 3.5.1 (porcentaje del peso del agregado seco)

d: Porcentaje residual de asfalto en la emulsión

e: Porcentaje de agua en la emulsión = 100 - d

f: Porcentaje del contenido de agua de premezcla en la mezcla (masa de agregado seco)

g: Porcentaje del contenido de compactación (masa del agregado seco)

Ejemplo de cálculo de agua libre (Y), para una masa de agregado seco de 1100 gr, con un porcentaje de agua despreciable contenido en el agregado antes de la dosificación, un porcentaje de asfalto residual de un 4%, asfalto residual de la emulsión igual al 65% y un contenido de agua de premezcla igual a 5% según la cantidad del agregado seco:

$$1100 \times \left( 5 - 0 - \frac{(35 \times 4)}{65} \right) \div 100 = 31,4 \text{ gramos de agua libre}$$

### **Procedimiento:**

Se coloca el material seco y a temperatura ambiente en un bol para mezclar. Se calcula la cantidad de agua libre a ser agregada (Y), necesaria para lograr el contenido óptimo de agua de premezcla. La temperatura del agua debe estar ajustada a  $22,2 \pm 1,7^{\circ}\text{C}$  previo a la mezcla. Se agrega el agua y se mezcla durante 1 minuto o hasta que el agua esté completamente dispersa en el agregado. Se determina la masa de la emulsión asfáltica y se registra. Se agrega la emulsión asfáltica en el material humedecido lentamente a medida que el material es mezclado. El tiempo de mezcla de los contenidos debe ser de aproximadamente 1 minuto (Un tiempo excesivo de mezclado puede ocasionar el desprendimiento del asfalto de los agregados, debido a la materia fina extra que se genera a causa del roce entre el material pétreo).

Se indica que: Si el contenido de agua de premezcla es mayor al contenido de agua para la compactación, entonces es necesario airear la mezcla para lograr el contenido deseado de compactación. La pérdida de agua requerida para la compactación se calcula usando la fórmula para determinar la masa de pérdida de agua para compactación (Z). Para secar el material se puede usar un ventilador y revolver cada 10 minutos hasta alcanzar el contenido de agua de compactación deseado. Generalmente 3 incrementos de contenido de agua de compactación en 1 % es suficiente para construir la curva densidad y contenido de agua para determinar el óptimo.

### **Observaciones:**

- Debido a la rápida confección de esta propuesta, se considera que el agua de premezcla tenga un valor similar al contenido de agua óptimo para la compactación. Se registrarán los valores de agua de premezcla y la pérdida de agua por evaporación que exista antes de la compactación.
- El "contenido asfáltico" no se tomará en cuenta en primera instancia, ya que la solución depende en un 100% de la cantidad de la emulsión y agua libre contenida en la mezcla, para una trabajabilidad adecuada y correcto proceso de mezclado y compactación. Las propiedades alcanzadas con la cantidad de asfalto se determinarán posteriormente.

### **3.5.4 Acondicionamiento de ensaye de compactación**

- a) Se realiza el mismo procedimiento de colocación indicado en el inciso a) de la sección 3.4.1 de este capítulo.

- b) Se coloca el molde en el pedestal de compactación y luego se procede a realizar los golpes con el martillo de compactación, usando una caída libre de 46 cm (18 pulgadas) aplicando 50 golpes por cara del molde.
- c) Se cura la probeta sin desmoldar durante 24 horas a temperatura ambiente, manteniendo una circulación de aire homogénea por ambos lados de la probeta.
- d) Luego de transcurridas las 24 horas, se desmolda y se calcula la densidad real de las probetas según método indicado en la sección 8.302.38 del MC.
- e) Se construye un gráfico de densidad real versus contenido de fluidos.

El contenido de fluidos que maximice la densidad de la probeta se selecciona como el contenido óptimo de compactación. El contenido óptimo de compactación debe ser utilizado en todos los ensayos a realizar respecto del contenido óptimo de asfalto residual.

### 3.5.5 Contenido óptimo de asfalto residual

Para determinar el contenido óptimo de asfalto residual para una combinación de agregado y emulsión asfáltica, se realiza una serie de ensayos con contenidos distintos de asfalto residual, utilizando los contenidos de agua de premezcla y de compactación óptimos definidos anteriormente. Las mezclas son preparadas con incrementos porcentuales unitarios de contenido asfáltico residual con dos contenidos a cada lado del contenido inicial calculado en la sección 3.5.1 de este capítulo.

A continuación, se definen algunos puntos específicos a tomar en cuenta.

- a) Se preparan 6 muestras para cada contenido de asfalto residual.
- b) Se forman muestras representativas con un peso de 1100 gr.
- c) Se realizan los cálculos según lo descrito en la sección 3.5.3 de este capítulo.
- d) Se agrega el mismo contenido de agua total en todas las mezclas (agua de premezcla), es decir, el contenido de agua en la emulsión más el que se agrega de forma libre, por lo tanto, la cantidad total de fluidos que se incorpora ira en incremento, mientras que la cantidad de agua total será la misma. El contenido del agua a incorporar (agua libre), disminuirá a medida que aumenta el porcentaje de emulsión en la mezcla. Tal como se indica en la sección 3.5.2, la cantidad de agua apropiada en la mezcla se determina de forma visual.
- e) La compactación de las probetas se realiza según lo descrito en la sección 3.5.4.
- f) Se cura las probetas sin desmoldar durante 24 horas a temperatura ambiente.
- g) Luego de transcurrir las 24 horas, las probetas se desmoldan y se curan por 24 horas más en un horno a 38° C.

Para la evaluación de las probetas compactadas y curadas se realizan los siguientes ensayos:

- Densidad Real

- Estabilidad Marshall Modificada de probetas secas a una temperatura de  $22,2 \pm 1,1^\circ \text{C}$ .
- Estabilidad Saturada y Fluencia.

### 3.5.6 Estabilidad Modificada y Fluencia

Luego de determinar la densidad de las 6 probetas, para un contenido de asfalto específico, se evalúa la estabilidad y la fluencia a tres de ellos según método 8.302.40 del MC. Se utiliza aquellos que poseen una densidad similar considerando las siguientes condiciones:

- a) La temperatura de la probeta debe mantenerse utilizando un baño de agua.
- b) Durante el ensaye, la tasa de deformación debe ser de 50,8 mm (2 pulgadas) por minuto hasta que la probeta falle.
- c) Se registra la fluencia en unidades de 0,25 mm (0,01 pulg.)
- d) Se determina el contenido de humedad de las probetas posterior al ensaye de fluencia.

### 3.5.7 Estabilidad Saturada y Fluencia

Las tres probetas restantes se someten al ensaye de estabilidad y fluencia luego de ser sometidas a un proceso de desecación al vacío y saturación en agua.

- a) Cada probeta se coloca en una desecadora al vacío con 100 mm de Mercurio durante un período de una hora.
- b) Luego se coloca la probeta en agua para su saturación durante 1 hora.
- c) Se realiza el ensaye de estabilidad modificada de acuerdo con la sección 3.5.6 de este capítulo.

### 3.5.8 Interpretación de los Resultados.

La estabilidad, densidad real seca y contenido de humedad se analizan como sigue:

- a) Se corrigen los valores de estabilidad según procedimiento Marshall.
- b) Se preparan los siguientes gráficos:
  - Estabilidad seca y saturada v/s Contenido de Asfalto Residual
  - Porcentaje de pérdida de estabilidad v/s Contenido de Asfalto Residual
  - Porcentaje de pérdida de estabilidad
$$\% \text{ Pérdida de Estabilidad} = \left( \frac{\text{Estabilidad Seca} - \text{Estabilidad Saturada}}{\text{Estabilidad Seca}} \right) \times 100 \quad \text{Ecuación N}^\circ 3$$
  - Densidad Real Seca v/s Contenido de Asfalto Residual
  - Porcentaje de Humedad absorbida v/s Contenido de Asfalto Residual

Nota: El valor de pérdida de estabilidad Marshall está destinado para medir la pérdida de resistencia por la acción del agua sobre mezclas asfálticas en frío.

### 3.5.9 Contenido Óptimo de Asfalto

Se define como contenido óptimo de asfalto residual aquel que provee la máxima estabilidad saturada o el valor óptimo debe ser definido según la mejor combinación de la estabilidad Marshall (seca y saturada), la pérdida de estabilidad y la densidad real seca.

### 3.5.10 Criterios de Diseño

La mezcla con el contenido de asfalto residual seleccionado debe cumplir con la totalidad de los criterios de diseño que se presentan en la siguiente tabla:

Ensaye	Mínimo	Máximo
Estabilidad (a 22,2°C)	2224 (N)	--
Pérdida de Estabilidad	--	50%
Cubrimiento del agregado	50%	--

Tabla N°3.7 - Criterios de diseño para mezclas en frío

### 3.5.11 Tendencias de los Gráficos Resultantes

Las curvas típicas obtenidas deben tener las siguientes tendencias:

- La estabilidad saturada generalmente mostrará un peak para un contenido particular de asfalto residual, mientras que la estabilidad seca generalmente mostrará un decrecimiento continuo a medida que el contenido de asfalto residual aumenta.
- El porcentaje de pérdida de estabilidad generalmente decrece a medida que el contenido de asfalto residual aumenta.
- La densidad real seca usualmente presenta un peak para un contenido particular de asfalto residual.

# Capítulo IV

## Investigación de Laboratorio

A continuación, se muestran las características, resultados y observaciones que se generaron luego de realizar los ensayos anteriormente mencionados, en base a la metodología descrita en el comienzo de esta investigación. Este capítulo se separa en 4 etapas, las cuales son:

### **Etapas N°1:**

Análisis de los componentes de la mezcla de diseño,

### **Etapas N°2:**

Primer procedimiento en el cual se conoce el comportamiento de la mezcla, utilizando 100% de RAP y emulsión CRS-2, evaluando la densidad y estabilidad Marshall, generando de este modo las primeras observaciones y conclusiones,

### **Etapas N°3:**

Segundo procedimiento donde se muestra la valuación de la mezcla mediante la aplicación del método descrito en la sección 3.5 de esta Memoria de Título, para encontrar la dosificación que permita un óptimo de resistencia mediante el uso de estabilidades modificadas, ajustándose a la banda IV-A-12 con agregado de material granular y emulsión CRS-2,

### **Etapas N°4:**

Se realiza un tercer procedimiento, en el cual se desarrolla un análisis comparativo mediante el uso de las emulsiones CQS, CQS-M y CSS-1h, confeccionando mezclas con y sin agregado de material granular para la evaluación de estabilidad Marshall.

## 4.1 Análisis de los componentes de la mezcla de diseño

### 4.1.1 Emulsión asfáltica CRS-2

Las emulsiones de tipo CRS-2, fueron adquiridas por las empresas Química latinoamericana S.A. y ASFALCOM. La temperatura de aplicación debe estar dentro de los rangos adecuados y con una temperatura ambiente por sobre lo indicado en el informe de cada emulsión (sobre los 10°C). La densidad es variable según la temperatura, pero para efectos prácticos se considera como 1 kg/l.

#### 4.1.1.1 Modo de uso de Emulsión CRS-2

El modo de aplicación en laboratorio fue manual, contándose con hornos y monitoreando cada 10 minutos para llegar de forma pausada a la temperatura de 70°C. Fue importante mantener el contenido de agua constante en la emulsión, por lo que se debió disponer de un envase metálico tapado con la finalidad de evitar la evaporación en el proceso de calentamiento.

#### 4.1.1.2 Análisis Químico

El análisis químico de la emulsión fue otorgado por la empresa distribuidora de asfalto (ASFALCOM) y los resultados de estos análisis se muestran en la siguiente tabla:

ENSAYES	NORMA	RESULTADOS	MIN.	MAX.	
Viscosidad Saybolt Furol a 50°C (s)	8.302.12	120	100	400	Cumple
Estabilidad al Almacenamiento, 1 día (%)	8.302.5	0,12	-	1	Cumple
Demulsibilidad (%)	8.302.5	64,7	40	-	Cumple
Carga de Partícula	8.302.5	+	Positiva		Cumple
Tamizado (%)	8.302.5	0	-	0,1	Cumple
Residuo por Destilación (%)	8.302.5	68,6	65	-	Cumple
Aceite (%)	8.302.5	1,0	-	3	Cumple
Penetración a 25°C, 100gr, 5 s (1/10 mm)	8.302.3	130	100	250	Cumple
Ductilidad a 5°C, 5cm/min. (cm)	8.302.8	70	40	-	Cumple
Solubilidad en Tricloroetileno (%)	8.302.11	99	97,5	-	Cumple
Ensaye de la Mancha (% Xilol)	8.302.7	<30	-	30	Cumple

Tabla N°4.1 - Análisis químico de la emulsión de quiebre rápido entregados por el proveedor

No se contó con el análisis químico de la emulsión proveniente de la empresa "Química latinoamericana S.A.", sin embargo, se determinó mediante el ensaye de residuo por destilación, que el asfalto contenido en la emulsión es de un 66.3% cumpliendo con el requisito mínimo establecido de un 65%. Esta emulsión se utilizó en el primer procedimiento para el estudio de mezcla con 100% de RAP, el cual se señala más adelante.

## 4.1.2 Propiedades del RAP

El RAP se obtuvo directamente desde el acopio en el cual se emplazó luego del proceso de fresado, sin ningún tipo de tratamiento y sin ningún cuidado adicional. El tamaño máximo de partículas del RAP resultó ser inferior a 1 pulgada y se notó cierta cantidad de contaminación, tales como hojas y ramas.

### 4.1.2.1 Aspectos visuales del RAP

El RAP contenía en la totalidad de sus partículas, superficies cubiertas por asfalto en forma irregular y de aspecto rugoso, condición que estaría proporcionando suficiente trabazón dentro de la mezcla, esto es a causa del chancado del pavimento que se produce en el mecanismo de fresado. Su color es oscuro, puesto que están cubiertas por completo con asfalto envejecido y duro.

A continuación, se muestra una imagen representativa del RAP utilizado en esta investigación.



Figura N°4.1 - Muestra de RAP

#### 4.1.2.2 Granulometría del RAP

Para determinar la granulometría, se llevaron a cabo los procedimientos que se indican en la sección 8.202.3 del MC, tomando una muestra representativa y con un peso mayor al tamaño máximo de partícula de aproximadamente 60 kg de material total para el cuarteo.

MUESTRA DE RAP = 15.600 (gr)			
Tamiz	Masa Retenida (gr)	% Pasa	% Retenido
1"	0	100	0,0
3/4"	991	94	6,4
1/2"	2.888	75	18,5
3/8"	1.934	63	12,4
1/4"	2.366	48	15,2
Nº4	1.367	39	8,8
Nº8	2.666,4	22	17,1
Nº16	1.612,6	11	10,3
Nº30	798,4	6	5,1
Nº50	448,0	3	2,9
Nº100	243,1	2	1,6
Nº200	135,4	1	0,9
R	97,9	0	0,6
Total	15.547,92		

Tabla Nº4.2 - Granulometría del RAP



Figura Nº4.2 - Segundo cuarteo de muestra de fresado obtenido de la Ruta E-57 (Los Andes), para determinar granulometría y posterior contenido de asfalto en la muestra

### 4.1.2.3 Compatibilidad con la banda IV-A-12

Con la granulometría del RAP, se pudo observar que no existe un ajuste apropiado con la banda IV-A-12, ya que no se encuentra en los límites que establece. A continuación, se muestra el gráfico de la granulometría del RAP y la banda:

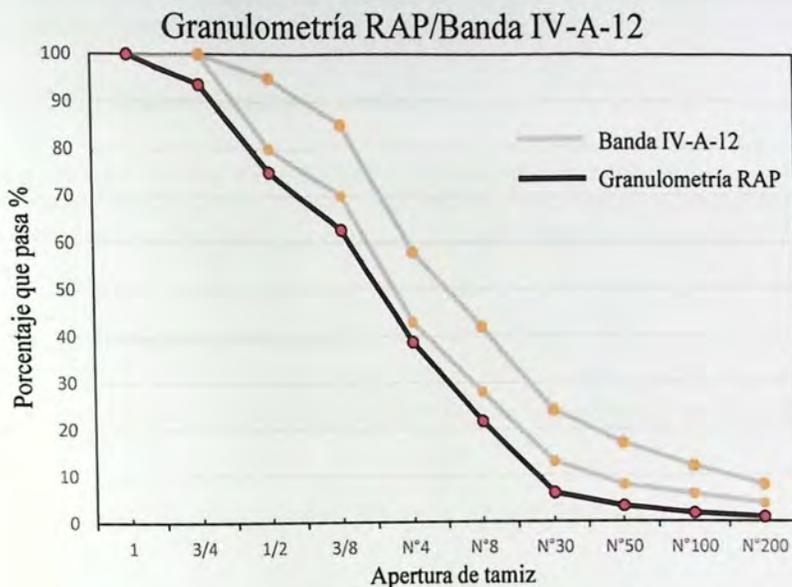


Figura N°4.3 - Granulometría RAP y banda de diseño IV-A-12

### 4.1.2.4 Ensaye de Proctor Modificado

El resultado de la humedad óptima se realizó según el ensaye de Proctor Modificado descrito en la sección 8.102.7 del volumen N°8 del MC, tratando el RAP como un suelo común y realizando el secado en hornos, obteniendo un resultado de humedad óptima para compactación con un 5% de agua. Ver Anexo N°4 para más detalles.

