

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL**



**RECICLADO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO CON
CEMENTO EN PROYECTOS DE CONSERVACIÓN VIAL -
SERVICIO DE CONSERVACIÓN VIAL PANAMERICANA SUR**

INFORME DE SUFICIENCIA

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO CIVIL

FRANKLIN VARGAS DÁVILA

Lima- Perú

2015

	Pág.
RESUMEN	1
LISTA DE TABLAS	2
LISTA DE FIGURAS	3
INTRODUCCIÓN	6
CAPÍTULO I: GENERALIDADES	7
1.1 HISTORIA DEL ARTE DEL RECICLADO DE PAVIMENTOS CON CEMENTO	7
1.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL RECICLADO DE PAVIMENTOS CON CEMENTO	8
1.2.1 Ventajas	8
1.2.2 Desventajas	8
1.3 ESTUDIOS PRELIMINARES	9
1.3.1 Viabilidad del reciclado de pavimentos con cemento	9
1.3.2 Evaluación de la vía existente	9
1.3.3 Características de los Materiales del Pavimento	11
1.3.4 Drenaje y Clima	12
1.3.5 Tráfico de Diseño	12
1.3.6 Planes de ampliación y bermas	12
1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
1.5 OBJETIVOS	13
1.5.1 Objetivo Principal	13
1.5.2 Objetivos Específicos	13
1.6 METODOLOGÍA DE TRABAJO	13

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	15
2.1 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES RECICLADOS	15
2.1.1 Granulometría	15
2.1.2 Plasticidad	17
2.1.3 Contenido de agua	17
2.1.4 Densidad de la mezcla	18
2.1.5 Cementos y otros aditivos	18
2.1.6 Plazo de trabajabilidad	21
2.2 DIMENSIONAMIENTO DE LA REHABILITACIÓN DE UN PAVIMENTO EXISTENTE MEDIANTE EL RECICLADO CON CEMENTO	22
2.2.1 Mediciones de daños superficiales	22
2.2.2 Mediciones de rugosidad e Índice de Serviciabilidad Presente (PSI)	25
2.2.3 Mediciones de ahuellamientos	26
2.2.4 Mediciones de deflexiones	26
CAPÍTULO III: PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO Y ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD	32
3.1 EQUIPOS PARA LA EJECUCIÓN DEL RECICLADO DE PAVIMENTOS CON CEMENTO	32
3.2 PROCESO CONSTRUCTIVO DE RECICLADO DE PAVIMENTOS CON CEMENTO	35
3.3 EJECUCIÓN DE TRABAJOS	35
3.3.1 Extendido del cemento	36
3.3.2 Pulverizado y mezclado	37
3.3.3 Ejecución de juntas transversales	38
3.3.4 Compactación	38
3.3.5 Perfilado	39
3.3.6 Curado y protección del material reciclado	40

3.4 CONTROL Y ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD	41
3.4.1 Control de Calidad durante la construcción	41
3.4.2 Control de Calidad después de la construcción	43
CAPÍTULO IV: EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO	45
4.1 CONTROL DE COSTOS	45
4.1.1 Costo de construcción de una capa reciclada con Cemento	45
4.2 CONTROL DE PRODUCTIVIDAD	48
4.2.1 Análisis de Valor Ganado	49
CAPÍTULO V: APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DEL RECICLADO DEL RECICLADO DE PAVIMENTOS CON CEMENTO EN EL SERVICIO DE CONSERVACIÓN VIAL PANAMERICANA SUR	51
5.1 OBJETIVO	51
5.2 ALCANCE	51
5.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO	51
5.3.1 Contrato de Conservación Vial por Niveles de Servicio	51
5.3.2 Información Contractual del Proyecto	52
5.3.3 Contexto Físico	53
5.3.4 Niveles de Servicio exigidos	54
5.4 ESTUDIOS PRELIMINARES	54
5.4.1 Evaluación de la condición superficial, estructural y funcional inicial del Tramo I: Atico – Acc. Microondas – La Repartición	57
5.4.2 Mecánica de Suelos para la caracterización de la estructura del Pavimento existente	64
5.4.3 Tráfico de Diseño	66
5.4.4 Tramificación	67
5.5 RECURSOS A EMPLEARSE	70

5.6	DISEÑO DE MEZCLA	72
5.6.1	Proceso de Muestreo	72
5.6.2	Preparación de muestras para Diseño de Mezcla	72
5.7	PROCESO CONSTRUCTIVO Y ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD	74
5.7.1	Proceso Constructivo	74
5.7.2	Aseguramiento de la Calidad	77
5.8	ANÁLISIS DE COSTOS Y PRODUCTIVIDAD	81
5.8.1	Análisis de Costos	81
5.8.2	Análisis de Productividad	83
	CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	91
6.1	CONCLUSIONES	91
6.2	RECOMENDACIONES	92
	BIBLIOGRAFÍA	93
	ANEXOS	95

RESUMEN

El reciclado de pavimentos en frío con adición cemento surge como propuesta de solución técnica para la rehabilitación del pavimento existente deteriorado, dentro del plan de conservación vial en los denominados contratos por niveles de servicio, debido a sus amplias ventajas en comparación con los tratamientos clásicos de rehabilitación de pavimentos, lo cual en muchos casos resulta la alternativa más económica de rehabilitación para este tipo de contratos.

En el presente informe se desarrollará de acuerdo a una metodología estructurada por capítulos los diferentes aspectos de esta técnica.

El Capítulo I, denominado Antecedentes, trata sobre el marco donde se desarrolla esta técnica, las ventajas y desventajas del reciclado de pavimentos en frío con cemento y una breve descripción de la metodología para determinar la viabilidad de este tipo de Reciclado.

El Capítulo II, denominado Estudios de Ingeniería, es el siguiente paso dentro de la metodología el cual desarrolla temas sobre el diseño de la mezcla, granulometría recomendada para la mezcla, tipo de cemento a emplear, densidades, número estructural faltante, ensayos para determinar la resistencia y durabilidad de la mezcla producto del reciclado in-situ con adición de cemento.

El Capítulo III, denominado procedimiento constructivo y aseguramiento de la calidad, desarrolla aspectos de la secuencia de actividades, equipos y recursos a emplear para el desarrollo de los trabajos. Así también como los controles de calidad mínimos que se requieren para la aceptación de los trabajos, tolerancias, especificaciones técnicas, etc.

El Capítulo IV, denominado control de costos y productividad, desarrolla temas para determinar los análisis de costo unitario real de los trabajos de reciclado de pavimentos en frío con adición de cemento, así como el registro de los rendimientos obtenidos y los recursos empleados para la obtención de los mismos.

El Capítulo V, denominado aplicación de la técnica del reciclado de pavimentos en frío con cemento, desarrolla y aplica la metodología descrita en los capítulos anteriores y enmarca a la ejecución de los trabajos de reciclado en un Proyecto de Conservación Vial por niveles de servicio.

LISTA DE TABLAS

Tabla N°01.- "Husos granulométricos del material granular del suelocemento"	16
Tabla N°02.- "Husos Granulométricos Recomendados (100% RAP / Material Granular)"	16
Tabla N°03.- "Requisitos a cumplir por los cementos Portland según NTP 334.009"	21
Tabla N°04.- "Daños de los Pavimentos Asfaltados"	23
Tabla N°05.- "Clasificación de la Serviciabilidad"	26
Tabla N°06.- "Categorías del Índice de Deterioro Superficial, I _s "	29
Tabla N°07.- "Categorías del Índice de Rugosidad Internacional, IRI"	29
Tabla N°08.- "Categorías del porcentaje de Fallas Estructurales"	30
Tabla N°09.- "Categorías del porcentaje de Fallas Térmicas"	30
Tabla N°10.- "Categorías del Faltante Estructural o H de Refuerzo"	30
Tabla N°11.- "Clasificación de rodillos vibratorios lisos"	34
Tabla N°12.- "Ratio de costo de contenido de cemento"	46
Tabla N°13.- "Costo promedio actualizado al 2014, de reciclado de 20 cm"	47
Tabla N°14.- "Datos General Tramo I"	54
Tabla N°15.- "Niveles de Servicio antes de la Conservación Periódica"	55
Tabla N°16.- "Niveles de servicio Conservación Periódica"	55
Tabla N°17.- "Niveles de Servicio después de la Conservación Periódica"	55
Tabla N°18.- "Resumen de Calicatas y ensayos de laboratorio Tramo I (Km. 710+00 – 790+00)"	65
Tabla N°19.- "Número de Ejes Equivalentes Atico – La Repartición"	66
Tabla N°20.- "Resumen de parámetros por sector homogéneo del Tramo I: Atico – Acc. Microondas – La Repartición"	68
Tabla N°21.- "Análisis de Precio Unitario Previsto (Reciclado de Frío, Año 2010)"	82
Tabla N°22.- "Análisis de Precio Unitario Real (Reciclado de Frío, Año 2012)"	83
Tabla N°23.- "Rendimientos y Recursos Diarios (Previsto – Real) para el Reciclado en Frío"	86