Este ensaye es de gran importancia para determinar en terreno la humedad adecuada de compactación, luego de dosificar el agregado seco y generar la mezcla con la motoniveladora.

Observación: Tras realizar el secado en hornos a una temperatura de 80°C por 24 horas, se pudo apreciar que el asfalto contenido en el RAP se reactivó y se generó una película viscosa de asfalto sobre el agregado.

#### 4.1.2.5 Contenido de asfalto en el RAP

El ensaye para determinar el contenido de asfalto que existe en el RAP, se indica en la sección 8.302.56 del volumen N°8 del MC. El resultado arrojó que el contenido asfáltico es de un 5,33%, el cual es un valor que está dentro de los rangos esperados. Este valor no proporcionó ninguna condición extra en los resultados que se obtuvieron de los ensayes posteriores, sin embargo, es un dato representativo para caracterizar este material y eventualmente usarlo como dato para generar comparaciones con otras procedencias de RAP.

#### 4.1.2.6 Densidad aparente suelta

La densidad aparente suelta del RAP se realizó según el método indicado en la sección 8.202.19 del MC, resultando con un valor igual a 1.416 kg/m<sup>3</sup>. Este valor es de gran importancia, pues se utiliza para la dosificación de emulsión y de agua en terreno. Ver Anexo N°2 para más detalles.

#### 4.1.2.7 Densidad real seca

La densidad real seca se realizó según el método indicado en la sección 8.202.20 del volumen N°8 del MC.

La densidad real seca se obtuvo mediante la siguiente ecuación:

$$\rho_{RS} \text{ (Kg/m}^3\text{)} = \frac{M_s}{M_{SSS} - M_{sum}} \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

Donde,

$\rho_{RS}$ : Densidad real seca

$M_s$ : Masa seca (5.436 gr.)

$M_{SSS}$ : Masa superficialmente saturada luego de 24 horas sumergida (5.511 gr.)

$M_{sum}$ : Masa sumergida (3.282 gr.)

Por lo tanto, la densidad de las partículas sólidas del RAP resultante es de 2.439 (kg/m<sup>3</sup>).

#### Observaciones:

- Se pudo apreciar que el RAP tiene un bajo contenido de partículas finas, lo cual, al estar sobre un camino de ripio, puede producir erosión del material en la base granular al

existir permeabilidad en la carpeta de rodado en climas lluviosos, aumentando el riesgo de existencia de baches y generando un deterioro anticipado de la estructura.

- Se dejó el RAP secar al aire libre antes de realizar la granulometría, evitando otro tipo de secado para no afectar el contenido asfáltico de la muestra con un calor excesivo.
- Al pasar un 21,7% de material por la malla N°8 se considera que el RAP es de graduación de tipo gruesa.
- Considerando el papel que toma este material al usar el 100% como reemplazo del árido en la mezcla de diseño, la granulometría toma gran importancia, por lo tanto, se realizó un cuarteo con abundante material para asegurar una muestra representativa del RAP.
- Se considera que la cantidad de agua existente en el RAP, luego de dejarlo a temperatura ambiente, es despreciable y para efectos de esta investigación se toma como un 0% de contenido de agua.

El resumen del análisis de RAP se muestra en la siguiente tabla:

Resultados del análisis del RAP	
Humedad óptima de compactación:	5%
Densidad aparente suelta:	1416 kg/m <sup>3</sup>
Densidad real seca:	2439 kg/m <sup>3</sup>
Contenido de asfalto:	5,33%

*Tabla N°4.3 - Resumen de resultados del análisis del RAP*

## 4.2 Primer procedimiento

A continuación, se muestra la evaluación de la mezcla usando 100% de RAP y emulsión CRS-2. La emulsión utilizada en este primer procedimiento fue proporcionada por la empresa Química latinoamericana S.A. y su contenido asfáltico es de un 66,3%. En esta tapa de la investigación se confeccionan mezclas para lograr una máxima densidad y estabilidad Marshall según lo descrito en la sección 3.4 del Capítulo III de esta Memoria de Título.

### 4.2.1 Confección de probetas Marshall

La forma y consideraciones que se llevaron a cabo para proceder con la dosificación y confección de probetas Marshall se explica a continuación:

- Según la granulometría se generaron muestras representativas con un peso de 1.100 gramos.
- Se tomó la decisión de agregar un porcentaje de agua de premezcla mayor que el indicado en el ensaye Proctor, ya que en el proceso de la mezcla, se pierde cierta cantidad de agua por evaporación. La siguiente tabla muestra los valores de agua en gramos en relación con un 3, un 3,5, un 4 y un 4,5 % de agua libre en cada porcentaje de emulsión utilizado, considerando que la emulsión tiene un 33,7% de agua.

% de agua	% de Emulsión					
	4	5	6	7	8	9
3	47,8	51,5	55,2	58,9	62,7	66,4
3,5	53,3	57,0	60,7	64,4	68,2	71,9
4	58,8	62,5	66,2	69,9	73,7	77,4
4,5	64,3	68,0	71,7	75,4	79,2	82,9
Agua total en gramos						

Tabla N°4.4 - Dosificación de agua para primeras mezclas

Por lo tanto, se agregó en el agregado seco de RAP los contenidos de agua de premezcla indicados en las celdas oscuras, con el fin de obtener un contenido adecuado de agua al momento de ejecutar la compactación y de esta manera alcanzar una máxima densidad.

- Se calentó la emulsión hasta llegar a una temperatura de 70°C, según lo estipulado en el informe químico.
- Se mezcló el RAP con el agua a 22°C, hasta obtener una mezcla homogénea y sin perder la humedad añadida al momento de dosificar con emulsión.

- Se mezcló con la emulsión en un tiempo no mayor a 1 minuto, y se dejó reposar por un tiempo de 10 minutos.
- Luego se colocó la mezcla en un cilindro estandarizado Marshall para su compactación, según lo descrito en la sección 3.4.1, inciso “a” del Capítulo III.
- Según lo escrito en el método 8.302.40, se golpeó 75 veces por lado desde una altura de 46 cm, con un peso de martillo de compactación de 4.515 gramos.
- Se dejó en el molde durante 24 horas.
- Se desmoldó la mezcla compactada del cilindro metálico mediante un extractor hidráulico y se curó a temperatura ambiente durante 24 horas más.
- Se midió la densidad según el método 8.302.38, “Método para determinar la densidad real de mezclas asfálticas compactadas”.
- Se procedió a medir estabilidad mediante el método 8.302.40, “Método para determinar la resistencia a la deformación plástica de mezclas asfálticas utilizando el aparato Marshall”.

#### 4.2.2 Densidad real de mezclas asfálticas compactadas

La siguiente tabla muestra los valores de densidad que se obtuvieron en las primeras mezclas confeccionadas con 100% de RAP. Dependiendo de las dosis de emulsión y agua indicadas en la tabla N°4.4, las densidades son las siguientes:

Porcentaje de Agua	Porcentaje de Emulsión	Densidad 1 (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad 2 (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad 3 (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad Promedio	VAM (%)
3%	7%	1996	1990	2005	1997	20,8
	8%	1977	-	1992	1985	21,7
	9%	-	-	-	-	-
3,5%	6%	<b>2022</b>	<b>2039</b>	<b>2034</b>	<b>2030</b>	19,4
	7%	2024	2017	2008	2017	20,5
	8%	1996	2002	1995	1998	21,7
4%	5%	2023	2039	2034	2032	19,4
	6%	<b>2048</b>	<b>2051</b>	<b>2041</b>	<b>2047</b>	19,3
	7%	2004	2023	2027	2018	20,9
4,5%	4%	2024	2019	2034	2026	20,1
	5%	<b>2043</b>	<b>2030</b>	<b>2039</b>	<b>2037</b>	19,1
	6%	2029	2015	2027	2024	20,2

Tabla N°4.5 - Densidades utilizando el 100% de RAP más emulsión y agua

### Observaciones:

- La mezcla con mejor comportamiento en el proceso de mezclado fue también la que logró la mayor densidad, utilizando un 6 % de emulsión y 4 % de agua libre. Con un porcentaje menor de emulsión no se conseguía una correcta cobertura, mientras que con un porcentaje mayor, se generaba una consistencia muy líquida sin desarrollar necesariamente una cobertura mayor.
- El tiempo de quiebre que se observó con esta emulsión fue inferior a los 15 minutos, lo cual no es suficiente para el procedimiento a escala real de la propuesta. Por lo tanto, el tiempo de quiebre estuvo muy por debajo al tiempo que se esperaba.
- El VAM resultó ser mayor al 19,3%, lo cual cumple con el mínimo según el tamaño máximo del agregado indicado en la tabla N°3.6. Para más detalles, revisar Anexo N°5.
- La emulsión CRS-2, al ser de quiebre rápido, tiene la capacidad de separar el agua de la mezcla a través de procesos químicos, lo cual se pudo apreciar de forma visual al encontrarse el agua de forma libre, formando pequeñas posas luego de transcurrir algunos minutos. Si bien se registró cierta pérdida de humedad por evaporación luego de 10 minutos (cercana al 0.5%), no fue posible registrar la humedad contenida al momento de compactar, ya que el agua se separó físicamente del resto de la mezcla.
- El exceso de superficies irregulares en el RAP dificulta la cobertura con esta emulsión y ayuda a la rapidez del quiebre.
- Los resultados fueron insatisfactorios al no poder obtener valores de estabilidad. Las probetas se disgregaban al mismo momento de extraerlas de la piscina de agua a 60°C, luego de estar 30 minutos sumergidas.

### 4.2.3 Conclusiones referentes al primer procedimiento

La mezcla no proporciona resistencia en la estabilidad Marshall en mezclas con 100% de RAP, produciéndose la inmediata disgregación luego de extraerla de la piscina a 60°C. Esto es debido a la baja capacidad de cobertura y adherencia que tuvo la emulsión CRS-2 en todas las dosificaciones que se realizaron. Por otra parte, el RAP en estudio tiene baja cantidad de finos, lo cual genera una condición desfavorable por falta de puntos de unión entre las partículas finas dentro de la mezcla. En este primer procedimiento, el valor óptimo se estimó en base a la densidad máxima conseguida.

Si bien los resultados no eran los que se esperaban, la emulsión sigue produciendo cierto grado de adhesión en la mezcla a temperatura ambiente, cualidad que puede ser mejorada con el agregado de materiales finos y con el uso de otras emulsiones.



*Figura N°4.4 - Probeta disgregada con RAP, polvo de roca y emulsión CRS-2*

### 4.3 Segundo procedimiento

Para lograr una mezcla con mejores propiedades y con condiciones apropiadas para una carpeta de rodado, se evaluaron las características del RAP con el ajuste correspondiente a la banda IV-A-12, permitiendo conocer el efecto que genera la modificación con agregados pétreos en la mezcla con la misma emulsión CRS-2. En este procedimiento se realizan los ensayos y procedimientos que se establecen en la sección 3.5 del Capítulo III.

Si bien el método 8.302.51 está orientado para mezclas con agregados densamente graduados, se prosigue a realizar los ensayos con una granulometría de graduación semidensa (banda IV-A-12), considerando que en la tabla N°3.4 se encuentra en ambas clasificaciones al pasar el 36% de material en la malla N°8.

#### 4.3.1 Ajuste a la banda de trabajo

Al retirar el material superior de 3/4 de pulgadas se logra estar más cerca de los rangos de la banda, pero sigue habiendo escasez de material granular fino. La tabla y el gráfico que se muestra a continuación, indica los valores de la banda y la nueva granulometría que resultó luego de retirar el material con tamaño mayor a 3/4 pulgadas.

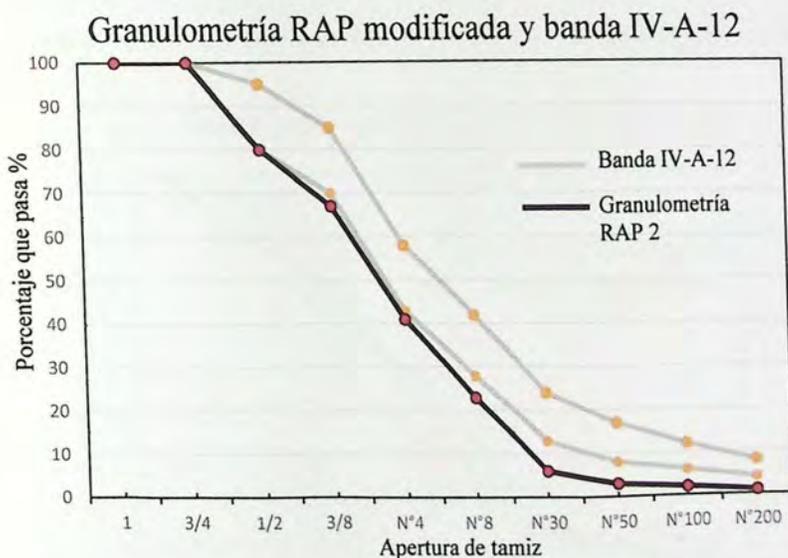


Figura N°4.5 - Granulometría RAP modificada y banda IV-A-12

		DENOMINACIÓN				
		IV - A - 12				
		Porcentaje que pasa			Diferencia faltante	Diferencia sobrante
ASTM	(mm)	Min (%)	Max (%)	RAP 2 (%)	(%)	(%)
1	25	100	100	100	0	0
3/4	20	100	100	100	0	0
1/2	12,5	80	95	80,2	0	0
3/8	10	70	85	67,0	3	0
Nº4	5	43	58	41,4	1,6	0
Nº8	2,5	28	42	23,2	4,8	0
Nº30	0,63	13	24	6,7	6,3	0
Nº50	0,315	8	17	3,6	4,4	0
Nº100	0,16	6	12	2,1	3,9	0
Nº200	0,08	4	8	1,2	2,8	0

Tabla N°4.6 - Banda IV-A-12 comparada con los porcentajes que pasan en la granulometría modificada del RAP

Luego de extraer lo retenido en 3/4 pulgadas, desperdiciándose aproximadamente un 10 % del total de material, e incorporando un 30 % de polvo de roca, proveniente de la planta El Guiltro ubicada en la Sexta Región a orillas del río Cachapoal, se logró tener una mezcla cuyo contenido granular logra estar dentro de los valores máximos y mínimos de la banda IV-A-12, pudiendo de esta forma realizar muestras para la confección de probetas Marshall. El detalle de las propiedades del polvo de roca se encuentra en el Anexo N°3 de esta Memoria de Título.