LISTA DE FIGURAS

Figura N°01.- "Ejecución de calicatas y toma de muestras"	10
Figura N°02.- "Carta de Plasticidad de Casagrande"	17
Figura N°03.- "Ejemplo de gráfico de curva de compactación"	18
Figura N°04.- "Ensayo de Resistencia a la compresión no confinada en probetas Tipo Marshall (UCS)"	19
Figura N°05.- "Ensayo de resistencia a la Tracción Indirecta (ITS)"	19
Figura N°06.- "Categorías Ensayos ITS y UCS, para determinar el óptimo contenido de cemento"	20
Figura N°07.- "Determinación del plazo de trabajabilidad (norma UNE-EN 13286- 45)"	22
Figura N°08.- "Cálculo del Índice de deterioro Superficial (I_s)"	24
Figura N°09.- "Esquema de medición de ahuellamiento"	26
Figura N°10.- "Deflectómetro de Impacto (FWD)"	27
Figura N°11.- "Correlación entre Deflexión FWD (50KN) y Benkelman (8.2T)"	29
Figura N°12.- "Nomograma para resolver la Ecuación AASHTO – 93"	31
Figura N°13.- "Rotor de recicladora"	32
Figura N°14.- "Recicladora con tolva de mezcla en suspensión"	33
Figura N°15.- "Esparcidora de cemento"	33
Figura N°16.- "Sistema para la ejecución de juntas en el material fresco"	34
Figura N°17.- "El proceso del reciclado de pavimentos"	35
Figura N°18.- "Extendido manual de cemento"	37
Figura N°19.- "Reemplazo de picas"	37
Figura N°20.- "Máquina CRAFT (Equipo para la ejecución de Juntas)"	38

Figura N°21.- "Compactación de la base reciclada con cemento"	39
Figura N°22.- "Perfilado de material reciclado"	40
Figura N°23.- "Riego de curado y protección con arena"	40
Figura N°24.- "Colocación de mezcla asfáltica en caliente, sobre base reciclada"	41
Figura N°25.- "Ejemplo de Informe Semanal de Producción - Gráfico Proceso"	49
Figura N°26.- "Curvas de Valor Ganado, Valor Planeado y Costos Reales"	50
Figura N°27.- "Tramos Viales del Servicio de Conservación Vial Panamericana Sur"	53
Figura N°28.- "Medición del Índice de deterioro Superficial (Is) del Tramo I (Km. 709+000-754+020)"	58
Figura N°29.- "Medición del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) por carril del Tramo I (Km. 709+020-754+020)"	60
Figura N°30.- "Resalto presente en el Tramo I Atico – La Repartición"	60
Figura N°31.- "Deflexión Central del Tramo I (Km. 709+000-836+700)"	62
Figura N°32.- "Módulo Resiliente de la subrasante Tramo I (Km. 709+000 – 836+700)"	63
Figura N°33.- "Distribución de Espesores Tramo I (Km. 709+000 – 759+000)"	66
Figura N°34.- "Distribución de la Deflexión Benkelman del Tramo I"	67
Figura N°35.- "Granulometría por Tamizado Muestra Km. 740+100 – 740+600"	73
Figura N°36.- "Diagrama de flujo de Reciclado de pavimentos en frío con cemento"	77
Figura N°37.- "Grado de Compactación (%) - Tramo I (Km. 721+000 – 740+600)"	78

Figura N°38.- "Resistencia a la Compresión No confinada (Ensayo a 7 días) - Tramo I (Km. 721+000 – 740+600)"	79
Figura N°39.- "Resistencia a la Tracción Indirecta Seca (ensayo a 7 Días) – Tramo I (Km. 721+00 – 740+600)"	80
Figura N°40.- "Resistencia a la Tracción Indirecta Húmeda (ensayado a 7 Días) – Tramo I (Km. 721+000 – 740+600)"	80
Figura N°41.- "Deflectograma en Base reciclada – Ambos Carriles Tramo I (Km. 721+000 – 740+600)"	81
Figura N°42.- "Registro de Costos Unitarios - Reciclado en frío con Cemento"	87
Figura N°43.- "Registros de avances semanales - Reciclado en frío con cemento"	88
Figura N°44.- "Análisis de Valor Ganado – Reciclado en frío con cemento"	89
Figura N°45.- "Indicadores de tiempo y costo – Reciclado en frío con cemento"	90
Figura N°46.- "Indicadores de variabilidad de Costo y Tiempo – Reciclado en frío con cemento"	90

INTRODUCCIÓN

El reciclado de pavimentos en frío con cemento es una técnica que consiste en reutilizar los materiales de la carpeta existente (deteriorada), para la construcción de una nueva base mediante el fresado de los mismos a una cierta profundidad con la adición de cemento y agua (para la hidratación, mezclado y compactación) bajo una dosificación obtenida mediante ensayos previos. La mezcla homogénea de estos materiales se extiende, compacta y cura adecuadamente, constituyendo así una base de mayor resistencia estructural.

Esta técnica propone una alternativa de solución técnica para la rehabilitación del pavimento existente deteriorado, razón por la cual se desarrollarán previamente aspectos teóricos sobre los criterios de diseño, proceso constructivo, control de calidad, control de costos y estudios de productividad de la técnica mencionada. Para luego ponerlos en práctica a lo largo de 19.5 Km del tramo Atico – Acc. Microondas – La Repartición del proyecto “Servicio de Conservación Vial por Niveles de Servicio de la Carretera Asfaltada: Panamericana Sur, Tramos: Atico – Dv. Quilca – La Repartición, Dv. Matarani – Pte. Montalvo y Dv. Ilo – Pte. Camiara”.

CAPITULO I: GENERALIDADES

1.1 HISTORIA DEL ARTE DEL RECICLADO DE PAVIMENTOS CON CEMENTO

Debido al gran desarrollo y avance con respecto a las bases tratadas y en la búsqueda de reducir tanto los costos y el uso de nuevos materiales, el pavimento existente comenzó a ser utilizado y mejorado por medio de la molienda y la adición de un ligante.

Un primer precedente del empleo de técnicas de reciclado se dio después de la Segunda Guerra Mundial, cuando en el Reino Unido un procedimiento llamado "Retread Process" o proceso de reencauchado, era utilizado para reparar carreteras secundarias afectadas por el paso de la guerra.

El proceso consistía en escarificar la base, añadir en caso necesario una pequeña cantidad de agregado y mezclar in situ el material escarificado con el cemento con ayuda de una motoniveladora o una grada de discos. A continuación se regaba con una emulsión bituminosa de bajo contenido ligante, e inmediatamente se procedía al mezclado con la grada de discos. El primer día sólo se compactaba muy ligeramente el material mezclado, puesto que tenía mucha agua, y al día siguiente se terminaba la compactación. Se trataba de un procedimiento muy simple pero que, ejecutado correctamente, proporcionaba unos resultados aceptables.

Desde mediados de la década de 1980, el reciclado in-situ con adición de cemento para el mejoramiento de carreteras se desarrolló notablemente, pues a la fecha ya se contaba con información de las características mecánicas de los materiales tratados con cemento, el comportamiento de pavimentos semirígidos, el empleo de equipos de mayor potencia, rendimiento, profundidad de trabajo (que proporcionan una mezcla homogénea de los materiales), la reducción de costos de producción y la creciente conciencia ambiental que contrarresta el uso y explotación de las canteras de agregados.

En la actualidad el reciclado con cemento es una técnica muy utilizada por un gran número de países entre los cuales tenemos a Australia, Estados Unidos, Francia, Sudáfrica y España que son algunos de los líderes de la misma.

También como consecuencia de este desarrollo, varias Administraciones han publicado o tienen muy avanzada la elaboración de normativas y guías técnicas para el proyecto o ejecución de reciclados con cemento, por ejemplo España, Alemania, Francia, Inglaterra, Bélgica, Australia y Japón.

1.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL RECICLADO DE PAVIMENTOS CON CEMENTO

1.2.1 Ventajas

Algunas de las ventajas más importantes desde el punto de vista técnico – económico del empleo de esta técnica son:

- Permite rehabilitar un pavimento deteriorado, dañado e inadaptado al tráfico que debe soportar, logrando una base tratada homogénea, estable y de mayor resistencia estructural.
- El incremento sustancial de la capacidad de carga de la base tratada con cemento, hace que se disminuya en gran medida los esfuerzos transmitidos hacia las capas inferiores y las deflexiones que se producen en las capas superiores bituminosas.
- Aprovechamiento de los materiales envejecidos, contaminados o de características inadecuadas del pavimento existente, esta reutilización permite suponer un importante ahorro, al disminuir al mínimo el volumen necesario de nuevos agregados a utilizar en obra y el costo de su extracción, trituración y clasificación.
- Reducción del tiempo de construcción y la afección al tráfico.
- Reducción del costo de transporte de materiales.

1.2.1 Desventajas

- Si la estructura del pavimento existente resulta heterogénea en los tramos a utilizar la técnica, la nueva mezcla puede resultar de mayor heterogeneidad.
- La ejecución de las juntas podría provocar ocasionalmente la aparición de grietas longitudinales si no se adoptan las precauciones pertinentes para garantizar una adecuada unión entre los materiales de juntas adyacentes.