El gráfico de la mezcla conseguida con RAP y polvo de roca se muestra a continuación:

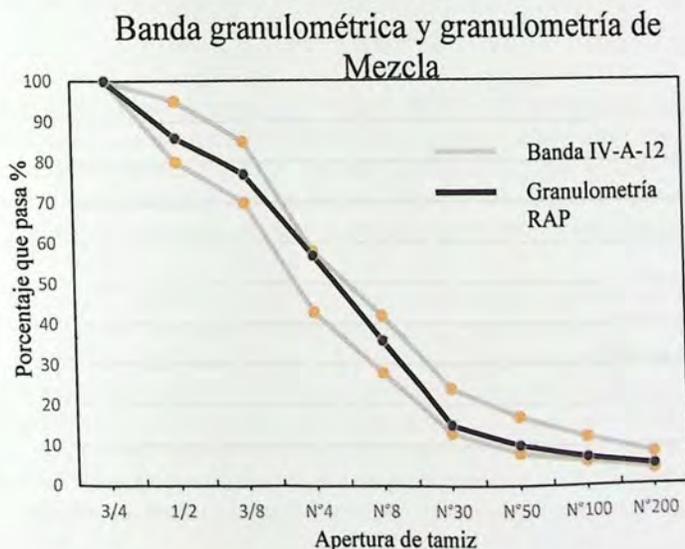


Figura N°4.6 - Ajuste granulométrico final de la mezcla a banda IV-A-12

Tamiz	70%	30%	Mezcla (%)	IV - A - 12		Ajuste
	RAP (%)	P. Roca (%)		Mínimo (%)	Máximo (%)	
3/4'	100	100	100	100	100	ok
1/2'	80	100	86	80	95	ok
3/8'	67	100	77	70	85	ok
N4	41	95	57	43	58	ok
N8	23	66	36	28	42	ok
N30	6	35	15	13	24	ok
N50	3	25	10	8	17	ok
N100	2	18	7	6	12	ok
N200	1	13	5	4	8	ok
Porcentaje que pasa			Porcentaje que pasa			

Tabla N°4.7 - Mezcla de diseño con la incorporación de áridos

### 4.3.2 Dosificación de la mezcla

#### 4.3.2.1 Contenido de agua de premezcla

Para determinar la humedad apropiada y lograr una correcta mezcla, se confeccionaron muestras representativas con un peso de 1.100 gramos para luego calcular un óptimo teórico de emulsión, mediante la fórmula que se indica en la sección 3.5.1 del Capítulo III. El resultado del cálculo se muestra a continuación:

$$\%E = [(0,05 \times 64) + (0,1 \times 31) + (0,5 \times 5)] \times 0,7$$

$$\%E2 = 8,88\%$$

El valor obtenido con la ecuación N°2 que establece este método para una cantidad de emulsión aproximada para una mezcla común. El contenido de asfalto en la emulsión es de un 68,6% (para emulsión proveniente de la empresa ASFALCOM), por lo tanto, la dosis de un 8,8% de emulsión quedaría con un 6% de asfalto, lo que se considera un valor muy elevado y para este procedimiento se descarta el valor conseguido por medio de esta fórmula.

Para obtener un contenido de agua más apropiado para la mezcla, se confeccionaron muestras para realizar una evaluación visual en la mezcla, según lo descrito en la sección 3.5.2 del Capítulo III. Se consideró variar en un 3, 4 y 5% la cantidad de agua libre por cada dosis de emulsión hasta lograr una mezcla con la consistencia adecuada y que no produzca derrames de fluidos en el proceso de compactación. Para este paso se utilizó el método de compactación Marshall a 75 golpes para determinar la densidad que logra cada dosificación y generar una comparación de densidades con respecto al primer procedimiento. La siguiente tabla, representa las proporciones que se realizaron para determinar la cantidad de agua apropiada para una máxima densidad:

Porcentaje de Emulsión	Agua libre	RAP + Polvo de roca (gr)	Emulsión (gr)	Agua Libre (gr)	Total (gr)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	VAM (%)
5%	3%	1100	55	33,0	1188	2005	23,0
	4%	1100	55	44,0	1199	2023	22,3
	5%	1100	55	55,0	1210	2058	20,9
6%	3%	1100	66	33,0	1199	2015	23,1
	4%	1100	66	44,0	1210	2022	22,8
	5%	1100	66	55,0	1221	2031	22,5
7%	3%	1100	77	33,0	1210	2011	23,7
	4%	1100	77	44,0	1221	2018	23,5
	5%	1100	77	55,0	1232	1997	24,3

Tabla N°4.8 - Determinación de contenido de agua libre para la mezcla

### Observación:

- Fue posible distinguir que la emulsión era relativamente más trabajable con un 5% de agua libre y 5% de emulsión. Con una menor cantidad se dificultaba el proceso de mezclado y se obtenía una mezcla con baja cobertura, mientras que un porcentaje mayor causaba un incorrecto proceso de compactación al provocar derrames de líquido.
- La mezcla de mayor densidad se logró utilizando un 5 % de emulsión y un 5% de agua libre.
- Luego de realizar la mezcla y antes de la compactación Marshall, se registró una pérdida de agua en la mezcla en un 0.4% en promedio a una temperatura ambiente de 20°C.
- Los resultados de densidades son parecidos a los que se obtuvieron en los valores sin el 30% de agregado de polvo de roca, sin embargo, la dosis cambió debido a la incorporación de material granular fino, aumentando la cantidad de agua y disminuyendo la cantidad de emulsión.
- Para obtener los valores de VAM, según la ecuación N°1, se usó la densidad real seca de la mezcla con polvo de roca realizando una ponderación entre los valores del RAP y el valor de la densidad real seca del agregado. La densidad real seca de la mezcla se registró con un valor de 2.506 kg/m<sup>3</sup>. Para más detalles ver el Anexo N°2 y N°3.
- El agua de premezcla se estimó según el óptimo total de agua para una densidad máxima, es decir, 5% de agua libre más el agua contenida en la emulsión. El cálculo se muestra a continuación:

$$1100 (gr) * \frac{\%Agua\ libre}{100\%} + \%Emulsión * \left( \frac{100\% - \%Residuo}{100\%} \right) * \frac{1100 (gr)}{100\%} = Agua (gr)$$

$$1100 * \frac{5}{100} + 5 * \left( \frac{100 - 68.6}{100} \right) * \frac{1100}{100} = 72.27 \text{ gramos de agua de premezcla}$$

El agua de premezcla es de 6,6% en relación con el agregado seco. Esta dosis se ocupó en todas las muestras de estabilidad modificada que se realizaron posteriormente.

### 4.3.3 Evaluación de mezclas para estabilidad modificada

A continuación se muestran los resultados del método propuesto para esta etapa, ajustándose a las condiciones previamente establecidas en la sección 3.5 del Capítulo III. Para las evaluaciones siguientes se usará una dosificación variada de emulsión, desde un 4 % hasta un 8% y con la misma cantidad de agua de premezcla establecida en la sección anterior.

#### 4.3.3.1 Densidad de probetas Marshall

Se muestra a continuación el gráfico de densidades resultantes luego de realizar la compactación de 50 golpes por cara en las probetas Marshall por cada porcentaje de emulsión añadido en la mezcla.

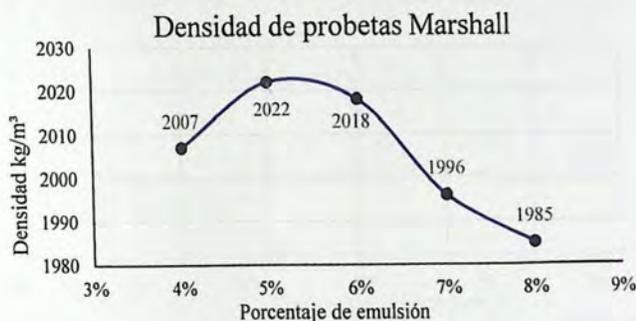


Figura N°4.7 - Gráfico de densidad procedimiento N°2

#### 4.3.3.2 Ensaye de estabilidad modificada

Resultados de estabilidad seca según sección 3.5.6 del capítulo III:

Emulsión %	Residuo %	Agua de premezcla	Estabilidad modificada Seca Corregida (N)
4	2,74	6,6%	3964
5	3,43		3834
6	4,12		3815
7	4,80		3596
8	5,49		3415

Tabla N°4.9 - Resultados de Estabilidad Seca

Resultados de estabilidad saturada sección 3.5.7 del capítulo III:

Emulsión %	Residuo %	Agua de premezcla	Estabilidad modificada Saturada Corregida (N)
4	2,74	6,6%	2102
5	3,43		2215
6	4,12		2418
7	4,80		2376
8	5,49		2286

Tabla N°4.10 - Resultados de Estabilidad Saturada

El gráfico que se genera con los datos de las tablas N°4.9 y N°4.10, se muestra a continuación:

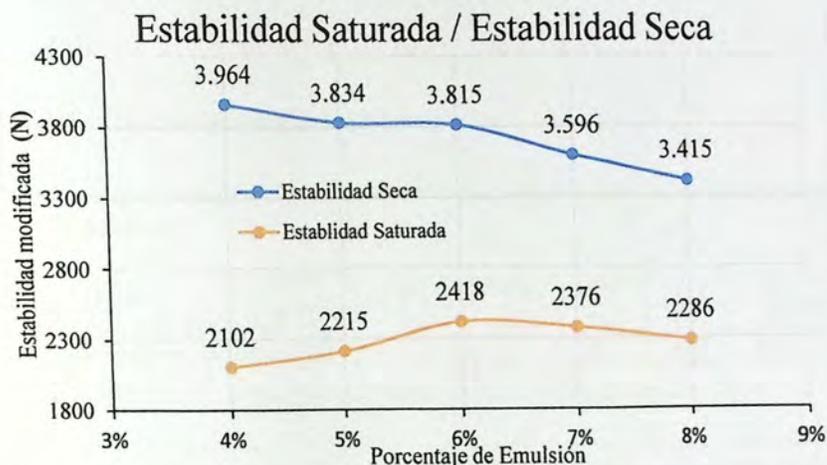


Figura N°4.8 - Estabilidad Saturada / Estabilidad Seca

#### 4.3.3.3 Pérdida de estabilidad

Mediante la ecuación N°3, descrita en la sección 3.5.8, se procedió a calcular la pérdida de estabilidad con cada porcentaje de emulsión, cuyos valores son los siguientes:

	Emulsión	Pérdida de Estabilidad	Verificación
Máximo permitido 50%	4%	46,9%	Cumple
	5%	42,2%	Cumple
	6%	36,6%	Cumple
	7%	33,9%	Cumple
	8%	33,1%	Cumple

Tabla N°4.11 - Pérdida de Estabilidad

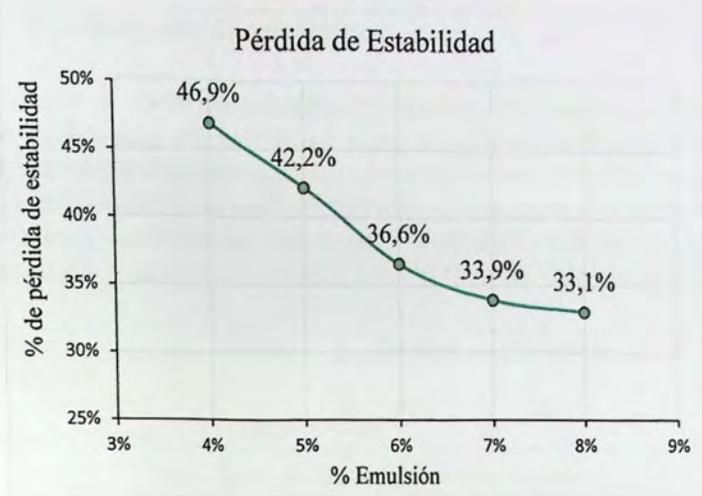


Figura N°4.9 - Pérdida de Estabilidad

#### 4.3.4 Fluencia promedio saturada y seca

La fluencia Marshall de las probetas saturadas y secas ensayadas en cada porcentaje de emulsión ensayado son:

% Emulsión	4%	5%	6%	7%	8%
<b>Fluencia seca (promedio)</b>	18,9	20,8	20,9	21,3	22,2
<b>Fluencia saturada (promedio)</b>	21,3	21,1	23,3	24,2	25,1

Tabla N°4.12 - Tabla de fluencia saturada y seca en mezclas con emulsión CRS-2

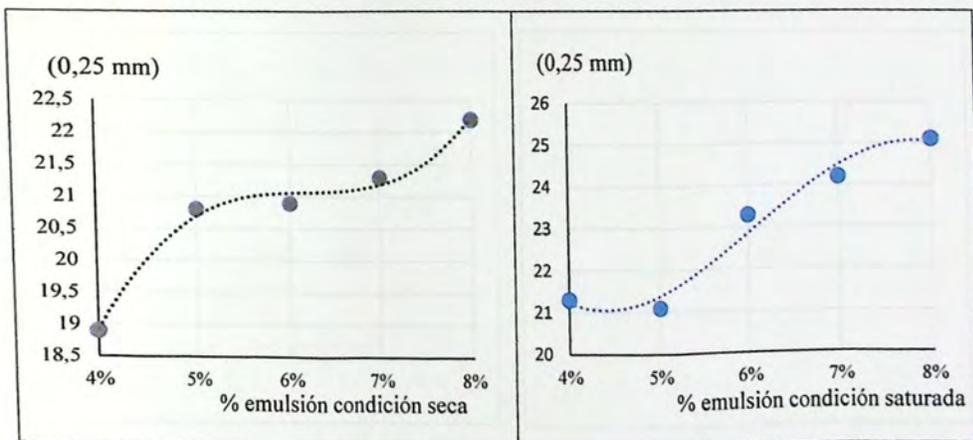


Figura N°4.10 - Gráficos de fluencia saturada y seca en mezclas con emulsión CRS-2

### 4.3.5 Interpretación de resultados

Los criterios de diseño que se establecen en la tabla N°3.7, fueron cumplidos en cuanto a pérdida de estabilidad y cubrimiento del agregado en todas las mezclas confeccionadas, mientras que la estabilidad saturada alcanzó un óptimo con una dosis de 6% de emulsión y 4,7% de agua libre, cumpliendo con el mínimo establecido de resistencia en la estabilidad Marshall modificada saturada eligiéndose con este valor la dosificación de diseño para la mezcla con agregado fino, según lo descrito en la sección 3.5.9 del Capítulo III de esta Memoria de Título.

Ensaye	Mínimo	Máximo	Resultado	Verificación
Estabilidad	2224 (N)	-	2418 (N)	CUMPLE
Pérdida de Estabilidad	--	50%	36.6%	CUMPLE
Cubrimiento del agregado	50%	--	Ok	CUMPLE

Tabla N°4.13 - Evaluación según criterios de diseño

Además, se cumplen con las tendencias esperadas indicadas en la sección 3.5.11 del Capítulo III de esta Memoria de Título.

#### 4.3.6 Conclusiones referentes al primer y segundo procedimiento

El método descrito para mezclas en frío con emulsión, resultó ser un buen sistema para definir una dosis que consiga una máxima resistencia con el uso de la emulsión de quiebre rápido, mediante el ensaye de estabilidad Marshall modificada para condiciones saturadas a una temperatura de 22°C. No obstante, no se pudo confirmar el resultado con el óptimo de estabilidad Marshall según la sección 3.4 de esta Memoria de Título, ya que las probetas realizadas en este segundo procedimiento también se disgregaron al momento de retirarlas de la piscina a 60°C. Esto es debido a la poca capacidad de resistencia y cohesión, la cual no se puede desarrollar a esta temperatura.

Como se puede apreciar en la siguiente imagen, el agregado de polvo de roca se encuentra en estado seco, pudiendo confirmar de manera visual, la poca capacidad de cobertura que proporciona la emulsión CRS-2. El polvo de roca no causó ninguna condición significativa de densidad y resistencia de estabilidad a 60°C con el uso de esta emulsión.



*Figura N°4.11 – Probeta Marshall con RAP, polvo de roca y emulsión CRS-2 en estado seco partida en la mitad*

Por otra parte, el tiempo de quiebre resultó ser muy escaso en ambas situaciones (con y sin polvo de roca), logrando un tiempo inferior a los 15 minutos, lo cual no es suficiente para una confección adecuada en terreno debido a los tiempos que necesita esta solución para el trabajo de revoltura y compactación, lo cual debe realizarse antes de que la mezcla quiebre.

Luego de analizar el comportamiento de la mezcla con 100% de RAP y con la mezcla con un 30% de polvo de roca, y al no cumplir con las expectativas para el desarrollo de esta propuesta, se decidió dar fin a el análisis, descartando mediante ensayes de laboratorio que el uso de la emulsión CRS-2 con el uso de RAP no es el más apropiado para este método de rápida confección. Esto es principalmente a causa de:

- Escaso tiempo que existe para lograr un trabajo adecuado en terreno.
- Poca capacidad de cobertura que provee la emulsión.
- Nula resistencia a estabilidad Marshall a 60°C.

## 4.4 Tercer procedimiento

En este tercer procedimiento, se evalúa el uso de las emulsiones CQS y CQS-M y CSS-1h, proporcionadas por la empresa “Productos bituminosos S.A.”, utilizando mezclas con 100% de RAP y también con mezclas que contengan 30% de agregado de polvo de roca. De esta manera y mediante un análisis comparativo, se proponen alternativas con el fin de seleccionar la mezcla con condiciones más favorables.

Para los análisis siguientes se usarán las evaluaciones que se consideraran más relevantes para esta metodología, las cuales son:

- Densidad.
- Trabajabilidad.
- Tiempos de quiebre.
- Estabilidad Marshall a 60°C.
- Dosificación final de diseño y contenido de asfalto residual en la mezcla.

### Observaciones para este tercer procedimiento:

Debido a la buena cobertura que generan estas emulsiones, se procede en una primera evaluación, determinar directamente la estabilidad Marshall a 60°C (procedimiento descrito en la sección 3.4 de esta Memoria de Título) y encontrar la dosis de emulsión y agua que permita una máxima resistencia.

Cabe señalar que las emulsiones de quiebre lento y quiebre controlado son equivalentes, es decir, el residuo asfáltico es prácticamente igual en las 3 emulsiones y solo cambia el agente emulsificante, que condiciona el tiempo de quiebre lento o quiebre controlado respectivamente. El contenido de asfalto residual de cada emulsión se encuentra en los análisis químicos anexados al final de esta Memoria de Título (Anexo N°1).

Las alternativas de confección que se desarrollaron en este segundo procedimiento se muestran en el siguiente esquema:



Figura N°4.12 - Esquema de alternativas para la evaluación en el tercer procedimiento

#### 4.4.1 Primera prueba para evaluación de mezclas utilizando emulsiones de quiebre controlado y lento en mezclas con 100% de RAP

A continuación se muestran los resultados del ensayo de estabilidad Marshall con el uso de las emulsiones de quiebre controlado, controlado modificado y lento, sin agregado de material granular fino. La dosificación que se utilizó en cada mezcla está basada en el primer procedimiento, teniendo en consideración la dosificación que logró la densidad máxima con el uso de la emulsión CRS-2. El siguiente cálculo muestra la cantidad de emulsión para agregar y llegar al mismo valor de residuo.

$$\frac{X * \%Residuo(CQS, CQS-M, CSS-1h)}{100\%} = \frac{\%Emulsión(CRS-2) * \%Residuo(CRS-2)}{100\%}$$

$$\frac{X * 63\%}{100\%} = \frac{6\% * 68,6\%}{100\%}$$

$$X = 6.5\% \text{ de emulsión}$$

Para efectos prácticos y debido a la buena cobertura de estas emulsiones, se decidió realizar muestras con las siguientes dosificaciones para 1100 gramos de agregado seco:

	Contenido de emulsión (%)	Residuo (%)	Total residuo emulsión (%)	Agua libre (%)	Total agua de emulsión (%)	Agua de premezcla (%)	Agua de premezcla (gr)
CQS	6	63	3,8	3,3	2,2	5,5	60
	7	63	4,4	2,9	2,6	5,5	60
	8	63	5,0	2,5	3,0	5,5	60

Tabla N°4.14 - Dosificaciones para mezclas con 100% de RAP y emulsión CQS

	Contenido de emulsión (%)	Residuo (%)	Total residuo emulsión (%)	Agua libre (%)	Total agua de emulsión (%)	Agua de premezcla (%)	Agua de premezcla (gr)
CQS-M CSS-1h	6	62	3,7	3,2	2,3	5,5	60
	7	62	4,3	2,8	2,7	5,5	60
	8	62	5,0	2,5	3,0	5,5	60

Tabla N°4.15 - Dosificaciones para mezclas con 100% de RAP y emulsión CQS-M y CSS-1h

Para la dosificación, se utilizó un porcentaje mayor de emulsión y un menor porcentaje de agua, ya que el residuo contenido en las emulsiones CQS, CQS-M y CSS-1h es menor. Notar que la tabla N°4.15 sirve para las emulsiones CQS-M y CSS-1h, puesto que tienen igual porcentaje de residuo.

Se tomó la decisión de agregar un contenido de agua menor que el usado con la emulsión CRS-2, con el fin de estimar una pérdida de agua por evaporación de un 0,5 % y lograr un porcentaje de compactación cercano al determinado en el ensayo Proctor. Por lo tanto, el

porcentaje de premezcla escogido es de un 5,5% con respecto al agregado seco de 100% de RAP (es decir 60 gramos de agua de premezcla).

#### 4.4.1.1 Estabilidad en mezclas con 100% de RAP y emulsión CQS y CQS-M

Los resultados de estabilidad Marshall, para las mezclas dosificadas según los porcentajes indicados en las tablas N°4.1 y N°4.15, se muestran a continuación:

Porcentaje de Emulsión (CQS)	Contenido Asfáltico 63%	Agua libre (%)	Estabilidad 1 (N)	Estabilidad 2 (N)	Estabilidad 3 (N)	Promedio (N)
6%	3,78	3,2	2545	2011	2404	2320
7%	4,41	2,8	3313	-	3591	3452
8%	5,04	2,5	2930	2943	3324	3066

Tabla N°4.16 - Resultados de estabilidad con emulsión CQS y 100% RAP

Porcentaje de Emulsión (CQS-M)	Contenido Asfáltico 62% (gr)	Agua libre (%)	Estabilidad 1 (N)	Estabilidad 2 (N)	Estabilidad 3 (N)	Promedio (N)
6%	3,72	3,2	2570	3093	3127	2930
7%	4,34	2,8	3071	3407	4218	3565
8%	4,96	2,5	3693	3114	3441	3416

Tabla N°4.17 - Resultados de estabilidad con emulsión CQS-M y 100% RAP

#### Observaciones:

- La dosificación con un 7% de emulsión y 2,8% de agua libre resultó ser la más apropiada para esta mezcla con 100% de RAP, logrando un valor de estabilidad de 3452 (N) con la emulsión CQS y 3565 (N) con la emulsión CQS-M.
- El comportamiento de ambas emulsiones fue similar, pudiéndose ver una leve mejora en la resistencia con el uso de la emulsión CQS-M.
- Resultó más sencillo confeccionar las probetas Marshall, ya que no fue necesario realizar el calentamiento de la emulsión.
- A diferencia de la emulsión CRS-2 y debido al tiempo de quiebre más holgado, se pudo cubrir la totalidad del agregado en el proceso de revolutura.
- La pérdida de agua por evaporación con estas emulsiones se registró en 0,5% luego de aproximadamente 15 minutos, quedando con una cantidad adecuada de agua de 5% para realizar la compactación en la compactadora Marshall.

- La mezcla quebró luego de 1 hora con una temperatura ambiente de 20°C.

#### 4.4.1.2 Estabilidad de la mezcla con 100% de RAP y emulsión CSS-1h

Los resultados de estabilidad Marshall, para las mezclas dosificadas según los porcentajes indicados en la tabla N°4.15 se muestran a continuación:

Porcentaje de Emulsión (CSS-1h)	Contenido Asfáltico 62% (gr)	Agua Libre	Estabilidad 1 (N)	Estabilidad 2 (N)	Estabilidad 3 (N)	Promedio (N)
6%	3,72	3,2	3129	2512	2621	2754
7%	4,34	2,8	3731	3308	3047	3362
8%	4,96	2,5	2574	3224	2856	2885

Tabla N°4.18 - Resultados de estabilidad con emulsión CSS-1h y 100% RAP

#### Observaciones:

- Esta emulsión se comportó igual que con las emulsiones de quiebre controlado y la dosificación que alcanzó la máxima resistencia en la mezcla es con un 7% de emulsión y 2,8% de agua libre con 100% de RAP.
- El quiebre se generó luego de 4 horas.
- En el siguiente gráfico se muestran las estabilidades conseguidas con el uso de las 3 emulsiones:

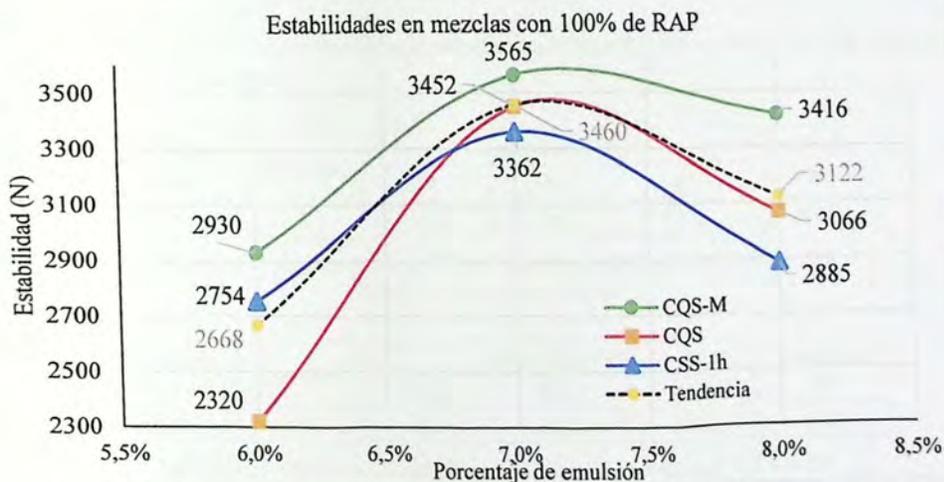


Figura N°4.13 - Estabilidades conseguidas en emulsiones CQS, CQS-M y CSS-1h

#### 4.4.2 Segunda prueba de RAP con polvo de roca y emulsiones de quiebre lento y controlado

En las siguientes pruebas de RAP con polvo de roca, se utilizó el mismo valor de dosificación que en el óptimo de densidad lograda en el segundo procedimiento con la emulsión CRS-2, es decir, el mismo valor de asfalto residual y agua de premezcla. Esto se realizó para validar y comparar la efectividad de cada emulsión con la misma dosis de residuo y agua de premezcla en las mezclas con 70% de RAP y 30% de polvo de roca. Los valores de dosificación según el tipo de emulsión y para mezclas con polvo de roca se muestran en la siguiente tabla:

Dosificación para 1100 gramos de muestra							
Emulsión	Contenido de emulsión (%)	Residuo (%)	Total residuo emulsión (%)	Agua libre (%)	Total agua de emulsión (%)	Agua de premezcla (%)	Agua de premezcla (gr)
CRS-2	5	68,6	3,4	5	1,6	6,6	72
CSS-1h	5,53	62	3,4	4,5	2,1	6,6	72
CQS	5,44	63	3,4	4,6	2,0	6,6	72
CQS-M	5,53	62	3,4	4,5	2,1	6,6	72

Tabla N°4.19 – Dosificaciones para mezclas con agregado de polvo de roca

El modo de empleo de las emulsiones utilizadas en este tercer procedimiento es idéntico al realizado sin polvo de roca, usando la misma cantidad de agua de premezcla y contenido de asfalto indicados en la tabla N°4.19.

##### 4.4.2.1 Mezcla con agregado de polvo de roca y emulsión CQS y CQS-M

Los resultados de las estabilidades Marshall que se obtuvieron con la dosis de emulsión se muestran a continuación:

Emulsión CQS	Residuo	Estabilidad (N)			Promedio (N)
		P1	P2	P3	
5,44%	63%	(2700)	4044	3428	3391

Tabla N°4.20 - Resultados de estabilidad con emulsión CQS, para mezclas con 70% de RAP y 30% de polvo de roca

Emulsión CQS-M	Residuo	Estabilidad (N)			Promedio (N)
		P1m	P2m	P3m	
5,53%	62%	4224	4298	4762	4428

Tabla N°4.21 - Resultados de estabilidad con emulsión CQS-M, para mezclas con 70% de RAP y 30% de polvo de roca

## Observaciones:

- Se pudo apreciar que se generó una mezcla homogénea y bien distribuida, cubriendo completamente el material de RAP y polvo de roca.
- Debido al tiempo que permiten las emulsiones, tanto de quiebre lento como controlado, se consideró reposar la mezcla durante 30 minutos para lograr una simulación adecuada de trabajo en terreno, registrando una pérdida de humedad aproximada de 1% durante este periodo de tiempo quedando con una dosis de compactación de un 5.6% de agua de premezcla con respecto al agregado seco. Este valor se consideró adecuado, ya que al agregar una cantidad de agregados finos en la mezcla, se espera un mayor porcentaje de agua para una compactación óptima en relación con el calculado en el ensaye Proctor sin finos.
- Los valores de estabilidad fueron considerables, siendo la emulsión modificada la que consiguió el valor más alto con una estabilidad promedio de 4.428 (N).
- El tiempo de quiebre se logró luego de 1 hora.
- Debido al buen comportamiento de la emulsión de quiebre controlado modificada con polímeros, se procedió a realizar más probetas con la misma cantidad de agua de premezcla y distintas cantidades de emulsión, pero los resultados fueron más desfavorables en los valores de estabilidad, mientras que las densidades no variaron en gran medida, siendo casi iguales en las 4 dosis de emulsión realizadas. El Gráfico que se generó con los resultados de estabilidad en cada dosis se muestra a continuación:

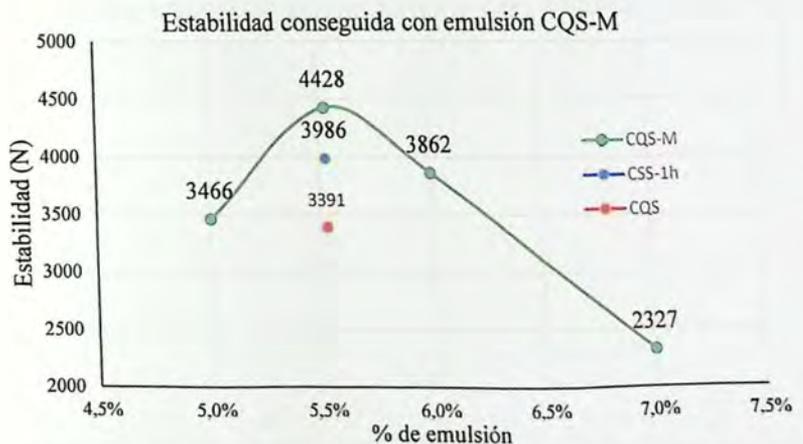


Figura N°4.14 - Resultados de estabilidad con emulsión CQS-M, para mezclas con 70% de RAP y 30% de polvo de roca

Para más detalles ver Anexo N°5

#### 4.4.2.2 Mezcla con agregado de polvo de roca y con emulsión CSS-1h

El resultado de las estabilidades Marshall con el uso de esta emulsión se muestra a continuación:

Emulsión CSS-1h	Residuo	Estabilidad (N)			Promedio (N)
		P1	P2	P3	
5,53	62%	4081	3648	4229	3986

*Tabla N°4.22 - Resultados de estabilidad con emulsión CSS-1h, para mezclas con 70% de RAP y 30% de polvo de roca*

#### Observaciones:

- Al igual que la emulsión CQS, se pudo apreciar que se generó una mezcla homogénea y bien distribuida, cubriendo completamente el material de RAP y polvo de roca.
- La estabilidad promedio se registró en 3986 (N).
- La pérdida de agua por evaporación se registró en 1% luego de 30 minutos.
- Se logró una densidad promedio de  $2.061 \text{ kg/m}^3$ , superando los valores conseguidos con la emulsión CRS-2 y las emulsiones de quiebre controlado.
- El tiempo de quiebre superó las 4 horas a una temperatura aproximada de  $20^\circ\text{C}$ .

### 4.4.3 Conclusiones referentes al tercer procedimiento

En este tercer procedimiento, se pudo comprobar una alternativa con mejores cualidades al poder lograr una correcta trabajabilidad y también lograr valores de estabilidad Marshall, tanto en mezclas con agregado de polvo de roca como también las mezclas con 100% de RAP.

La emulsión de quiebre lento tardó más de 4 horas en quebrar, mientras que la emulsión de quiebre controlado tuvo un tiempo de aproximadamente 1 hora para que ocurra el quiebre (dependiendo de las condiciones ambientales, humedad en el ambiente y la energía aplicada en la mezcla de los agregados).

En cuanto a resistencia máxima lograda, la emulsión de quiebre controlado modificado tuvo los mejores resultados. El agregado de polvo de roca generó una mayor resistencia en las mezclas, además con el agregado de material fino se obtiene una mezcla más impermeable, causando una mayor durabilidad del camino. Para las mezclas sin agregado de polvo de roca, las dosis fueron acertadas para este RAP en particular, logrando también un valor considerable de estabilidad, pero se genera una mezcla permeable, lo que implica menos durabilidad.

En este tercer procedimiento, se pudo tener las condiciones para ajustar la cantidad de agua necesaria para una compactación óptima.

Las tres emulsiones se comportaron de forma similar, y las dosificaciones usadas fueron relativamente iguales, debido al contenido similar de residuo de cada emulsión (ver Anexo N°1 para más detalles de las emulsiones utilizadas). Además estas emulsiones tienen un mecanismo de quiebre por evaporación y en el proceso de mezclado tuvieron prácticamente el mismo comportamiento de pérdida de agua.

Los aspectos positivos de la mezcla con esta emulsión son:

- Excelente trabajabilidad.
- Facilidad de confección.
- La mezcla tiende a ser homogénea.
- Mejora notable en los resultados de resistencia en comparación a emulsiones de quiebre rápido.
- Se nota una alta capacidad de cubrimiento de la emulsión sobre el agregado.
- Tiempo adecuado de quiebre, desde 1 hora con las de quiebre controlado, hasta más de 4 horas con la de quiebre lento (dependiendo de condiciones ambientales).