1.3 ESTUDIOS PRELIMINARES

1.3.1 Viabilidad del reciclado de pavimentos con cemento

Si el deterioro proviene principalmente de una mala calidad propia del pavimento existente (espesores insuficientes, capas granulares contaminadas con arcillas, capas bituminosas desunidas, etc.) o por problemas relacionados a la subrasante. En el primer caso el reciclado de pavimentos en frío con cemento es generalmente una opción viable.

La técnica utiliza el pavimento existente como fuente de agregados, para verificar la posibilidad de reciclaje de los mismos es necesario saber con antelación las características de los materiales existentes en el pavimento así como el espesor de las capas.

La mayoría de los materiales pueden ser reciclados excepto aquellos materiales con una granulometría discontinua. Materiales de granulometría discontinua requerirán un corrector de granulometría (agregado fino) o el ajuste de la recicladora tanto en la velocidad del rotor y/o posición de las porta picas. Por otro lado materiales con un tamaño de partículas mayores a 80mm o 100mm, pueden requerir equipos especiales para la desintegración del pavimento.

La presencia de sustancias como materia orgánica, sulfuros, sulfatos (yeso), cloruros pueden ser perjudiciales para el fraguado de la base tratada con cemento.

La viabilidad del reciclado debe establecerse en base al conocimiento de la estructura del pavimento existente y de las características presentes en él, para ello es necesario determinar las características de los materiales del pavimento y recolectar información sobre el tráfico y el clima.

1.3.2 Evaluación de la vía existente

Una inspección del pavimento evaluará la condición estructural, así como la naturaleza y el espesor de sus capas. Además se incluirá una inspección visual del deterioro del pavimento, registrándose por ejemplo la gravedad y extensión, detalles de las secciones que muestran los mismos tipos de niveles de deterioro, etc.

El alcance de la evaluación estructural del pavimento buscará determinar las condiciones del pavimento existente (medición de fisuras y baches, ahuellamiento, textura superficial, rugosidad y deflexiones).

Dicha evaluación y/o inspección permitirán ahorrar tiempos en la cantidad de calicatas y muestreos a realizar a lo largo del tramo en estudio, pues las secciones que se definan con propiedades similares servirán de base para formular un programa de toma de muestras y excavación de calicatas (Ver Figura N°01).

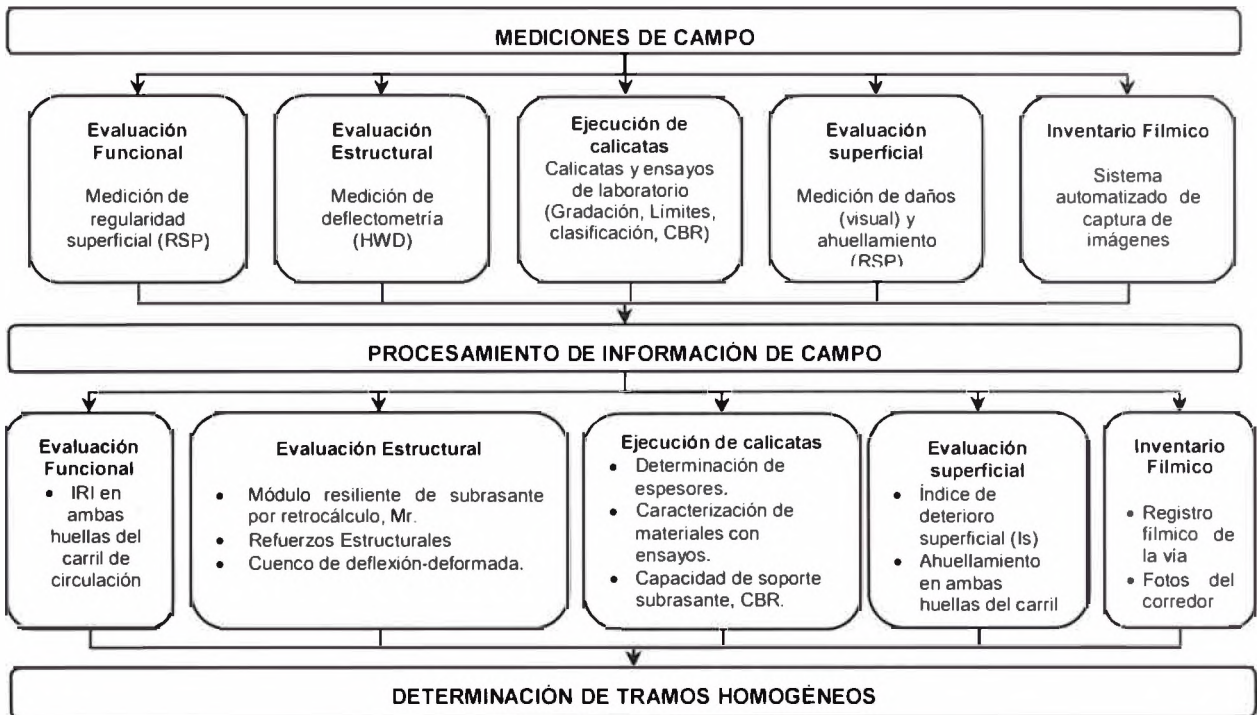


Figura N°01.- Ejecución de calicatas y toma de muestras

De las calicatas y muestreos realizados en los diferentes puntos, podemos obtener la composición de las capas de pavimento, espesores y características de los materiales en la calzada como en la berma, con los cuales podemos sectorizar el tramo de estudio en secciones relativamente homogéneas con el fin de lograr las mayores longitudes para aplicar la técnica.

La toma de muestras de cada sección debería ser suficiente para obtener datos representativos, sin embargo se debe prestar atención a aquellos pavimentos viejos o que hayan contado con alguna reparación, pues pueden contener materiales distintos y/o de mala calidad.

La evaluación de la vía existente viene dado por el siguiente esquema de mediciones y toma de datos en campo:



1.3.3 Características de los Materiales del Pavimento

Las muestras tomadas deben ser analizadas en el laboratorio para identificar:

- La composición y contenido de humedad de la sub base.
- La composición y contenido de humedad de los materiales en las diferentes capas del pavimento.
- La presencia de agentes que puedan alterar y/o impedir el fraguado del cemento.

Las muestras deben ser preparadas para simular fielmente la gradación del material obtenido durante el proceso de molienda real (preferible tomar muestras del material pulverizado por la máquina recicladora), para luego obtener la curva granulometría de la mezcla, esto nos permitirá juzgar la necesidad o no de un corrector granulométrico. Por otra parte condiciona la elección de los equipos del reciclado.

El estudio de finos, nos permite obtener la cantidad de finos presentes en la mezcla, así como el Índice de Plasticidad (IP).

El contenido de humedad viene definido por la humedad natural de los materiales a ser reciclados (w_{nat}) tomando en cuenta las condiciones climáticas, se tomará y ensayará las muestras para determinar el óptimo contenido de

humedad (w_{opt}) y la máxima densidad (γ_{dmax}) una vez incorporado el cemento, mediante el ensayo de Proctor Modificado.

Además se realizarán ensayos a las muestras para determinar la presencia de sulfatos, sulfuros, cloruros o material orgánico que afecte al cemento utilizado para estabilizar la base reciclada.

1.3.4 Drenaje y Clima

Es necesario investigar y reparar las posibles fallas en drenajes superficiales y subterráneos encontrados a lo largo del tramo en estudio antes de ejecutar los trabajos de reciclado.

Con respecto a las condiciones climáticas el reciclado con cemento es menos sensible a la intemperie, pero se recomienda que los trabajos se desarrollen cuando la temperatura ambiente, sea superior a 6°C y cuando no existan precipitaciones pluviales.

1.3.5 Tráfico de Diseño

Dado que el reciclado se lleva en carreteras que ya están en servicio, la estimación del tráfico viene respaldada por estudios de tráfico proporcionando información del índice medio diario anual (IMDA) para el tramo en estudio.

1.3.6 Planes de ampliación y bermas

La inspección de la vía debe incluir las bermas existentes, por lo tanto los pozos o calicatas en la calzada deben continuar a través de las bermas para medir el espesor de las diferentes capas y tomar muestras para pruebas en el laboratorio. Por lo general el reciclaje también se utiliza para ensanchar la calzada y aumentar la capacidad de carga de las bermas.

El objetivo último debe ser la obtención de un pavimento lo más homogéneo posible en la dirección transversal después de la ampliación y reciclaje.

1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Al no contar con información suficiente y detallada de soluciones técnicas innovadoras durante la elaboración del "Plan de Conservación Vial" y dar cumplimiento al contrato por niveles de servicio, es fundamental conocer y contar

con otras soluciones, para así obtener beneficios en costo, tiempo y calidad de los productos.

Además hoy en día la conciencia ambiental se ha convertido en un factor imprescindible en la toma de decisiones con respecto a que soluciones técnicas serán incluidas en el "Plan de Conservación Vial" en los contratos de Conservación Vial, por tal motivo es necesario conocer soluciones que no tengan un carácter destructivo, sino todo lo contrario, compatible con el Medio Ambiente.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo Principal

Proponer como alternativa de solución el reciclado de pavimentos en frío con cemento dentro del "Plan de Conservación Vial" en Contratos por Niveles de Servicios.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Definir procedimientos de diseño, proceso constructivo y aseguramiento de la calidad antes, durante y después de la ejecución de los trabajos.
- Definir procedimientos para el control de costos y productividad, durante la ejecución de los trabajos.

1.6 METODOLOGÍA DE TRABAJO

- Recopilación de información básica: normas, manuales, publicaciones y en contratos por niveles de servicio del "Proyecto Perú" donde se encuentre información relacionada al reciclado de pavimentos en frío con cemento.
- Análisis e interpretación de resultados: se revisará la información obtenida y bajo los lineamientos de contratos de conservación por niveles de servicios, en ella se definirán los pasos de ejecución (proceso constructivo) y aseguramiento de la calidad, así como el análisis de rendimientos precios unitarios de los trabajos de reciclado de pavimentos en frío con cemento.
- Propuesta: Como consecuencia de la etapa de análisis, se obtendrán procedimientos de diseño, ejecución y aseguramiento de la calidad, análisis

de precios unitarios reales considerando las mejoras en la productividad de los trabajos.

- Conclusiones y recomendaciones: luego del análisis se obtendrá las conclusiones y recomendaciones del informe.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES RECICLADOS

2.1.1 Granulometría

El objetivo del análisis granulométrico es definir si una clasificación es aceptable o no. De no ser aceptable se buscará tomar medidas correctivas como por ejemplo la adición de material seleccionado. Además durante el proceso de reciclado se obtendrán clasificaciones distintas del material, entre partículas grandes que pueden ser trituradas dependiendo del tipo de maquina recicladora a emplear o hasta trozos de carpeta asfáltica existente que pueden hacer variar en gran medida la clasificación.

Otro factor que influye en la clasificación considerablemente, es la profundidad de reciclaje, pues cuanto mayor es la profundidad mayor será la proporción de capas granulares sin asfalto, esto a diferencia de las capas superiores que normalmente son carpetas asfálticas de diferentes clasificaciones.

Con el fin de lograr una base tratada homogénea, estable y de mayor resistencia estructural, podemos considerar que la granulometría esperada de las muestras deberá satisfacer requerimientos para una base tratada con cemento y la curva de Talbot:

$$y = 100 \times (d/D)^{0.4}$$

Donde:

y: pasante a través del tamiz en %

d: malla del tamiz en mm.

D: tamaño máximo del agregado en mm.

Suele limitarse el tamaño máximo (80 mm) para evitar segregaciones y dificultades de compactación y nivelación, así como para evitar las complicaciones que para la maquinaria supone la presencia de piedras de mayor tamaño. También se limita el porcentaje de finos (partículas inferiores a 0.063 mm) para posibilitar la mezcla, y el caso del cemento, evitar la necesidad de aportar un alto contenido de conglomerante (Manual de Estabilización de Suelos con Cemento o Cal, España, 2008, p.15).

La granulometría del material reciclado, debe ajustarse al de un material utilizado para realizar una estabilización suelocemento, según el huso granulométrico

SC40 definido en la Tabla N°01 (Dirección General de Carreteras, Ministerio de Fomento. Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares PG-3, España, 2004, Cap. 513).

Tabla N°01.- Husos granulométricos del material granular del suelocemento

Tipo de Suelocemento	Tamizado ponderal acumulado (% en masa)									
	Abertura de los tamices UNE-EN 933 – 2 (mm)									
	50	40	25	20	12.5	8	4	2	0.5	0.063
SC40	100	80- 100	67- 100	62- 100	53- 100	45- 89	30- 65	17- 52	5- 37	2-20

Existen husos granulométricos recomendados por fabricantes de máquinas recicladoras, los cuales tienen una amplia experiencia en la técnica del reciclado de pavimentos in-situ. Este es el caso de la marca Wirtgen, la cual ha elaborado un manual denominado "Wirtgen Cold Recycling Technology" y en la que detalla los procedimientos y recomendaciones de los trabajos de reciclado. Para los trabajos de reciclado de pavimentos en frío con adición de cemento, propone husos granulométricos recomendados de acuerdo a la Tabla N°02.

Tabla N°02.- Husos Granulométricos Recomendados (100% RAP / Material Granular)

Abertura Tamiz (mm)	Granulometría recomendada	
	Porcentaje Pasante (%)	
	Grueso	Fino
50	100	100
37.5	85	100
26.5	72	100
19	60	100
13.2	50	100
9.5	42	90
6.7	35	80
4.75	30	72
2.36	21	56
1.18	14	44
0.6	9	35
0.425	7	31
0.3	5	27
0.15	3	21
0.075	2	18

2.1.2 Plasticidad

El porcentaje de finos deberá presentar un Límite Líquido inferior a 40 y un Índice Plástico menor de 18%, determinados según normas de ensayo ASTM D4318-05 "Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit and Plasticity Index of soils" (Ver Figura N°02)

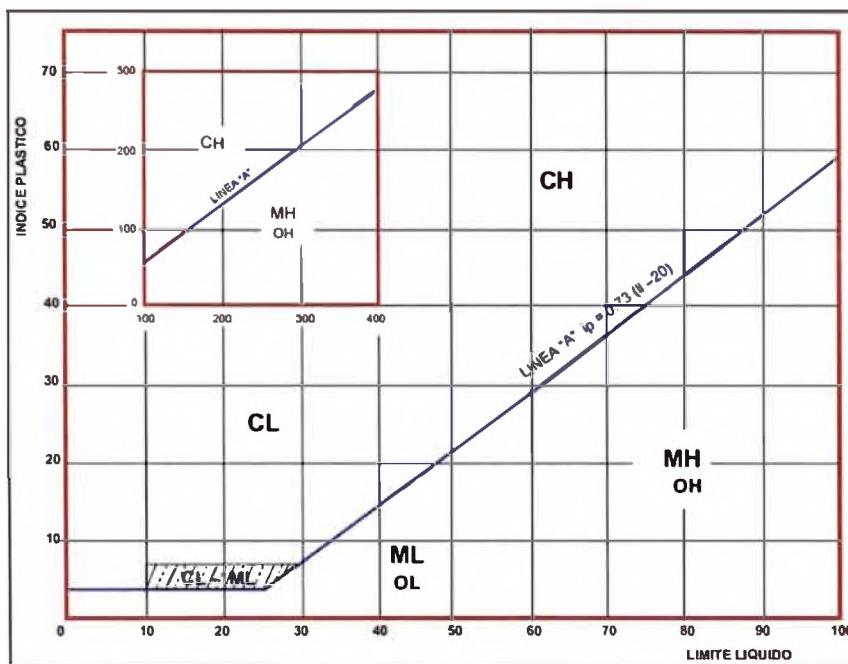


Figura N°02.- Carta de Plasticidad de Casagrande

2.1.3 Contenido de Agua

El contenido de agua en la base reciclada tiene como objetivo hidratar al cemento y facilitar la compactación de la mezcla. Siendo necesario para el primer objetivo sólo una pequeña cantidad de agua en el orden del 2%.

El óptimo contenido de agua para la compactación de la mezcla cuya dosificación de cemento se ha estimado para que se obtenga con la misma el índice CBR o la resistencia especificada (como porcentaje de cemento de partida, variará en general entre el 2 y 5% en peso de materiales secos, ya que con dicha dosificación se alcanzará la resistencia especificada), se determinará mediante ensayos de compactación Proctor Modificado (ASTM D-1557, J.E Bowles).

Normalmente, la resistencia máxima de una base reciclada con cemento se obtiene con una humedad algo inferior a la óptima de compactación, sin embargo recomienda que la elección final del contenido de agua se base no sólo

de la densidad y resistencia, sino también de la trabajabilidad de la mezcla y en los resultados obtenidos en el tramo de estudio.

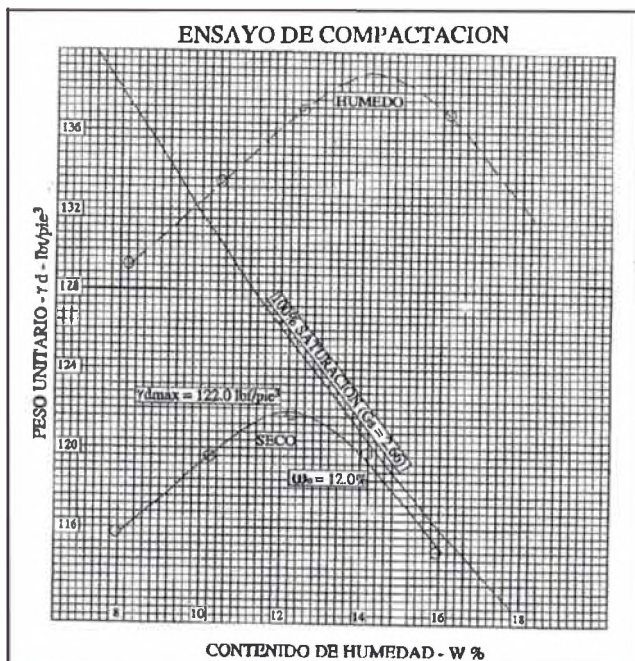


Figura N°03.- Ejemplo de gráfico de curva de compactación

2.1.4 Densidad de la Mezcla

La densidad media no debe ser inferior al 97% del valor de referencia de la prueba de compactación Proctor Modificado (ASTM D-1557, J.E Bowles).