Se comprueba de esta manera, que la elección más viable para este método de confección es con la emulsión de quiebre controlado y lento, y por otra parte, se descarta el uso de la emulsión CRS-2 en la mezcla al proporcionar condiciones más desfavorables.

A continuación, se muestran dos tablas para mencionar las ventajas y desventajas de las mezclas con 100% de RAP y mezclas con 70% de RAP y 30% de polvo de roca.

Mezclas con 100% de RAP	
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aprovecha el 100% de material reciclado.</li> <li>- Es la solución más económica.</li> <li>- Se evita la extracción de áridos nuevos, por lo tanto es alternativa amigable con el medio ambiente.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se disminuye la resistencia.</li> <li>- Se genera una mezcla más permeable y susceptible al ahuellamiento, lo que se traduce en una estructura menos durable.</li> <li>- Se necesita más emulsión para lograr una correcta cobertura y viscosidad.</li> </ul>

Tabla N°4.23 - Ventajas y desventajas para mezclas con 100% de RAP

Mezclas con 70% de RAP y 30% de polvo de roca	
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se aumenta la resistencia.</li> <li>- Se genera una mezcla más impermeable, lo que se traduce en una mayor durabilidad.</li> <li>- Se distribuye de mejor manera los esfuerzos dentro de la mezcla, lo que evita posibles problemas de ahuellamiento.</li> <li>- Se requiere de menos emulsión para lograr la consistencia adecuada.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se necesita cierta cantidad de áridos nuevos.</li> <li>- Se necesita de una menor cantidad de material reciclado.</li> <li>- Es menos económica al requerir de agregado pétreo nuevo.</li> </ul>

Tabla N°4.24 - Ventajas y desventajas para mezclas con 70% de RAP y 30% de polvo de roca

## Capítulo V

### Procedimiento de prueba a escala real usando emulsiones CSS1-h y CRS-2 con 100% de RAP proveniente de la Ruta 68

Se realizó este procedimiento en las instalaciones del MOP, Campamento Pangal, Limache, Región de Valparaíso. Para esta prueba se usó el RAP de la Ruta 68, el cual se dosificó con las emulsiones CSS-1h y CRS-2. Se consideró la misma técnica de implementación descrita al principio de esta Memoria de Título.

Para el desarrollo del trabajo se tuvieron en cuenta los siguientes puntos:

- Se dispuso de 50 metros cúbicos de RAP con una densidad aparente suelta de 1.408 kg/m<sup>3</sup>.
- El material se emplazó en un área aproximada de 600 metros cuadrados con una altura aproximada de 8 cm (en estado suelto o “esponjado”).
- Se destinaron dos áreas para regar con CSS-1h y CRS-2, tal como se indica en la siguiente imagen:

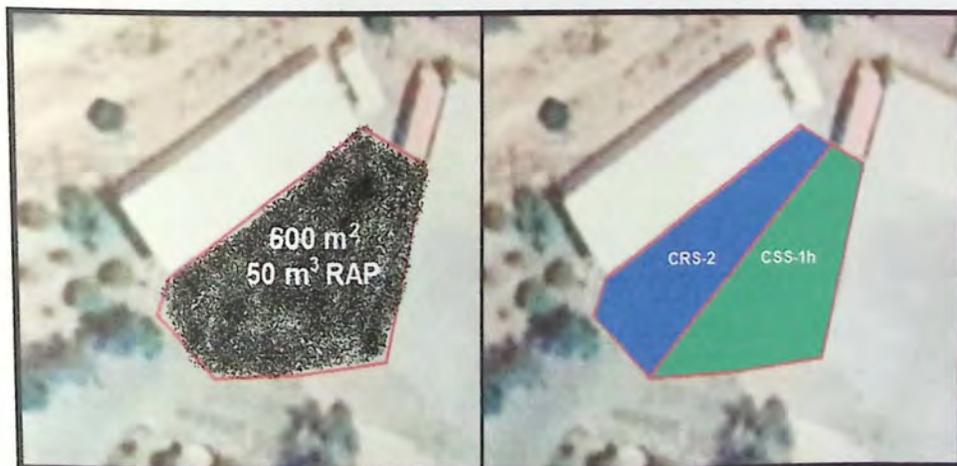


Figura N°5.1 - Imagen representativa de área de prueba

## 5.1 Diferencias granulométricas de los RAP de la Ruta 68 y la Ruta E-57

Peso de muestra = 17200 (gr) RAP Ruta 68					RAP Ruta E-57		
Tamiz	Masa Retenida (gr)	% Pasa	% Retenido	% Retenido	% Pasa	% Retenido	% Retenido
1"	0	100	0,0	72,7	100	0,0	61,2
3/4"	2040	88	11,9		94	6,4	
1/2"	4080	64	23,8		75	18,5	
3/8"	2348	51	13,7		63	12,4	
N°4	4018	27	23,4		39	15,2	
N°8	2132	15	12,4	27,3	22	8,8	38,5
N°16	1141,2	8	6,6		11	17,1	
N°30	516,5	5	3,0		6	10,3	
N°50	371,1	3	2,2		3	5,1	
N°100	301,5	1	1,8		2	2,9	
N°200	112,8	1	0,7		1	1,6	
R	105,5	0	0,6	0	0,9		
Total	17166,6						

Tabla N°5.1 - Tabla de Granulometrías de la Ruta 68 y Ruta E-57

Para realizar una comparación adecuada, se retiró el material en 1 pulgada para ajustarlo a la misma granulometría del RAP de la Ruta E-57, pudiéndose observar que existe mayor cantidad de áridos gruesos y por lo tanto menos cantidad de finos. Se notaron partículas de mayor tamaño, tales como la que se muestra a continuación:



Figura N°5.2 - Partícula de RAP, Ruta 68

## 5.2 Procedimiento de prueba con CSS-1h y CRS-2

### 5.2.1 Prueba con CSS-1h

Para iniciar el trabajo se tomó la decisión de comenzar con el riego de la emulsión CSS-1h, para conocer en un principio la dosis adecuada de emulsión y agua sobre el RAP, debido a que el proceso de quiebre lento permite el tiempo suficiente para realizar el riego y revoltura de forma pausada, teniendo también en cuenta, que el área destinada de prueba para esta emulsión era la más compleja de las dos. El procedimiento se detalla a continuación:

- Se distribuyó mediante un camión regador, la emulsión CSS-1h previamente diluida en agua a razón 1:1, con una temperatura de 50°C y a una tasa de riego de 1,5 l/m<sup>2</sup>.
- El tiempo de riego y revoltura con la motoniveladora fue de 1 hora 5 minutos.
- Se usó en total 3.300 litros de emulsión y agua, lo que se traduce en una dosificación de un 4,6% de emulsión y 4,6% de agua libre para 25 m<sup>3</sup> aproximados de RAP.
- Luego se volvió a extender la mezcla y se utilizó una compactadora de tambor vibratorio, rellenando aquellos sectores desnivelados hasta conseguir una superficie lisa, para luego volver a compactar mediante una compactadora de rodillos de goma.

### 5.2.2 Prueba con CRS-2

Para el mezclado de RAP con esta emulsión se siguió un proceso muy similar al anterior, realizando dos riegos en la superficie a una tasa de riego de 1,5l/m<sup>2</sup> y con una revoltura más intensa debido a la condición de quiebre rápido. Se usó un total de 2.900 litros de mezcla de emulsión y agua en igual proporción, con una temperatura de riego de 70°C, logrando una dosificación de 4,1% de emulsión y 4,1% de agua. El tiempo de mezclado y riego se registró en 21 minutos y luego se efectuó el mismo proceso de compactación que en el caso anterior. A continuación se muestran algunas fotos del día de confección:



Figura 5.3 - Imágenes de confección con 100% de RAP, con emulsión CRS-2 y CSS-1h

### 5.2.3 Observaciones luego de la prueba

- El trabajo se desarrolló sin inconvenientes y se pudo finalizar en un tiempo de 3 horas.
- Visiblemente, ambas opciones proporcionaron una carpeta lisa y con una textura comparable a la de un camino convencional de asfalto.
- El proceso de revoltura y de compactación fue complejo debido a la pendiente y geometría del área de prueba, pero se pudo obtener con el uso de la motoniveladora una mezcla bien distribuida en ambos casos.
- En teoría, la implementación de esta técnica sobre un camino común lograría un mejor resultado al disponer de condiciones más cómodas para el trabajo de riego y mezcla con la motoniveladora.
- El camión regador cubre gran parte del agregado con emulsión durante el riego, lo que ayuda a generar desde un principio una mezcla homogénea.
- La mezcla con CSS-1h fue sencilla de usar en el proceso de riego, revoltura y posterior compactación.
- La dosificación escogida con el uso de la emulsión CSS-1h, resultó aceptable en este procedimiento de prueba, lográndose una correcta cobertura sobre el RAP. Sin embargo, se pudo observar cierto derrame en el costado inferior de la calzada, debido a la poca cantidad de finos, la baja consistencia de la dosis (muy líquida) y la vasta inclinación del área de trabajo.
- No se registró el tiempo de quiebre de la emulsión CSS-1h, pero luego de 3 horas de comenzar con su utilización, se lograba distinguir que la superficie aún estaba de color café oscuro, indicando de esta manera que el quiebre no había ocurrido hasta entonces.
- En cuanto a la aplicación de quiebre rápido CRS-2, si bien no hubo inconvenientes en el proceso de dosificación y mezclado, el tiempo de quiebre fue demasiado limitado (15 minutos aproximadamente).
- Se pudo observar que no es correcto realizar el regado sin realizar seguidamente un proceso de revoltura con motoniveladoras, ni tampoco compactar luego del quiebre de la emulsión.
- Se pudo apreciar que el empleo de la motoniveladora y experiencia del operador es fundamental para el desarrollo del trabajo, ya que en una serie de revolturas debe ser capaz de realizar una mezcla homogénea, para luego extender el material y poder efectuar la compactación antes del quiebre de la emulsión.
- A diferencia del RAP de la Ruta E-57, se pudo distinguir una cantidad importante de partículas de gran tamaño, las cuales se retiraron para no impedir un correcto proceso de mezclado.

### 5.3 Observaciones luego de 2 semanas

- Se pudo apreciar que el pavimento se mantuvo estable, liso, visiblemente cohesionado y disminuyendo notablemente el polvo en el tránsito de vehículos.
- Se extrajeron 3 testigos, los cuales se muestran a continuación:



Figura N°5.4 - Testigos de Primera prueba realizada luego de 2 semanas

- Se extrajeron 2 testigos de muestra con CRS-2 para comprobar el espesor, eligiendo de forma visible el área más apropiada para las extracciones.
- Con los testigos de la mezcla con CRS-2 se pudo notar que no se logró un adecuado cubrimiento y adhesión en el agregado, lo cual si logró la emulsión CSS-1h.
- Claramente se puede observar que la muestra de la mezcla con CSS-1h, duplicó en espesor a la muestra con emulsión CRS-2. Esto nos indica que la emulsión de quiebre lento logró generar una mezcla más cohesionada y por consiguiente, presenta mejores condiciones para esta propuesta con el uso de RAP.
- Cabe señalar que la carpeta se dejó 48 horas sin tránsito de vehículos posterior al término del trabajo.

## 5.4 Conclusiones de la primera prueba a escala real

A pesar de no tener las condiciones apropiadas para el desarrollo del trabajo y contar con un RAP cuyo contenido granulométrico tiene menos porcentaje de finos que el RAP de la Ruta E-57, se llevó a cabo una prueba satisfactoria y representativa para futuros proyectos con el uso de esta técnica.



*Figura 5.5 - Compactadora de rodillo de goma finalizando el trabajo*

Se pudo confirmar con esta prueba a escala real, que esta técnica es completamente viable con el uso de la emulsión de quiebre lento, ya que el tiempo de quiebre es adecuado (en condiciones climáticas apropiadas). Además, se logró una mezcla trabajable, un pavimento uniforme, cohesionado y con mejores propiedades que las de un camino de ripio. También esta prueba fue muy importante para obtener más información de esta técnica, conocer los tiempos aproximados de trabajo y corroborar los resultados obtenidos en laboratorio.



*Figura N°5.6 – Imagen de las instalaciones del Campamento Pangal luego de 2 semanas*

## Capítulo VI

### Conclusiones

En el transcurso de la investigación, se pudo conocer y abordar las características necesarias para el estudio de esta técnica, mediante ensayos adecuados y con una prueba a escala real, involucrando distintas alternativas para el análisis y finalmente desarrollar una propuesta válida para el mejoramiento de caminos de ripio con el uso de RAP.

Los resultados obtenidos en laboratorio y en la prueba a escala real, demostraron que el método planteado para una solución rápida con la emulsión CRS-2 no es la mejor alternativa para el desarrollo de una carpeta de rodado, debido a la poca trabajabilidad y escasa resistencia que ofrece la mezcla. Esto se debe principalmente a que las partículas del RAP contienen una alta cantidad de superficies irregulares y rugosas, las cuales no pueden ser cubiertas fácilmente por esta emulsión. Además, la condición de quiebre rápido impide un correcto desarrollo de revoltura en terreno.

La mezcla pudo mejorar sustancialmente con el uso de otras emulsiones, ya que generaron una capacidad de cohesión y adhesión mucho más elevada entre las partículas, tanto para las mezclas con agregado o sin agregado de material granular fino, obteniendo valores de estabilidad y también otorgando una mayor trabajabilidad. Por lo tanto, para el desarrollo de esta propuesta, el uso de las emulsiones de quiebre controlado y lento son las más indicadas, ya que la mezcla tuvo resultados notablemente mejores de resistencia con respecto a la emulsión CRS-2, además el tiempo de quiebre lento o controlado es mucho más apropiado.

El agregado de polvo de roca generó un mejor resultado de resistencia en comparación con las mezclas sin material fino, necesitando además, menos cantidad de emulsión para conseguir un valor de resistencia óptimo. Las mezclas con 100% de RAP lograron valores de resistencia en el ensaye de estabilidad más bajos en comparación a las mezclas con agregado fino, además, fue necesario agregar una mayor cantidad de emulsión y menor cantidad de agua para generar un correcto proceso de revoltura y sin ocasionar exceso de derrames.

La evaluación visual fue fundamental al momento de generar observaciones y conclusiones, ya que se pudieron determinar parámetros tales como:

- Homogeneidad.
- Tiempo de quiebre de la emulsión.
- Cantidad de superficies irregulares, chancadas y rugosas.
- Viscosidad en la mezcla.

Por otra parte, la impermeabilidad y el análisis de huecos no se determinó en ninguna de las mezclas realizadas, pero se espera que tenga cierto grado de permeabilidad debido a la baja

densidad, alto contenido de vacíos, y escasez de material granular fino, en comparación con una mezcla tradicional. Esta condición puede presentar un riesgo en la durabilidad de la estructura al existir dos posibles inconvenientes: baches a causa de la erosión en la base de ripio en climas lluviosos o ahuellamiento de la superficie en climas calurosos. Por otro lado, la cantidad de aspectos positivos de esta solución en cuanto a facilidad de confección, economía y sustentabilidad ambiental, genera una solución mucho más beneficiosa que mantener una carpeta de ripio, considerando que estos caminos requieren de constante mantención y proporcionan baja serviciabilidad.

Los resultados de cada mezcla son:

Con el uso de la emulsión **CRS-2** y sin agregado de finos, se registró el mejor resultado en base a la densidad máxima lograda, lo cual se consiguió con un 6% de emulsión más un 4% de agua libre, obteniendo una densidad promedio de 2.047 kg/m<sup>3</sup>. La trabajabilidad fue escasa, pues se hizo dificultoso mezclar de forma manual para lograr un correcto esparcimiento de la emulsión sobre el RAP, además, no se pudieron obtener valores de estabilidad Marshall, ya que las probetas se disgregaban por completo luego de ser extraídas de la piscina a 60°C. Por lo tanto, la solución no es viable con la aplicación de esta emulsión.

La dosificación con la emulsión de quiebre rápido **CRS-2** y con un 30% de agregado de polvo de roca dentro de la mezcla, tampoco generó una resistencia en la estabilidad Marshall a 60°C. Se pudo comprobar que la emulsión no fue capaz de cubrir de forma correcta las partículas de RAP en el proceso de mezclado. Esto se pudo observar con más facilidad en el segundo proceso debido a la incorporación del agregado de polvo de roca, al notar zonas grises en las probetas secas. Sin embargo se pudo conocer una resistencia máxima con el método de mezclas asfálticas en frío con emulsión, descrito en la sección 3.5 del Capítulo III de esta Memoria de Título con una dosis de un 6% de emulsión y 4,7% de agua.