2.1.5 Cementos y otros aditivos

Una vez determinado el óptimo contenido de humedad, la dosificación del cemento se obtiene por medios de ensayos de resistencia a la compresión no confinada (ASTM D-2166 "Standard Test Method for Unconfined Compressive Strenght of Cohesive Soil") y la resistencia a tracción Indirecta (ASTM D 4123 "Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures").

Para determinar el contenido óptimo de cemento, se tendrá que realizar por lo menos tres series de muestras. Estos se pueden hacer con el material que se obtiene después de fresar el pavimento existente y con una gama de contenidos de cemento. Las muestras deben ser compactados a la densidad mínima requerida en el sitio utilizando el óptimo contenido de humedad (según lo determinado en la prueba compactación Proctor Modificado) y ensayado a compresión a los 7 días, en UCS (Unconfined Compressive Strenght) y en ITS (Indirect Tension Strenght).

Generalmente la resistencia a compresión no confinada mínima a 7 días en suelos estabilizados con cemento es superior a 20 kg/cm^2 y no menor a 40 Kg/cm^2 , para dosificaciones de cemento entre 2 y 5% en peso de materiales secos.



Figura N°04.- Ensayo de Resistencia a la compresión no confinada en probetas Tipo Marshall (UCS)

Sin embargo es recomendable escoger un contenido de cemento que proporcione una resistencia algo superior a la mínima especificada (entre un 15 y un 20%), para tener en cuenta las caídas de resistencia que se pudieran dar en obra. Además la resistencia a la tracción indirecta mínima para probetas Marshall (Diámetro = 10 milímetros) ensayadas a 7 días para un estado seco debe ser superior a 2.04 Kg/cm^2 y para un estado húmedo superior a 1.02 Kg/cm^2 (Probeta sumergida en agua durante 24 horas, antes de ser ensayada).

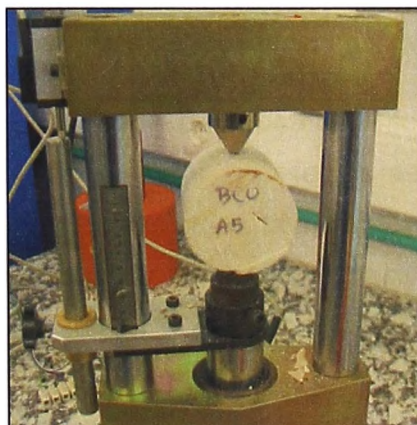


Figura N°05.- Ensayo de resistencia a la Tracción Indirecta (ITS)

Por lo tanto, para determinar el óptimo contenido de cemento, se deben verificar dos parámetros, resistencia y durabilidad de la nueva base reciclada tratada.

Con los ensayos de resistencia a compresión no confinada, aseguramos la capacidad portante de la nueva base y con los ensayos de resistencia a tracción indirecta la durabilidad de la base tratada ante agentes externos (Influencias del medio ambiente y la carbonatación).

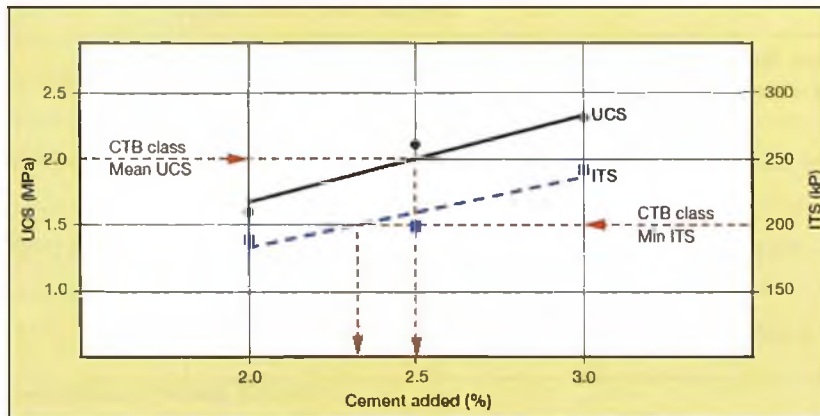


Figura N°06.- Ensayos ITS y UCS, para determinar el óptimo contenido de cemento.

a) Tipos de Cemento

El tipo de cemento más adecuado es aquel que posee las siguientes características:

- Un contenido elevado de adiciones activas
- Una resistencia media – baja
- Un desarrollo lento de resistencias a edades tempranas

La primera de ellas permite un plazo de trabajabilidad más elevado; mientras que las otras 2 dan lugar a un esquema de fisuración más favorable.

En general se pueden utilizar todos los tipos de cemento (Según Tabla N°03), por ejemplo si queremos contrarrestar los efectos de la materia orgánica se empleará cementos de alta resistencia o cementos puzolánicos mejorarán el rendimiento del material reciclado en un entorno agresivo, etc.

Tabla N°03.- Requisitos a cumplir por los cementos Portland según NTP 334.009

TIPO DE CEMENTO	REQUISITOS
TIPO I	Para uso general que no requiera propiedades especiales especificadas para cualquier otro tipo
TIPO II	Para uso general, y específicamente cuando se desea moderada resistencia a los sulfatos
TIPO II (MH)	Para uso general, y específicamente cuando se desea un moderado calor de hidratación y moderada resistencia a sulfatos
TIPO III	Para ser utilizado cuando se requiere altas resistencias iniciales
TIPO IV	Para usar cuando se desea un bajo calor de hidratación
TIPO V	Para usar cuando se desea alta resistencia a los sulfatos

Fuente: Norma Técnica Peruana 334.009

2.1.6 Plazo de trabajabilidad

Se denomina así al intervalo de tiempo máximo dentro del cual deben efectuarse las operaciones de compactación.

A medida que se desarrolla el proceso de hidratación del cemento, empiezan a formarse enlaces cristalinos entre las partículas del material reciclado, los cuales pueden ser destruidos, sin posibilidad de regenerarse, por los esfuerzos originados en la compactación. En consecuencia, esta debe culminar antes de que se haya formado un número elevado de enlaces cuya rotura perjudicaría de forma apreciable el comportamiento posterior de la nueva base tratada.

Algunos de los factores que influyen en dicho intervalo son el tiempo de fraguado del cemento, la naturaleza de los materiales reciclados, el contenido de agua o las condiciones del lugar de trabajo.

Existen diversos métodos para determinar este intervalo de tiempo, el más sencillo consiste en realizar ensayos de compactación diferida, determinando el descenso de densidad que se produce en las probetas a medida que se va dejando transcurrir el tiempo entre el mezclado del material reciclado con el cemento y su compactación. Se considera que se ha alcanzado el plazo de trabajabilidad cuando dicha disminución es igual a un 2% de la densidad inicial. Los ensayos deben realizarse a la temperatura prevista en obra durante las horas más calurosas (Ver Figura N°07).

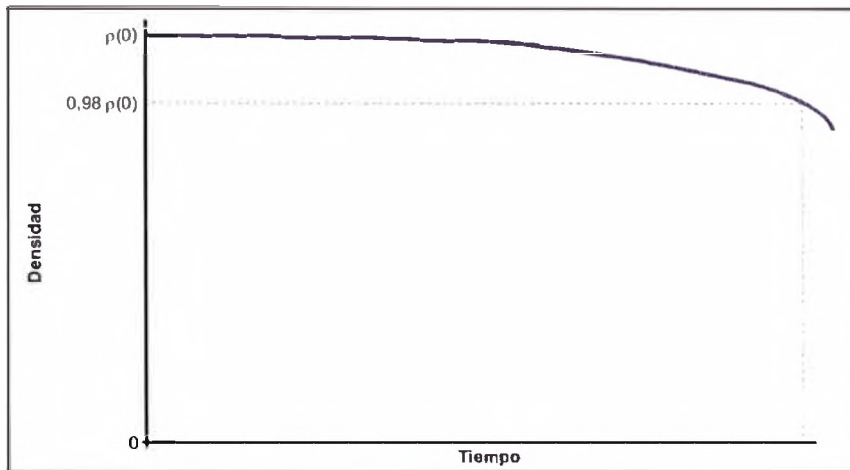


Figura N°07.- Determinación del plazo de trabajabilidad (norma UNE-EN 13286-45)

2.2 DIMENSIONAMIENTO DE LA REHABILITACIÓN DE UN PAVIMENTO EXISTENTE MEDIANTE RECICLADO CON CEMENTO.

El dimensionamiento consiste en la determinación del espesor del reciclado y del espesor total de la carpeta asfáltica, que en general será en caliente (también se emplean mezclas en frío y tratamientos superficiales bicapa). La técnica del reciclado de pavimentos con cemento es útil cuando el pavimento a rehabilitar está muy deteriorado y presenta deflexiones elevadas.