Con las emulsiones de quiebre controlado **CQS** y **CQS-M**, se obtuvieron resultados satisfactorios en cuanto a trabajabilidad, resistencia y tiempos de quiebre. El tiempo de quiebre permitió revolver lo suficiente como para obtener una mezcla homogénea y con excelente cobertura de emulsión en el agregado, generando una mezcla trabajable y con buenas propiedades para esta técnica de mejoramiento de caminos de ripio. Se alcanzaron los valores de estabilidad más altos con una dosis cercana al 5,5% de emulsión, un 4,5% de agua libre y con un 30 % de agregado de polvo de roca, promediando una estabilidad de 4.428 (N) con la emulsión modificada con polímeros. Esta emulsión quiebra luego de aproximadamente 1 hora, permitiendo generar un trabajo rápido en caminos de poca longitud.

La cantidad óptima de emulsión para las mezclas sin agregado de finos y utilizando las emulsiones de tipo **CQS**, se obtuvo con un 7% de emulsión y 2,8% de agua libre, logrando un valor de estabilidad de 3.565 (N) con la emulsión modificada con polímeros.

La dosificación que se realizó con la emulsión de quiebre lento **CSS-1h**, también logró resultados satisfactorios en cuanto a trabajabilidad y resistencia. La dosis con un 5,5% de

emulsión, un 4,5% de agua libre y con un 30 % de agregado de polvo de roca, generó un valor de estabilidad promedio de 3.987 (N) con una densidad promedio de 2061 kg/m<sup>3</sup>, valor de densidad que fue el más alto en relación con las densidades obtenidas con el uso de las otras emulsiones.

Cabe señalar, que tanto la emulsión de quiebre controlado como la de quiebre lento, se pudo ajustar fácilmente la dosis deseada de agua para la compactación, puesto que el mecanismo de quiebre es por evaporación, lo cual permite el tiempo suficiente como para generar una pérdida de humedad por evaporación y lograr una compactación con la dosis de agua que genere una máxima densidad, a diferencia de la CRS-2 que se produce por efectos químicos, lo cual ocasiona la separación física del agua del resto de la mezcla.

En definitiva, las dos soluciones más factibles que se escogen para este método de confección, tanto con el uso de la emulsión de quiebre lento y controlado, son:

- Usando RAP sin agregado de polvo de roca, más 7 % de emulsión y con un 2.8% de agua libre, traduciéndose en una proporción de residuo y agua de premezcla de 4:5. Esta alternativa es más costosa al agregarle mayor porcentaje de emulsión y por otro parte, se genera una mezcla más propensa a la penetración de fluidos lo cual no es deseable al estar sobre una base de ripio.
- Usando RAP más 30% de polvo de roca con un 5,5% de emulsión, cuyo contenido de residuo es de un 62%, y 4,5% de agua libre, traduciéndose en una proporción de residuo y agua de premezcla 1:2. Esta opción posee más beneficios que usar 100% de RAP, debido a la falta de finos del material fresado, lo cual genera una mezcla más resistente y durable.

La dosificación final en relación con la cantidad de residuo y agua se muestra en la siguiente tabla:

	Contenido de emulsión (%)	Residuo (%)	Total residuo emulsión (%)	Agua libre (%)	Total agua de emulsión (%)	Agua de premezcla (%)	Agua de premezcla (gr)	Relación residuo vs agua de premezcla aproximada
100% de RAP	7	62	4,34	2,8	2,7	5,5	60	4:5
70% de RAP + 30% de polvo de roca	5,5	62	3,43	4,5	2,1	6,6	72,7	1:2

Tabla N°6.1 – Dosificación final de diseño

Esta dosificación es válida tanto para las emulsiones CSS-1h, CQS y CQS-M, con el RAP de la Ruta E-57 y con una temperatura de aplicación de aproximadamente 20°C.

## Recomendaciones

- Se recomienda realizar un estudio más profundo para determinar las propiedades de esta técnica con la utilización de emulsiones de quiebre lento o controlado, mediante el uso de RAP proveniente de otros fresados, variando el contenido asfáltico residual en porcentajes cercanos al 4%, para mezclas con 100% de RAP y con la misma cantidad de agua de premezcla.
- El contenido de agua está íntimamente relacionado con la densidad y el grado de resistencia de la mezcla, por lo tanto, es recomendable realizar un completo análisis en el agregado para un contenido de agua adecuado.
- El agua de premezcla juega un papel fundamental en el diseño, en especial cuando existe un mayor contenido de finos. La falta de agua puede producir una mezcla poco trabajable al no realizarse una distribución correcta de la emulsión sobre el agregado, por el contrario, un exceso de agua puede producir derrames y filtraciones a capas inferiores, ya que se produce una consistencia muy poco viscosa, ocasionando la pérdida de efectividad de la emulsión. Con la viscosidad adecuada, determinada visualmente en el proceso de mezclado, se tiende a retener la emulsión en el agregado y se mantiene la efectividad del ligante asfáltico. Por consiguiente, y de acuerdo con el punto anterior, es necesario lograr un equilibrio adecuado en ambos aspectos para lograr una correcta trabajabilidad y adecuada compactación.
- Elegir el tipo de emulsión y dosificación no es trabajo sencillo, ya que existe una variedad importante de resultados y singularidades en el proceso de mezclado con el uso de cada emulsión, ya sea de distinto tipo o de distintas características (porcentaje de residuo, agente emulsificante, tiempos de quiebre y modificaciones poliméricas), haciendo difícil la tarea de elegir la emulsión más indicada. Es recomendable asesorarse con el proveedor de este producto para tener un acercamiento de la emulsión más adecuada y así conseguir mejores resultados.
- Al colocar esta mezcla sobre una base de ripio compactado, puede verse afectado el pavimento en condiciones de excesiva humedad, contribuyendo a la temprana formación de baches. Este aspecto pone en juicio la durabilidad de la estructura al existir una carpeta permeable, aspecto que no se evaluó en esta Memoria de Título. Se optó por tomar condiciones más apropiadas para atenuar este inconveniente, con el agregado de material granular fino. Se recomienda profundizar más en este posible problema.
- Es posible disminuir la cantidad de material fino adicional para lograr el ajuste a la banda deseada, realizando un fresado más profundo en una determinada carpeta asfáltica. También se puede considerar usar el mismo material granular existente en el camino a mejorar, escurificando con la motoniveladora a una determinada profundidad, para adicionarlo con el RAP y de esta manera agregar contenido necesario de agregados finos en la mezcla.
- Un fresado de mejor calidad, puede obtenerse con un mayor porcentaje de finos y un cuidado posterior a su extracción para evitar la existencia de posibles contaminantes. La máquina fresadora puede generar distintos tamaños de fresado al disminuir la velocidad con la que tritura la corteza del camino.

- Se recomienda el estudio mediante el uso de agentes rejuvenecedores en la mezcla con el uso de RAP
- Es importante lograr una máxima protección de la base de ripio para mejorar la durabilidad de la estructura. Es recomendable realizar inicialmente una carpeta de espesor suficiente, para distribuir en un área mayor las cargas del tráfico a la base granular, proporcionando de esta manera más durabilidad al conjunto de capas.
- Es interesante plantear la idea de utilizar emulsiones en el proceso de elaboración de bases estabilizadas, simulando el proceso de asfalto espumado, pero evitando las altas temperaturas con que se trabaja el asfalto directamente en la mezcla. Si bien el asfalto espumado aprovecha la carpeta de rodadura para reutilizarla en terreno, se necesita de una elevada temperatura en el riego directo de asfalto en el agregado, situación que cambiaría con el uso de una emulsión que no necesite de altas temperaturas y que contenga solvente asfáltico para una mejor adherencia con el fresado.
- Se recomienda usar emulsión CRS-2 para mezclas confeccionadas en máquinas recicladoras, ya que el tiempo de dosificación y mezclado es mucho más rápido, lo que genera una condición compatible con la emulsión de quiebre rápido.
- Para futuras investigaciones de mezclas en frío con RAP, se recomienda adoptar una mínima cantidad de emulsión para zonas cálidas, prefiriendo una granulometría de graduación abierta para evitar una posible exudación por exceso de asfalto, ya que el contenido de asfalto duro existente en el RAP puede estar en condiciones de reactivación frente a este tipo de climas.
- La granulometría, las densidades y los valores que se obtuvieron de los ensayos, caracterizaron los materiales y la mezcla de diseño, con el fin de proporcionar la mejor alternativa para la solución propuesta y es de vital importancia generar comparaciones en investigaciones futuras con el uso de materiales provenientes de otros fresados de caminos, ya sea con o sin agregados pétreos, a fin de obtener el RAP más adecuado para esta misma metodología de confección.
- Se recomienda analizar el aspecto económico de este procedimiento, para generar comparaciones de costos de esta solución, con los costos asociados a la mantención de un camino de ripio.
- Se observó también, que las partículas de mayor tamaño se pueden separar o romper en fracciones más pequeñas con relativa facilidad, lo que genera un cambio en la granulometría, pero se consideró en una primera instancia, que esta condición no afectó en los análisis finales, ya que el martillo de la máquina Marshall acomoda y termina de romper las partículas, tal como lo haría la mezcladora en el proceso de revoltura y una máquina compactadora en el proceso de compactación.
- Se recomienda dar seguimiento al desarrollo de esta técnica, con el uso de la emulsión CSS-1h o CSS-1h modificado con polímeros, con el RAP proveniente de la Ruta 68 y con una dosificación más cercana a las recomendadas en esta Memoria de Título.
- No se debe caer en errores comunes tales como:
  - Mezclas pobres en asfalto o exceso de humedad.
  - Temperaturas inadecuadas de aplicación de la emulsión (sobre 10°C y en fase ascendente).
  - Resequedad de la emulsión debido al tiempo de almacenamiento.
  - Emulsión no compatible con el proceso de trabajo.

- Agregados con graduación inadecuada.
- Tiempos de trabajo inapropiado para mezclado y compactación.
- Por último, pero no menos importante, es imprescindible generar nuevas soluciones de reutilización, sobre todo en beneficio de aspectos ambientales, debido a la constante extracción de áridos que existe hoy en día, y que en muchas ocasiones son extraídos de forma inapropiada desde ríos mediante maquinaria de alto tonelaje, deteriorando el lugar con instalaciones industriales y zonas de acopio a orilla de estos, e interviniendo masivamente en los cauces naturales a través de un estándar de calidad medioambiental mínimo. Un caso ejemplar es el que ocurre a orillas del río Cachapoal, puente de Peumo, comuna de San Vicente de Tagua Tagua, lugar que al igual que muchos otros, no ha sido regularizado para la extracción de áridos (hasta el 18 de mayo del 2018) y ha causado un deterioro importante en la zona, dañando humedales, flora, fauna acuática y fruticultura del sector [14].

## Apreciación personal

En los últimos años, el reciclado de materiales ha generado una tendencia en los estudios y en el desarrollo de nuevas tecnologías, orientándose en la mayoría de las veces a alternativas sencillas, prácticas y eficientes, conllevando no sólo a beneficios económicos, sino también en beneficios sociales, estéticos y sobre todo ambientales.

El RAP es un material compuesto por más del 90% de áridos seleccionados y de alta calidad, sin embargo, el gran potencial de reutilización no se ha visto reflejado en la actualidad, porque existen pocas alternativas para su uso.

Mediante esta solución sencilla y con reducidos costos energéticos, se proporciona un ciclo más de vida útil para el RAP, ayudando en gran medida a reducir la extracción de áridos nuevos desde pozos de empréstito, al implementarlo en la inmensa cantidad de caminos no pavimentados que existen en la actualidad.

En cuanto a la investigación, si bien el método de confección de esta propuesta es sencillo, el interiorizarse con los materiales, los ensayos adecuados y correcta forma de aplicación no fue tarea fácil, ya que no existen parámetros ni referencias de esta solución para caminos, ni tampoco información apropiada en el manejo y estudio del RAP, pero sin duda, se dio un paso importante al evaluar distintas emulsiones, mediante ensayos de laboratorio y también con el desarrollo de esta técnica a escala real, oportunidad muy relevante tanto en lo personal como para la investigación, ya que se pudo observar, aprender y corroborar que el empleo de esta solución es completamente viable para el mejoramiento de caminos de ripio, con el uso de las emulsiones de quiebre lento o controlado.

## Referencias

- [1] M. Miranda, A. (8/1/2017), disponible en: <https://www.latercera.com/noticia/60-los-caminos-chile-no-esta-pavimentado-regiones-viii-ix-lideran-deficit/>
- [2] Documento generado por el Ministerio de Obras Públicas, disponible en: [http://www.vialidad.cl/proyectos/caminosbasicos/Documents/Conceptos\\_CBasicos.pdf](http://www.vialidad.cl/proyectos/caminosbasicos/Documents/Conceptos_CBasicos.pdf)
- [3] Fundación Terram, disponible en: <https://www.terram.cl/2017/04/dga-alerta-de-peligrosidad-en-el-rio-aconcagua-por-extraccion-de-aridos/>
- [4] Rosa Zúñiga C., jefa Subdepto. Tecnológico y Materiales, Laboratorio Nacional de Vialidad, Marzo 2016 “Mezcla asfáltica con Pavimento asfáltico Recuperado”
- [5] Dato entregado por Jorge Villaroel, Gerente técnico de VIASCHILE, empresa encargada de gestionar la concesión de la Ruta 68.
- [6] Biblioteca Técnica, Superintendencia de Servicios Sanitarios, disponible en: <http://infota.siss.cl/concesiones/empresas/AguasdeAntofagasta/06%20Informaci%C3%B3n%20entregada%20por%20la%20empresa/01%20AGUAS%20ANTOFAGASTA/PU/1.%20Contratos%20y%20C/1.%20Contratos/2014/1812/ET/06%20ET%20PAVIMENTO%20ASFALTO%2029-10-10.pdf>
- [7] Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Vialidad, documento “Dimensionamiento y características de la red vial”, disponible en: <http://www.vialidad.cl/areasdevialidad/gestionvial/Paginas/Informesyestudios.aspx>
- [8] M. Miranda, A. (16/10/2016) <http://www2.latercera.com/noticia/gobierno-amplia-presupuesto-cumplir-plan-caminos-basicos/>
- [9] Rosa Zúñiga C., jefa Subdepto. Tecnológico y Materiales, Laboratorio Nacional de Vialidad, marzo 2016 “Mezcla asfáltica con Pavimento asfáltico Recuperado”.
- [10] User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction, disponible en: <https://www.fhwa.dot.gov>
- [11] Documento desarrollado por la Corporación del Desarrollo Tecnológico, disponible en : <http://www.registrocdt.cl/registrocdt/www/admin/uploads/docTec/emulsiones.pdf>
- [12] Documento desarrollado por la Corporación del Desarrollo Tecnológico, disponible en : <http://www.registrocdt.cl/registrocdt/www/admin/uploads/docTec/emulsiones.pdf>

[13] Curso Laboratorista Vial, volumen N°5.

[14] Reportaje del canal Megavisión (Chile), disponible en:  
<https://www.ahoranoticias.cl/programas/reportajes/224047-en-tierra-de-aridos-extraccion-y-venta-ilegal-en-los-rios.html>

Otras referencias:

- Manual de Carreteras, volúmenes N°3, N°5, N°7 y N°8, Edición 2017
- Manual de Obras de Vialidad, Pavimentación y Aguas Lluvias, versión 2018, Cap. N°12: Especificaciones Técnicas de Mantenimiento y Reconstrucción de Vías.

# Anexos

# Anexo N°1: Certificados de Análisis Químicos



## CERTIFICADO ANALISIS

Certificado  
Fecha

N°

51631  
23/11/2018

### Información de la Muestra de Ensayo

Solicitante	Productos Bituminosos S.A.
Producto	Emulsión asfáltica CSS-1h
Cantidad (GL)	1
Cliente	Laboratorio Nacional de Vialidad
Faena	-
Partida	445-0M201118
Guía/Muestra	-
Fecha	21-11-2018

### Resultados de Ensayes

Parámetro	Unidad	Valor	Especificación	Método
Viscosidad Saybolt Furol a 25°C	sSF	25	Min. 20 Máx.100	MC 8.302.12
Estabilidad de almacenamiento a 24hrs.	%	0	Máx. 1	MC 8.302.5
Tamizado	%	0,01	Máx. 0,10	MC 8.302.5
Mezcla con cemento	%	0	Máx. 2,0	MC 8.302.5
Ensayo de carga de partícula		+	Positiva	MC 8.302.5
<b>Destilación</b>				
Aceite destilado por volumen de emulsión	%	0	Informar	MC 8.302.5
Residuo	%	62	Min. 57	MC 8.302.5
<b>Ensayo del residuo de la destilación</b>				
Penetración 25°C, 100g, 5seg	0,1mm	54	Min.40 Máx. 90	MC 8.302.3
Ductilidad a 25°C, 5cm/min	cm	98	Min. 40	MC 8.302.6
Solubilidad en tricloroetileno	%	99,6	Min. 97,5	MC 8.302.11
Ensaye de la mancha	% Xilol	-30	Máx. 30	MC 8.302.7

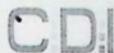
Analista CDI: Yan Huber



Dirección: Camino Suroeste N° 1020

-Información e identificación de la muestra proporcionada por el solicitante.