Para determinar que tan deteriorado está el pavimento de la vía se debe realizar la evaluación de la condición superficial, estructural y funcional en base a las mediciones de deflexiones, rugosidad, daños superficiales y ahuellamientos.

2.2.1 Mediciones de daños superficiales

Con el fin de determinar la condición superficial del pavimento, se debe realizar la inspección visual de fallas de la calzada y la berma. Esta información se registrará en formatos de campo, de los daños superficiales, el tipo, la gravedad y el área del daño para cada tipo de superficie encontrada. De acuerdo a la Tabla N°04. Con la información obtenida en campo de los tipos de falla, extensión y gravedad se procede a calcular el índice de falla por medio de la metodología VIZIR, la cual define la condición del pavimento mediante el Índice de Deterioro Superficial (I_s), el valor adimensional " I_s " se calcula a partir del porcentaje de longitud afectada con respecto a la longitud total del segmento vial estudiado.

Tabla N°04.- Daños de los Pavimentos Asfaltados

Clasificación de los daños	Código de daño	Daños	Gravedad
Daños estructurales	1	Piel de Cocodrilo	1:Malla grande (> 0.5 m) sin material suelto 2:Malla mediana (entre 0.3 y 0.5 m) sin o con material suelto 3:Malla pequeña (< 0.3 m) sin o con material suelto
	2	Fisuras Longitudinales	1:Fisuras finas en las huellas del tránsito (ancho < 1 mm) 2:Fisuras abiertas y/o ramificadas sin pérdida de material (ancho > 1 mm) 3:Fisuras abiertas y/o ramificadas con pérdida de material (ancho > 1 mm)
	3	Deformación por deficiencia Estructural	1:Profundidad sensible al usuario pero < 2 cm 2: Profundidad entre 2 cm y 4 cm 3: Profundidad >= 4 cm
	4	Ahuellamiento visco-elástico	1: Profundidad sensible al usuario pero < 1 cm 2: Profundidad > 1 cm
	5	Reparaciones o bacheo	1:Reparación o bacheo para daños superficiales 2:Reparación de piel de cocodrilo o de fisuras longitudinales, en buen estado 3:Reparación de piel de cocodrilo o de fisuras longitudinales, en mal estado
	7	Huecos	1:Diámetro < 0.2 m 2:Diámetro entre 0.2 y 0.5 m 3:Diámetro > 0.5 m
Daños Superficiales	6	Desprendimiento	1:Puntual sin aparición de la base granular
			2: Continuo sin aparición de la base granular o puntual con aparición de la base granular.
			3:Continuo con aparición de la base granular
	7	Huecos	1:Diámetro < 0.2 m
2:Diámetro entre 0.2 y 0.5 m			
3:Diámetro > 0.5 m			
8	Fisuras Transversales	1:Finas (ancho < 1 mm) 2:Fisuras abiertas y/o ramificadas sin pérdida de material (ancho > 1 mm) 3:Fisuras abiertas y/o ramificadas con pérdida de material (ancho > 1 mm)	
9	Exudación	1:Puntual 2:Continua 3:Continua con superficie viscosa	

Además dentro de la metodología VIZIR se deben identificar los siguientes aspectos (Ver Figura N°08):

- Tipo de deterioro: el método clasifica los deterioros de los pavimentos asfálticos en dos grandes categorías: a) Degradaciones debidas a

insuficiencia de la capacidad estructural de la calzada y b) degradaciones cuyo origen se encuentra en deficiencias constructivas, condiciones locales particulares que el tránsito ayuda a poner en evidencia. Éstas últimas no son tenidas en cuenta en la metodología VIZIR para el cálculo del Índice de Deterioro Superficial (I_s). Sin embargo se tienen en cuenta para el análisis general de cada tramo.

- Gravedad: representa la criticidad del deterioro en términos de su progresión.
- Extensión: se refiere al área o longitud del tramo evaluado, que es afectado por un determinado tipo de deterioro.

Con base en las fallas registradas se procede a determinar el Índice de Deterioro Superficial (I_s) para tramos de 200 m. En primer lugar se calcula el Índice de Fisuración (I_f) el cual depende de la gravedad y la extensión de las fisuras y grietas de tipo estructural, y el Índice de Deformación (I_d) el cual depende de la gravedad y extensión de las deformaciones de origen estructural. La combinación de los índices (I_f) e I_d entrega un primer índice de calificación de la calzada, el cual debe ser corregido en función de la extensión y calidad de los trabajos de bacheo realizados en el pavimento evaluado. Efectuada la corrección, cuando corresponda, se obtiene el “Índice de Deterioro Superficial” (I_s), el cual califica el segmento vial en la longitud escogida para el cálculo.

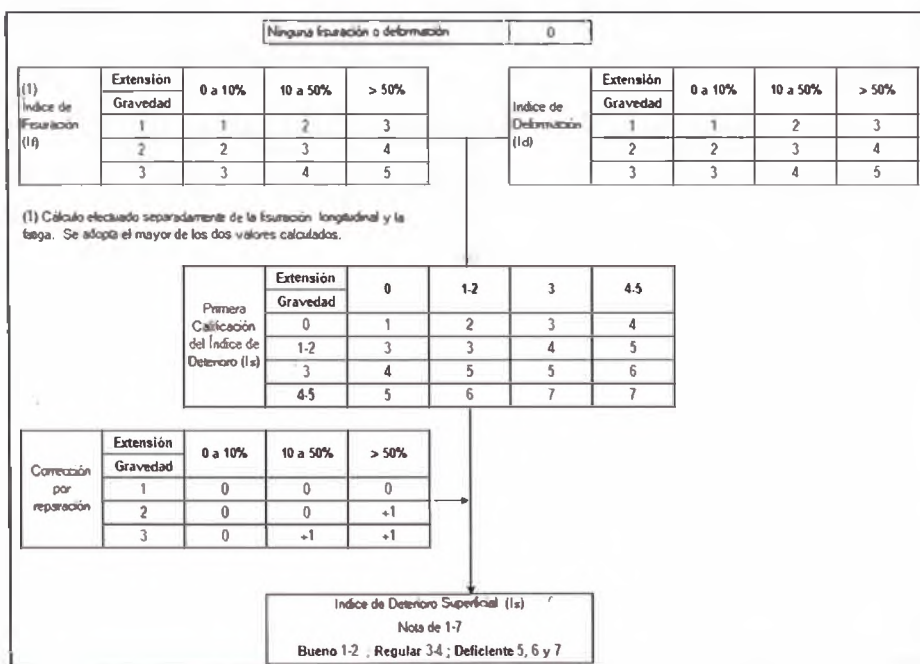


Figura N°08.- Cálculo del Índice de deterioro Superficial (I_s)

2.2.2 Mediciones de rugosidad e Índice de Serviciabilidad Presente (PSI)

La rugosidad está definida como las irregularidades en la superficie del pavimento que afectan adversamente a la calidad de rodado, seguridad y costos de operación vehicular. Para ello evaluamos el Índice de Rugosidad Internacional (IRI), que es un indicador de la irregularidad superficial del pavimento, que permite determinar la condición funcional de una vía. Para realizar la medición de rugosidad del pavimento, se emplea el perfilógrafo láser (RSP-L5, Road Surface Profiler), el cual permite relevar la información en forma continua por cada carril de circulación del tramo seleccionado con un nivel máximo de precisión, además de contar con un alto rendimiento al recorrer la vía a una velocidad superior a 30Km/h. Las mediciones que se pueden realizar deben ser efectuadas teniendo en cuenta lo establecido en la norma ASTM E 950-98 (Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer Established Inertial Profiling).

La información del IRI tomada por el perfilógrafo láser se debe realizar de manera continua y registrarse cada 20 metros. Para el análisis de la información de rugosidad en gabinete, se tomarán los valores promedio de la huella izquierda y huella derecha de cada carril de circulación.

Estos valores de rugosidad nos permitirán obtener, de acuerdo a una expresión matemática aproximada, el valor del Índice de Serviciabilidad Presente del pavimento (Present Serviceability Index – PSI). Esta expresión matemática relaciona la rugosidad con el PSI (la ecuación de correlación se desarrolló usando los datos obtenidos en el Ensayo Internacional sobre Rugosidad en caminos, realizado en Brasil en 1932), tiene la siguiente expresión:

$$PSI = 5e^{(-\frac{IRI}{5.5})}$$

Para $IRI < 12$, IRI en m/Km.

Así mismo, se presenta la clasificación de la serviciabilidad del pavimento, según los rangos presentados de acuerdo a la Tabla N°05.

Tabla N°05.- Clasificación de la Serviciabilidad

Valor PSI	Clasificación Serviciabilidad - PSI
4 – 5	Muy Buena
3 – 4	Buena
2 – 3	Regular
1 – 2	Mala
0 – 1	Muy Mala

2.2.3 Mediciones de ahuellamientos

El ahuellamiento se mide en todos los carriles de manera simultánea con la medición de rugosidad, registrando la información cada 10 m. Posteriormente se realiza el procesamiento de la información cada 200 m. Para calcular el ahuellamiento se realiza una regresión lineal, tomando como referencia el láser del centro y el láser más externo, luego se mide por métodos algebraicos la diferencia de elevación de la línea calculada y la lectura del láser que está midiendo la huella (Ver Figura N°09).