Figura N°7.1 - Certificado de análisis Químico de la emulsión CSS-1h



Centro de Investigación y Desarrollo  
Dirección: Carr. Sanatorio N°1021  
Fono Central: 22575540

### CERTIFICADO ANALISIS

Certificado N° 62486  
Fecha 14-03-2019

#### Información de la Muestra de Ensayo

Solicitante	Productos Bituminosos S.A.
Producto	Emulsión Asfáltica ERC
Cantidad (gal)	-
Cliente	Bitumix
Faena	Memoria
Partida	-
Guía/Muestra	168
Fecha	04-01-2019

#### Resultados de Ensayos

Parámetro	Unidad	Valor	Especificación	Método
Viscosidad Saybolt Furol a 25°C	sSF	26	Min 20 Max 100	MC 8.302.12
Estabilidad de almacenamiento a 24hrs.	%	0.1	Máx. 1.0	MC 8.302.5
Tamizado retenido N°20	%	0	Máx. 0.1	MC 8.302.5
Mezcla con cemento	%	1	Máx. 2.0	MC 8.302.5
Ensayo de carga de partícula		+	Positiva	MC 8.302.5
<b>Destilación</b>				
Acete destilado	%	0	Informar	MC 8.302.5
Residuo asfalto	%	83	Min. 57	MC 8.302.5
<b>Ensayo del residuo de la destilación</b>				
Penetración 25°C, 100g, 5seg	0.1mm	54	Min. 40 Max. 90	MC 8.302.3
Ductilidad a 25°C, 5cm/min	cm	58	Min. 40	MC 8.302.6
Solubilidad en tetrahidrofurano	%	>97.5	Min. 97.5	MC 8.302.11
Ensayo de la mancha	% Xilol	-30	Máx. 30	MC 8.302.7



Analista: CDI - Vilma Huayra

Dirección: CDI - Cristian Diaz

La formación e identificación de la muestra proporcionada por el solicitante.

Figura N°7.2 - Certificado de análisis Químico de la emulsión CQS (ERC: Emulsión de Rotura Controlada)



CASA MATRIZ Cerro Sombrero N° 1010 - Fono : 56 2 26759200  
 Maipú - Santiago  
 SUCURSAL Camino Lengua N° 3361 - Talcahuano  
 SUCURSAL Avda. Quinta Industrial N° 555, Complejo Portuario Mejillones  
 Mejillones - Antofagasta  
 www.probisa.cl

### CERTIFICADO ANALISIS

Producto	Emulsión modificada ERC-M	Certificado	N°	22613
Cantidad (gal)	1	Fecha		14-03-2019
Cliente	Bitumix			
Paena	Memoria			
Partida	-			
Guía/Muestra	189			
Fecha control	23-01-2019			

Parámetro	Unidad	Valor	Especificación	Método
Viscosidad Saybolt Furol a 25°C	sSF	24	Min.20 Máx. 50	MC 8.302.12
Sedimentación a 7días	%	2	Máx. 5	MC 8.302.5
Tamizado retenido N°20	%	0	Máx. 0,1	MC 8.302.5
Carga de partícula		+	Positiva	MC 8.302.5
<b>Análisis del residuo</b>				
Residuo por evaporación	%	62	Min. 62	MC 8.302.5
Penetración a 25°C, 100gr, 5seg	0,1mm	40	Min.40 Máx. 90	MC 8.302.3
Punto de ablandamiento	°C	71,2	Informar	MC 8.302.16
Ductilidad a 25°C, 5cm/min	cm	55	Min. 40	MC 8.302.8
Recuperación elástica por torsión a 25°C	%	33	Min. 20	NLT 329
Índice Fraass	°C	-17	Máx.-17	MC 8.302.17



*[Handwritten Signature]*  
 Laboratorio  
 Control de Calidad

Figura N°7.3 - Certificado de análisis Químico de la emulsión CQS-modificada con polímeros

## Anexo N°2: Densidades del RAP

Densidad aparente suelta:

	Peso molde + RAP (gr)	Densidad aparente suelta (kg/m <sup>3</sup> )	Promedio (kg/m <sup>3</sup> )
p1	19420	1432	1416
p2	19112	1400	
p3	19259	1415	
Masa cilindro	5266		
Volumen cilindro	9887		

Tabla N°7.1 - Densidad aparente suelta

Densidad real seca, neta y absorción de agua:

M <sub>ss</sub>	5511 gr
M <sub>sum</sub>	3282 gr
M <sub>s</sub>	5436 gr
Densidad real seca	2439 (kg/m <sup>3</sup> )
Densidad neta	2524 (kg/m <sup>3</sup> )
Absorción de agua	1,38%

Tabla N°7.2 - Densidad real seca, neta y absorción de agua

## Anexo N°3: Análisis del polvo de roca utilizado en esta investigación

Granulometría de polvo de roca:

Tamiz	Porcentaje que pasa (%)
3/8"	100
N°4	95
N°8	66
N°16	47
N°30	35
N°50	25
N°100	18
N°200	13

Tabla N°7.3 - Granulometría de polvo de roca

En la sección 5.408 del volumen N°5 del MC, se establecen los requisitos para el agregado pétreo de mezclas asfálticas indicados en las tablas 5.408.201.A y 5.408.201.B.

Se establece que la fracción gruesa retenida en tamiz 2,5 mm (ASTM N°8), deberá estar constituida por partículas chancadas, tenaces, limpias, entendiéndose por limpias, partículas libres de materia orgánica, arcilla o materias extrañas.

Los resultados para fracción gruesa de áridos para mezclas asfálticas:

ENSAYE	REQUISITO PARA RODADURA	RESULTADO POLVO DE ROCA	MÉTODO (MC)
Desgaste Los Ángeles	25% máx.	15%	8.202.11
Partículas Chancadas	90% mín.	98%	8.202.6
Partículas Lajeadas	10% máx.	0%	8.202.6

Tabla N°7.4 – Análisis de polvo de roca, fracción gruesa

La fracción fina corresponde a la que pasa por el tamiz 2,5 mm (ASTM N°8), la cual debe estar constituida por agregados provenientes de la trituración de rocas o grabas. El resultado para la fracción fina de áridos para mezclas asfálticas se muestra en la siguiente tabla:

ENSAYE	REQUISITO PARA RODADURA	RESULTADO POLVO DE ROCA	METODO (MC)
Índice de Plasticidad	NP	NP	8.102.4

Tabla N°7.5 – Análisis de polvo de roca, fracción fina

El polvo de roca proveniente de la planta El Guiltro ubicada en la Sexta Región a orillas del río Cachapoal (Granulometría en anexo N°2), cumple con todos los requerimientos que se exigen para utilizar el agregado pétreo en mezclas asfálticas como; carpeta de rodadura, capa intermedia, o bases.

Densidades del polvo de roca:

Fracción	Polvo de roca El Guiltro	
	Gruesa	Fina
Densidad real seca (kg/m <sup>3</sup> )	2.681	2.662
Densidad neta (kg/ m <sup>3</sup> )	2.753	2.766
Absorción (%)	1,2	1,6
Densidad aparente suelta	1451	1655

Tabla N°7.6 – Densidad real seca, neta y absorción del polvo de roca

Densidad real seca de la mezcla con 30% de polvo de roca se muestra a continuación:

$$2439 * 0,7 + 2662 * 0,3 = 2506 \text{ kg/m}^3$$

## Anexo N°4: Ensaye de compactación Proctor de RAP

Determinación		1	2	3	4	5	
Humedad aparente		2%	4%	6%	8%	10%	(%)
Agua agregada		120	240	360	480	600	(cm <sup>3</sup> )
Humedad REAL	w=	1,6	3,7	5,7	7,4	8,6	(%)
Peso molde + Mezcla	M=	6717	6924	7011	6972	6865	(g)
Peso molde solo	S=	2755	2755	2755	2755	2755	(g)
Peso material solo	P=(M-S)	3962	4169	4256	4217	4110	(g)
Volumen molde	V=	2122	2122	2122	2122	2122	(cm <sup>3</sup> )
Densidad compactada húmeda	$\rho_w=(P/V)$	1867	1965	2006	1987	1937	(kg/m <sup>3</sup> )
Densidad compactada seca	$\rho_d=\rho_w/(w+100)*100$	1838	1895	1898	1850	1784	(kg/m <sup>3</sup> )

Tabla N°7.7 - Resultados ensaye Proctor Modificado

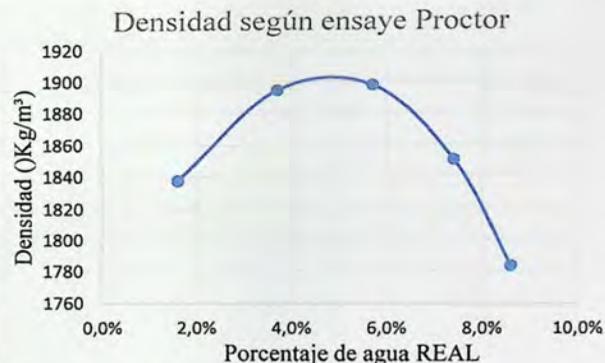


Figura N°7.4 - Gráfico de Humedad/Densidad seca

Capsula		a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	
Peso capsula	X=	111,5	94,1	111,2	113,2	112,2	113,1	112,1	112,0	110,3	111,4	(g)
Peso capsula + suelo húmedo	Y=	932,1	891,3	929,9	946,5	1164,1	977,8	936,7	1063,5	1033,9	915,6	(g)
Peso capsula + suelo seco	Z=	920,5	878,2	900,2	916,5	1107,9	930,3	878,9	999,8	962,8	850,2	(g)
Agua	A=Y-Z	11,6	13,1	29,7	30	56,2	47,5	57,8	63,7	71,1	65,4	(g)
Peso suelo seco	B=Z-Y	809	784,1	789	803,3	995,7	817,2	766,8	887,8	852,5	738,8	(g)
Humedad real	w=(A/B)*100	1,4	1,7	3,8	3,7	5,6	5,8	7,5	7,2	8,3	8,9	(%)
Promedio	w=	1,6		3,7		5,7		7,4		8,6		

Tabla N°7.8 - Resultados de corrección de humedad Proctor

Nota: El porcentaje de agua óptimo de compactación para el RAP (sin emulsión) es de aproximadamente un 5%. Este valor puede variar en el contenido de la mezcla asfáltica de diseño, ya que la emulsión también contiene un porcentaje de agua. Se debe escoger una cantidad de agua apropiada para el mezclado y no para su compactación óptima, siendo preferible considerar un porcentaje de agua mayor a la humedad óptima para compactación, debido a que en el proceso de revoltura se pierde cierta cantidad de agua por evaporación.

El valor obtenido concuerda con los valores usuales para áridos gruesos con bajo porcentaje de finos.

## Anexo N°5: Resultados generales de probetas Marshall confeccionadas

Resultados generales de dosificaciones con emulsión CRS-2 y 100% de RAP										
Porcentaje de Emulsión	Contenido Asfáltico 68,6% (gr)	Agua libre	RAP+PDR (gr)	Emulsión (gr)	Agua (gr)	Total (gr)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad promedio (kg/m <sup>3</sup> )	Estabilidad (N)	VAM %
7%	36,47	3,0%	1100	55	33	1188	1996	1997	-	20,8
	36,47	3,0%	1100	55	33	1188	1990		-	21,0
	36,47	3,0%	1100	55	33	1188	2005		-	20,4
8%	43,76	3,0%	1100	66	33	1199	1977	1985	-	22,0
	43,76	3,0%	1100	66	33	1199	1992		-	21,5
	43,76	3,0%	1100	66	33	1199	-		-	-
9%	51,05	3,0%	1100	77	33	1210	-	-	-	-
	51,05	3,0%	1100	77	33	1210	-		-	-
	51,05	3,0%	1100	77	33	1210	-		-	-
6%	36,47	3,5%	1100	55	38,5	1193,5	2022	2030	-	19,8
	36,47	3,5%	1100	55	38,5	1193,5	2039		-	19,3
	36,47	3,5%	1100	55	38,5	1193,5	2035		-	19,2
7%	43,76	3,5%	1100	66	38,5	1204,5	2024	2016	-	20,2
	43,76	3,5%	1100	66	38,5	1204,5	2017		-	20,5
	43,76	3,5%	1100	66	38,5	1204,5	2008		-	20,8
8%	51,05	3,5%	1100	77	38,5	1215,5	1996	1998	-	21,8
	51,05	3,5%	1100	77	38,5	1215,5	2002		-	21,6
	51,05	3,5%	1100	77	38,5	1215,5	1995		-	21,8
5%	36,47	4,0%	1100	55	44	1199	2023	2032	-	19,7
	36,47	4,0%	1100	55	44	1199	2039		-	19,1
	36,47	4,0%	1100	55	44	1199	2034		-	19,3
6%	43,76	4,0%	1100	66	44	1210	2048	2047	-	19,2
	43,76	4,0%	1100	66	44	1210	2051		-	19,1
	43,76	4,0%	1100	66	44	1210	2041		-	19,5

Tabla N°7.9 - Resultados generales de mezclas con emulsión CRS-2 y 100% de RAP

7%	51,05	4,0%	1100	77	44	1221	2004	2018	-	21,5
	51,05	4,0%	1100	77	44	1221	2023		-	20,7
	51,05	4,0%	1100	77	44	1221	2027		-	20,6
4%	43,76	4,5%	1100	66	49,5	1215,5	2024	2026	-	20,2
	43,76	4,5%	1100	66	49,5	1215,5	2019		-	20,4
	43,76	4,5%	1100	66	49,5	1215,5	2034		-	19,8
5%	36,47	4,5%	1100	55	49,5	1204,5	2043	2037	-	18,9
	36,47	4,5%	1100	55	49,5	1204,5	2030		-	19,4
	36,47	4,5%	1100	55	49,5	1204,5	2039		-	19,1
6%	43,76	4,5%	1100	66	49,5	1215,5	2029	2024	-	20,0
	43,76	4,5%	1100	66	49,5	1215,5	2015		-	20,5
	43,76	4,5%	1100	66	49,5	1215,5	2027		-	20,1

Tabla N°7.10 – Continuación de resultados generales de mezclas con emulsión CRS-2 y 100% de RAP

Resultados generales de mezclas con emulsión CRS-2 con 70 % de RAP y 30% de polvo de roca (HUMEDAD ÓPTIMA)									
Porcentaje de Emulsión	Contenido Asfáltico en emulsión 66,3% (gr)	Agua libre	RAP (gr)	Emulsión (gr)	Agua (gr)	Total (gr)	Densidad (kg/m³)	VAM (%)	
5%	36,47	3%	1100	55	33,0	1188	2005	23,0	
	36,47	4%	1100	55	44,0	1199	2022	22,3	
	36,47	5%	1100	55	55,0	1210	2058	20,9	
6%	43,76	3%	1100	66	33,0	1199	2015	23,1	
	43,76	4%	1100	66	44,0	1210	2022	22,8	
	43,76	5%	1100	66	55,0	1221	2031	22,5	
7%	51,05	3%	1100	77	33,0	1210	2011	23,7	
	51,05	4%	1100	77	44,0	1221	2018	23,5	
	51,05	5%	1100	77	55,0	1232	1997	24,3	

Tabla N°7.11 - Resultados generales de mezclas con emulsión CRS-2 con 70 % de RAP y 30% de polvo de roca (HUMEDAD ÓPTIMA)