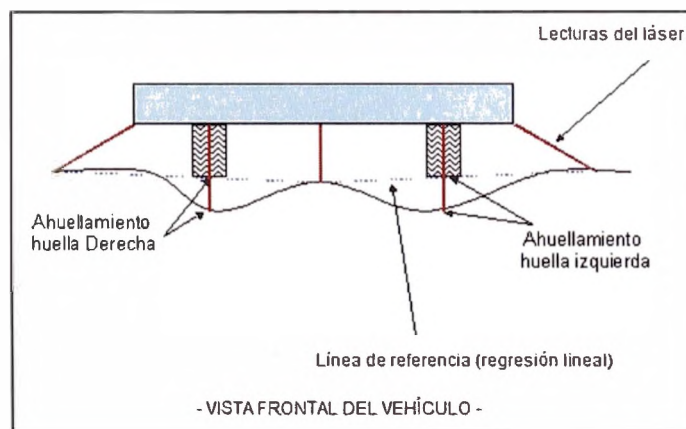


Figura N°09.- Esquema de medición de ahuellamiento

2.2.4 Mediciones de deflexiones

Para la medición de deflexiones se empleará una metodología no destructiva de evaluación estructural de pavimentos, que se fundamenta en que la forma y dimensión de la curva de deflexiones encierra una valiosa información acerca de las características estructurales del pavimento y su subrasante. Estas deflexiones reflejan una respuesta global del sistema pavimento-subrasante bajo una carga dada.

La definición de deflexión es, la medida de deformación elástica que experimenta un pavimento al paso de una carga y es función no solo del tipo y estado del pavimento, sino también del método y equipo de medida. En el ensayo no solo se desplaza el punto bajo la carga, sino también un sector alrededor de ella, causando un conjunto de deflexiones, el cual se denomina cuenco o deformada. Algunos estudios para las mediciones de deflexiones emplean el equipo denominado deflectómetro de impacto (Heavy Falling Weight Deflectometer, FWD) de la compañía Dynatest (Ver Figura N°10). El uso de este equipo permite aplicar cargas dinámicas al pavimento existente y medir a través de un grupo de sensores las deflexiones producidas, estos sensores son ubicados a distancias de 0.00, 0.30, 0.60, 0.90, 1.20, 1.50 y 1.80 m del centro del disco de carga, de diámetro 0.30 m y registradas automáticamente en un computador portátil ubicado en el vehículo que arrastra y controla el tráiler de medición. Para llevar a cabo las mediciones se debe tener en cuenta lo establecido en las normas: ASTM D 4694-96 "Standard Test Method for Deflections with a Falling-Weight-Type Impulse Load Device (2003)", ASTM D 4695-03 "Standard Guide for General Pavement Deflection Measurements" y ASTM D 5858-96 "Standard Guide for Calculating In Situ Equivalent Elastic Module of Pavement Materials Using Layered Elastic Theory (2003)".



Figura N°10. – Deflectómetro de Impacto (FWD)

De los datos obtenidos en las mediciones in-situ, se debe realizar el procesamiento de esta información en gabinete, con el fin de normalizar las deflexiones a una carga y temperatura establecidas, según lo recomendado por

la metodología AASHTO-93. Una vez que se cuenta con esta información, y teniendo en cuenta los espesores por sectores obtenidos con las calicatas, se efectúa el retrocálculo del Módulo Resiliente de la Subrasante (M_r), el Módulo Efectivo del Pavimento (E_p), y el Número Estructural Efectivo (SN_{ef}), los cuales permiten conocer el estado estructural del pavimento.

Sin embargo, luego de procesada la información se necesita determinar, aquellas deflexiones superiores a la admisible, es ahí donde se emplea la metodología CONREVIAl (desarrollada en 1964 por el Profesor Dr. C. Ruiz), él propone una metodología racional para el diseño de espesores de refuerzo, en la cual la variable gobernante es la deflexión. Según la ecuación de la metodología, el pavimento sujeto a evaluación, tiene la capacidad estructural adecuada para resistir los esfuerzos del tráfico de diseño, y según las condiciones de resistencia del suelo, siempre y cuando se cumpla que la deflexión característica (que es la deflexión representativa de cada tramo en estudio y es obtenida de un análisis estadístico que involucra el valor promedio, la desviación estándar y el grado de confianza) es menor que la deflexión admisible ($D_c < D_a$). El método es ampliamente recomendado para obras de mantenimiento con refuerzo asfáltico de vías en servicio.

$$D_a = \left(\frac{1,15}{N_{18}} \right)^{1/4}$$

Donde:

D_a = Deflexión Admisible (mm).

N_{18} = Número total de ejes equivalentes a 18kips (8.2 t, para un período de análisis de 5 años; en millones).

La metodología CONREVIAl fue establecida con base en las deflexiones obtenidas con la viga Benkelman, por lo que se hace necesario correlacionar las deflexiones obtenidas con el HWD (Deflectómetro de impacto) y así garantizar la adecuada aplicación del método. Entonces para obtener valores de deflectometría en términos de viga Benkelman se emplea la ecuación desarrollada por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) en el año 2000, la cual se expresa en el Manual del Sistema de Gestión de Carreteras mediante la siguiente el Gráfico N°11 y fórmula asociada:

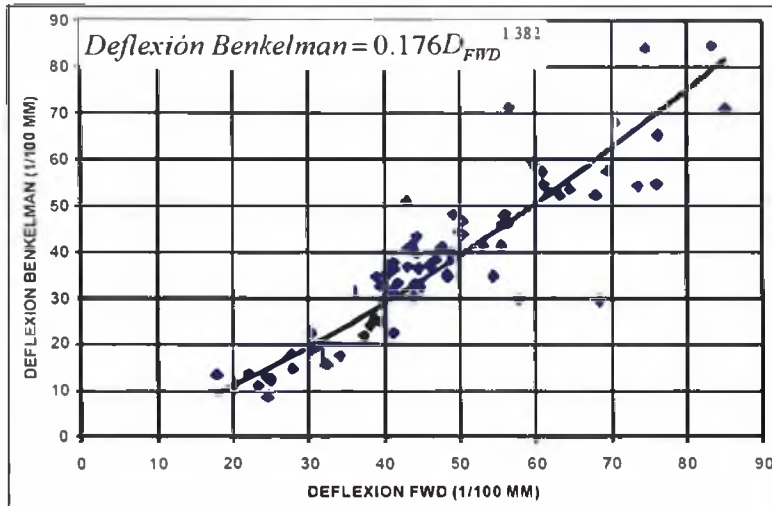


Figura N°11.- Correlación entre Deflexión FWD (50KN) y Benkelman (8.2T)

Por lo tanto, para determinar el dimensionamiento de la rehabilitación de un pavimento existente es necesario utilizar la información de las evaluaciones de la condición superficial, estructural y funcional con base en las mediciones de deflexiones, rugosidad, daños y ahuellamientos. Esto nos permitirá identificar tramos y/o puntos críticos en la vía que necesitarán ser rehabilitados (tramificación de la vía). Para ello se propone, analizar en conjunto las variables que afectan al estado de la vía existente, proceso denominado como Categorización de Variables, valorando así a través de ellas las condiciones de la vía existente en Bueno, Regular y Malo, de acuerdo a las Tablas N°06, 07, 08, 09 y 10.

Tabla N°06.- Categorías del Índice de Deterioro Superficial, Is

Is	Categoría
1 y 2	Bueno
3, 4 y 5	Regular
6 y 7	Malo

Tabla N°07.- Categorías del Índice de Rugosidad Internacional, IRI

IRI (m/km)	Categoría
< 3.5	Bueno
3.5 – 5.0	Regular
> 5.0	Malo

Tabla N°08.- Categorías del porcentaje de Fallas Estructurales

Fallas estructurales (%)	Categoría
< 5 %	Bueno
5 % – 15 %	Regular
> 15 %	Malo

Tabla N°09.- Categorías del porcentaje de Fallas Térmicas

Fallas Térmicas (%)	Categoría
<=30 %	Bueno
30 % – 70 %	Regular
> 70 %	Malo

Tabla N°10.- Categorías del Faltante Estructural o H de Refuerzo

Faltante Estructural (cm)	Categoría
0-3.5	Bajo
3.5-5	Medio
>5	Alto

Tomando en cuenta y luego del análisis de variables, podemos proponer el dimensionamiento de un pavimento reciclado con cemento, el cuál debe ser el mismo que el de uno nuevo, el enfoque a seguir puede ser:

- Realizar un cálculo teórico mediante un modelo multicapa, realizando previamente una estimación del módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson, tanto para la capa reciclada (incluye carpeta) y de las capas del pavimento existente que se mantengan sin reciclar.
- Un enfoque diferente es el de asignar un coeficiente estructural de la capa de reciclado y a continuación aplicar una metodología de diseño como la AASTHO - 93 (Ver Figura N°12). Por ejemplo, en Japón se recomienda un coeficiente de 0.5 para un material con una resistencia a compresión a 7 días a 25 Kg/cm². Dicho valor es algo inferior al de 0.55 que se adopta para una base tratada con cemento, a la que por otra parte se exige una resistencia ligeramente superior (30 Kg/cm² a 7 días).