Resultados de estabilidad seca y estabilidad saturada con 70% de RAP más 30% polvo de roca con 6,5% de agua de premezcla													
Porcentaje de Emulsión	Contenido Asfáltico 68,6% (gr)	Agua libre (%)	RAP PDR (gr)	Emulsión (gr)	Agua libre (gr)	Peso (gr)	Estabilidad (N)		Estabilidad seca (N)		Estabilidad Saturada (N)		Densidad promedio (kg/m <sup>3</sup> )
							Seca	Saturada	promedio	corregido	promedio	corregido	
4%	30,2	5,3%	1100	44	58,5	1202,5	4746	2443	4642	3964	2451	2102	2007
	30,2	5,3%	1100	44	58,5		4396	2460					
	30,2	5,3%	1100	44	58,5		4786	2448					
5%	37,7	5,0%	1100	55	55,0	1210,0	4674	2686	4441	3834	2536	2215	2022
	37,7	5,0%	1100	55	55,0		4380	2240					
	37,7	5,0%	1100	55	55,0		4271	2681					
6%	45,3	4,7%	1100	66	51,5	1217,5	4564	2837	4374	3815	2718	2418	2018
	45,3	4,7%	1100	66	51,5		4329	2621					
	45,3	4,7%	1100	66	51,5		4229	2697					
7%	52,8	4,4%	1100	77	48,1	1225,1	4181	2793	4183	3596	2734	2376	1996
	52,8	4,4%	1100	77	48,1		3921	2580					
	52,8	4,4%	1100	77	48,1		4446	2829					
8%	60,4	4,1%	1100	88	44,6	1232,6	4009	2633	3990	3415	2638	2286	1985
	60,4	4,1%	1100	88	44,6		3697	2719					
	60,4	4,1%	1100	88	44,6		4262	2562					

Tabla N°7.12 - Resultados de estabilidad seca y estabilidad saturada con 70% de RAP más 30% polvo de roca (PDR) y emulsión CRS-2

% de emulsión	Fluencia seca (0.25mm)			Promedio SE.	Fluencia saturada (0.25mm)			Promedio SA.
4%	18,2	17,9	20,7	18,9	23,0	21,5	19,3	21,3
5%	19,5	22,5	20,4	20,8	19,3	22,1	21,9	21,1
6%	19,8	20,2	22,6	20,9	23,5	24,3	22,1	23,3
7%	21,7	20,6	21,5	21,3	23,7	23,9	24,9	24,2
8%	20,9	22,7	23,1	22,2	24,1	24,8	26,5	25,1

Tabla N°7.13 - Resultados de fluencia seca y fluencia saturada con 70% de RAP más 30% polvo de roca (PDR) y emulsión CRS-2

Resultados generales de mezclas con emulsión CQS y 100% de RAP													
Porcentaje de Emulsión	Residuo Asfáltico (gr)	Agua libre	RAP (gr)	Emulsión (gr)	Agua (gr)	Total (gr)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad promedio	Estabilidad (Newton)	Corregido (N)	Corrección de calibración (N)	Promedio (N)	VAM
6%	41,6	3,3%	1100	66	36,3	1202,3	1978	1975	2694	2368	2545	2320	21,8
	41,6	3,3%	1100	66	36,3	1202,3	1961		2117	1840	2011		22,5
	41,6	3,3%	1100	66	36,3	1202,3	1987		2625	2229	2404		21,5
7%	48,5	2,9%	1100	77	31,9	1208,9	1999	1996	3557	3127	3313	3452	21,5
	48,5	2,9%	1100	77	31,9	1208,9	2005		6527	5945	Medición errónea		21,3
	48,5	2,9%	1100	77	31,9	1208,9	1984		3831	3402	3591		22,1
8%	55,4	2,5%	1100	88	27,5	1215,5	1978	1985	3147	2749	2930	3066	22,8
	55,4	2,5%	1100	88	27,5	1215,5	1981		3265	2762	2943		22,7
	55,4	2,5%	1100	88	27,5	1215,5	1996		3628	3138	3324		22,1

Tabla N°7.14 - Resultados generales de mezclas con emulsión CQS y 100% de RAP

Resultados generales de mezclas con emulsión CQS- M y 100% de RAP													
Porcentaje de Emulsión	Residuo Asfáltico (gr)	Agua libre	RAP (gr)	Emulsión (gr)	Agua (gr)	Total (gr)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad promedio	Estabilidad (Newton)	Corregido (N)	Corrección de calibración (N)	Promedio (N)	VAM
6%	40,9	3,2%	1100	66	35,2	1201,2	1997	1992	2704	2393	2570	2930	21,0
	40,9	3,2%	1100	66	35,2	1201,2	1991		3311	2910	3093		21,3
	40,9	3,2%	1100	66	35,2	1201,2	1989		3365	2873	3127		21,4
7%	47,7	2,8%	1100	77	30,8	1207,8	2008	2020	3247	2887	3071	3565	21,1
	47,7	2,8%	1100	77	30,8	1207,8	2018		3611	3221	3407		20,7
	47,7	2,8%	1100	77	30,8	1207,8	2035		4459	4022	4218		20,0
8%	54,6	2,5%	1100	88	27,5	1215,5	2014	2011	4031	3503	3693	3416	21,3
	54,6	2,5%	1100	88	27,5	1215,5	1989		3350	2931	3114		22,3
	54,6	2,5%	1100	88	27,5	1215,5	2029		3801	3254	3441		20,7

Tabla N°7.15 - Resultados generales de mezclas con emulsión CQS-M y 100% de RAP

Resultados generales de mezclas con emulsión CSS-1h y 100% de RAP													
Porcentaje de Emulsión	Residuo Asfáltico (gr)	Agua libre	RAP (gr)	Emulsión (gr)	Agua (gr)	Total (gr)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad promedio	Estabilidad (Newton)	Corregido (N)	Corrección de calibración (N)	Promedio (N)	VAM
6%	40,9	3,2	1100	66	35,2	1201,2	2010	2004	3317	2946	3129	2754	20,5
	40,9	3,2	1100	66	35,2	1201,2	2003		2663	2335	2512		20,8
	40,9	3,2	1100	66	35,2	1201,2	1999		2786	2443	2621		21,0
7%	47,7	2,8	1100	77	30,8	1207,8	2015	2015	3512	3122	3308	3362	20,8
	47,7	2,8	1100	77	30,8	1207,8	2022		4065	3541	3731		20,5
	47,7	2,8	1100	77	30,8	1207,8	2007		3211	2864	3047		21,1
8%	54,6	2,5	1100	88	27,5	1215,5	1996	1997	2790	2397	2574	2885	22,0
	54,6	2,5	1100	88	27,5	1215,5	2009		3554	3039	3224		21,5
	54,6	2,5	1100	88	27,5	1215,5	1985		3062	2676	2856		22,5

Tabla N°7.16 - Resultados generales de mezclas con emulsión CSS-1h y 100% de RAP

Resultados generales de mezclas con emulsión CQS con 70% de RAP más 30% polvo de roca													
Porcentaje de Emulsión	Contenido Asfáltico 63% (gr)	Agua libre	RAP+PDR (gr)	Emulsión (gr)	Agua (gr)	Total (gr)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad promedio	Estabilidad (Newton)	Corregido (N)	Corrección de calibración (N)	Promedio (N)	VAM
5,44%	37,7	4,5%	1100	59,8	49,5	1209	1956	1981	2945	2521	2700	3391	24,9
	37,7	4,5%	1100	59,8	49,5	1209	1991		4280	3850	4044		23,6
	37,7	4,5%	1100	59,8	49,5	1209	1997		3722	3241	3428		23,3

Tabla N°7.17 - Resultados generales de mezclas con emulsión CQS con 70% de RAP más 30% polvo de roca (PDR)

Resultados generales de mezclas con emulsión CQS-M con 70% de RAP más 30% polvo de roca													
Porcentaje de Emulsión	Contenido Asfáltico 62% (gr)	Agua libre	RAP+PDR (gr)	Emulsión (gr)	Agua (gr)	Total (gr)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad promedio	Estabilidad (Newton)	Corregido (N)	Corrección de calibración (N)	Promedio (N)	VAM
5%	34,1	4,7%	1100	55,0	51,5	1206,5	1971	1980	3776	3455	3644	3466	24,1
	34,1	4,7%	1100	55,0	51,5	1206,5	1989		3390	3102	3287		23,4
5.53%	37,7	4,5%	1100	60,8	49,5	1210,3	1990	1982	4392	4028	4224	4428	23,6
	37,7	4,5%	1100	60,8	49,5	1210,3	1993		4467	4101	4298		23,5
	37,7	4,5%	1100	60,8	49,5	1210,3	1964		5011	4560	4762		24,6
6%	40,9	4,2%	1100	66,0	46,2	1212,2	1973	1974	4311	3578	3769	3862	24,5
	40,9	4,2%	1100	66,0	46,2	1212,2	1955		3898	3200	3387		25,2
	40,9	4,2%	1100	66,0	46,2	1212,2	1995		5125	4233	4431		23,6
7%	47,7	3,8%	1100	77,0	41,8	1218,8	1968	1966	2273	2046	2219	2327	25,1
	47,7	3,8%	1100	77,0	41,8	1218,8	1953		2331	1932	2104		25,7
	47,7	3,8%	1100	77,0	41,8	1218,8	1977		2948	2479	2657		24,7

Tabla N°7.18 - Resultados generales de mezclas con emulsión CQS-M con 70% de RAP más 30% polvo de roca (PDR)

Resultados generales de mezclas con emulsión CSS-1h con 70% de RAP más 30% polvo de roca													
Porcentaje de Emulsión	Contenido Asfáltico 62% (gr)	Agua libre	RAP+PDR (gr)	Emulsión (gr)	Agua (gr)	Total (gr)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad promedio	Estabilidad (Newton)	Corregido (N)	Corrección de calibración (N)	Promedio (N)	VAM
5,53%	37,7	4,5%	1100	60,83	49,5	1210	2068	2061	-	-	-	3986	20,6
	37,7	4,5%	1100	60,83	49,5	1210	2046		4353	3887	4081		21,4
	37,7	4,5%	1100	60,83	49,5	1210	2051		3887	3459	3648		21,3
	37,7	4,5%	1100	60,83	49,5	1210	2078		4578	4033	4229		20,2

Tabla N°7.19 - Resultados generales de mezclas con emulsión CSS-1h con 70% de RAP más 30% polvo de roca (PDR)

**Anexo N°6: Tabla de cálculo estimativo de longitudes de caminos con 7000 m<sup>3</sup> de RAP**

Volumen de RAP esponjado (m <sup>3</sup> )	Volumen compactado (m <sup>3</sup> )	Espesor de calzada (cm)	Área de calzada (m <sup>2</sup> )	Ancho de calzada (m)	Longitud de calzada (m)
7000	5000	10	50000	3	16666,7
7000	5000	10	50000	4	12500,0
7000	5000	10	50000	5	10000,0
7000	5000	10	50000	6	8333,3
7000	5000	10	50000	7	7142,9
<b>7000</b>	<b>5000</b>	<b>10</b>	<b>50000</b>	<b>8</b>	<b>6250,0</b>
7000	5000	10	50000	9	5555,6
7000	5000	10	50000	10	5000,0
7000	5000	10	50000	11	4545,5
7000	5000	10	50000	12	4166,7
7000	5000	10	50000	13	3846,2
7000	5000	10	50000	14	3571,4

*Tabla N°7.20 - Tabla de cálculo estimativo de longitudes de caminos con 7000 m<sup>3</sup> de RAP*

A modo de ejemplo, según la tabla 3.201.5.C del volumen N°3 del MC, para un camino local bidireccional, con una velocidad de proyecto de 50 km/h, el ancho total de calzada varía entre 8 y 10 metros.

$$\frac{RAP \text{ m}^3}{\text{Factor de esponjamiento}} * \frac{100cm}{\text{Espesor calzada} * 1m} * \frac{1}{\text{Ancho calzada}} = \text{Longitud del camino}$$

$$\frac{7000 \text{ m}^3}{1.4} * \frac{100cm}{10cm * 1m} * \frac{1}{8m} = 6250 \text{ m}$$

Por lo tanto, con 7000 m<sup>3</sup> de RAP, se podrían desarrollar 6 kilómetros de caminos con esta solución.

## Anexo N°7: Imágenes de laboratorio



*Imagen N°7.5 - Primera mezcla con RAP y emulsión CRS-2.*



*Imagen N°7.6 - Probeta Proctor*



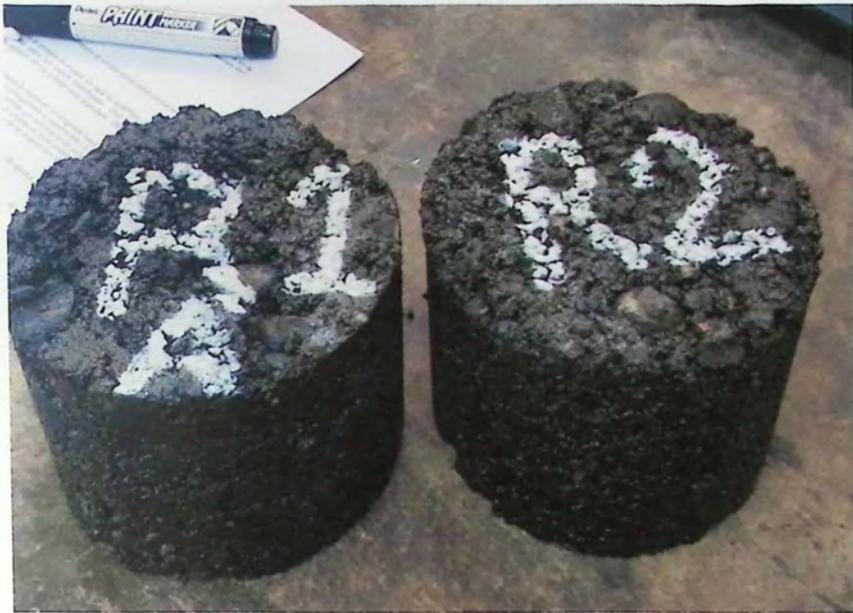
*Imagen N°7.7 - Sumergimiento para obtener densidad real seca*



*Imagen N°7.8 - Recipiente metálico para densidad aparente suelta*



*Imagen N°7.9 - Máquina compactadora de probetas Marshall*



*Imagen N°7.10 - Primeras probetas con 100% de RAP y CRS-2*



*Imagen N°7.11 - Sumergimiento de probeta para densidad real de mezcla asfáltica*



*Imagen N°7.12 - Probetas de RAP con agregado de polvo de roca y emulsión CRS-2*



*imagen N°7.13 - Probetas para estabilidad seca y saturada con emulsión CRS-2*



*Imagen N°7.14 - Máquina Marshall*



*Imagen N°7.15 - Bomba desecadora al vacío para estabilidad saturada*



*Imagen N°7.16 - Bomba desecadora al vacío para estabilidad saturada*



*Imagen N°7.17 - Probeta disgregada luego de extraerla de la piscina a 60°C*



*Imagen N°7.18 - Probetas con emulsión CSS-1h*



*Imagen N°7.19 - Estabilidad Marshall para probeta CSS-1h*



*Imagen N°7.20 - Probeta sin desmoldar con emulsión CQS*



*Imagen N°7.21- Mezcla con CQS y CRS-2*



*Imagen N°7.22 - Estabilidad Marshall para mezcla con el uso de emulsión CQS*



*Imagen N°7.23 - Probetas con 100% de RAP y emulsión CQS*



Imagen N°7.24 - Probetas CQS sumergidas a 60°C

CERTIFICADO DE ANALISIS  
CRS-2  
DDC. N° 991

Fecha	20/10/20			
Cliente	REP. VULFONORTE			
Dirección	RE. TIGAR			
Laboratorio	1-3			
N° Proyecto	708			
Cantidad	00 TONELADAS			
N° de Lote	4305			

ENSAYO	NORMA	RESULTADOS	MIN.	MAX.
Temperatura de Solubilización a 20°C (h)	0.202.02	010	000	400
Estabilidad al almacenamiento 1 día (%)	0.202.03	0.02	-	1
Demulsibilidad (%)	0.202.04	84.7	40	-
Carga de Partícula	0.202.05	-	Positiva	-
Temperatura (%)	0.202.06	0	-	0.1
Acidez por Destilación (%)	0.202.07	68.6	50	-
Acidez (%)	0.202.08	1.0	-	3
Penetración a 25°C (0.5, 5 y 10 mm)	0.202.09	0.00	0.00	750
Viscosidad a 5°C, 5 cm/min (cm)	0.202.10	70	40	-
Estabilidad en la Emulsión (%)	0.202.11	99	97.5	-
Ensayo de la Mancha (M&B)	0.202.12	00	-	30

Imagen N°7.25 - Análisis químico CRS-2



*Imagen N°7.26 - Diferencia entre asfalto espumado y mezcla con CRS-2*



*Imagen N°7.27 Emulsiones CQS y CQS- M antes del quiebre y luego del quiebre (1 hora 20 minutos a 20 °C)*



*Imagen N°7.28 – Probetas varias*



*Imagen N°7.28 - Mezcla con CQS*



*Imagen N°7.29 - Testigos CSS-1h y CRS-2*