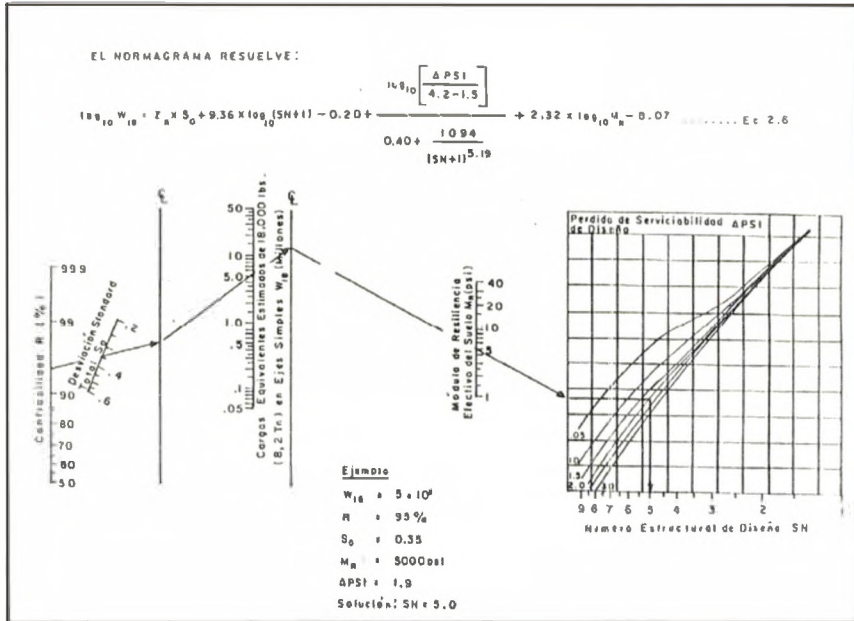


Figura N°12.- Nomograma para resolver la Ecuación AASHTO – 93

- En principio y en base a experiencias pasadas para este tipo de trabajos no convencionales, se recomienda una profundidad de tratamiento de 20 – 30cm para tráfico pesado, el mínimo se adopta para un tráfico ligero. Elecciones debajo de estos valores pueden dar lugar a un rápido deterioro de la base tratada. Los espesores y tipos de carpeta asfáltica a emplear en las distintas capas por encima de la reciclada se determinarán según la normativa vigente. Si las características del pavimento existente no permiten efectuar un reciclado del mismo en el espesor requerido se puede aportar materiales granulares hasta completar dicho espesor o incrementar el espesor del pavimento. Por lo tanto no es recomendable ir a reciclados de pavimento con cemento, en aquellos que no se pueda garantizar un espesor real de material tratado igual o superior a 15 cm en cualquier punto.

CAPITULO III: PROCESO CONSTRUCTIVO Y ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD

3.1 EQUIPOS PARA LA EJECUCIÓN DEL RECICLADO DE PAVIMENTOS CON CEMENTO

a) Recicladoras

Generalmente los equipos para el reciclado de pavimentos existentes, cuentan con un componente fundamental denominado rotor (Ver Figura N°13), provisto de picas, que realiza el fresado del pavimento existente y efectúa la mezcla de los elementos con el cemento y el agua.



Figura N°13.- Rotor de recicladora

Dicho rotor se encuentra alojado dentro de una carcasa protectora, situada normalmente en la parte central del equipo, dicha carcasa va provista de un sistema doble de aberturas para la entrada de líquidos (por ejemplo agua y emulsión, dependiendo si se realiza un reciclado mixto cemento – emulsión). Las picas se disponen de forma de espiga para facilitar el mezclado. La gama de equipos de este tipo es muy amplia con potencias que van desde los 300 HP hasta los 1200 HP, anchos de trabajo que oscilan entre los 2 – 3.8m y hasta profundidades de reciclado próximas en algunos casos a los 40cm.

Algunas recicladoras más sofisticadas cuentan con un tanque de cemento, de agua y un tanque mezclador (cemento y agua), que suministra directamente la lechada de cemento de acuerdo con la dosificación prevista, de acuerdo al peso de material reciclado y a la velocidad del tren de reciclado, profundidad y anchura de trabajo, ver Figura N°14.



Figura N°14.- Recicladora con tolva de mezcla en suspensión.

b) Esparcidoras

Para la mejora de los rendimientos y tiempos de ejecución de los trabajos de reciclado, se suele emplear también maquinaria para el extendido del cemento, ya que dichos equipos distribuyen el material en forma de polvo a lo largo de la vía y con la dosificación requerida ya sea en peso o en volumen. La capacidad de almacenamiento de cementos de estas máquinas es de 8 a 30 m³, con anchuras de esparcido entre 2.2 – 2.9 m (ajustándose también a anchuras menores).



Figura N°15.- Esparcidora de cemento

c) Equipos para la ejecución de juntas

La ejecución de cortes en el material fresco a distancias cortas (2 – 3.5 m), es el sistema más efectivo para reducir al mínimo las aparición de grietas de las capas bituminosas superiores. Esto es aplicable a pavimento semi-rígidos para vías de alto tráfico.



Figura N°16.- Sistema para la ejecución de juntas en el material fresco

d) Rodillos

La compactación es una fase esencial de la técnica del reciclado de pavimentos con cemento, pues con ella logramos alcanzar la máxima densidad prevista.

Esto se puede llevar a cabo con el empleo de rodillos lisos vibratorios o neumáticos. Un parámetro fundamental de la eficiencia de compactación es la carga lineal estática por centímetro de la vibración del tambor, que está estrechamente relacionado con el espesor del reciclado. Ver Tabla N°11.

Tabla N°11.- Clasificación de rodillos vibratorios lisos

Tipo de rodillo vibratorio	Masa estática por cm. de tambor vibratorio (N)	Espesor adecuado de capa
Ligero	100 – 200	10 – 15 cm
Mediano	200 – 400	15 – 25 cm
Pesado	400 >	25 – 40 cm

Debido a las dificultades de compactación de los materiales reciclado, rodillos con una masa estática menor de 400 N por centímetro de tambor vibratorio no deben ser utilizados.

Siempre se recomienda construir una sección de prueba en las zonas donde se empleará la técnica del reciclado, con el fin de definir con mayor precisión el método de compactación (tipo de rodillos) y el número mínimo de pasadas.

3.2 PROCESO CONSTRUCTIVO DE RECICLADO DE PAVIMENTOS CON CEMENTO

El reciclado de pavimentos puede resumirse en los siguientes pasos:

- Preparación de superficie del pavimento existente (limpieza de cualquier material potencialmente perjudicial, tal como arcilla o materia orgánica).
- En caso sea necesario, realizar la corrección granulométrica del material reciclado mediante la adición de agregados clasificados.
- Esparcido del cemento.
- Disgregado del pavimento existente hasta la profundidad deseada.
- Adición de agua, durante el disgregado del pavimento.
- Mezclado.
- Ejecución de juntas (prefisuramiento).
- Perfilado y compactación inicial.
- Adición de agua para alcanzar el grado de compactación requerido.
- Perfilado y compactado final.
- Curado de la base tratada con aditivos y/o agua.
- Colocación de carpeta asfáltica.

Dependiendo del tipo de equipo a utilizar, algunos de estos pasos pueden llevarse a cabo simultáneamente, y la secuencia puede diferir de la mencionada anteriormente. (Ver Figura N°17).

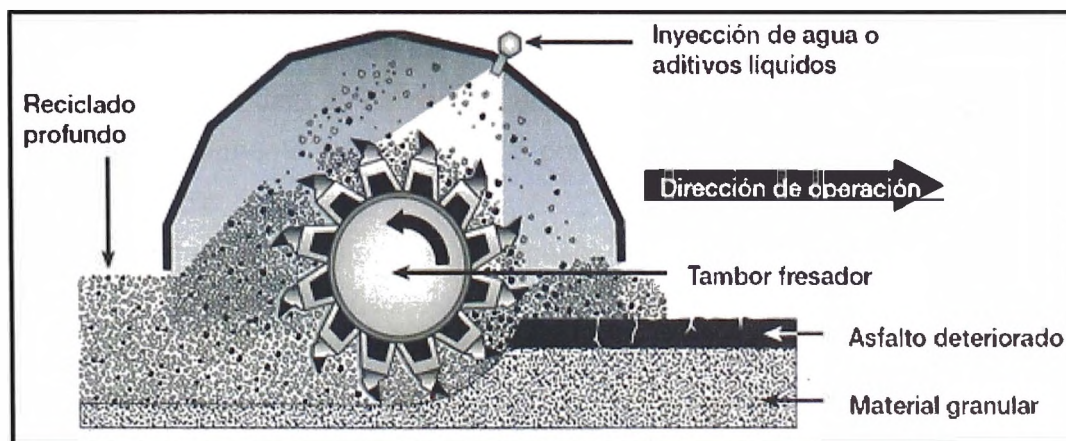


Figura N°17.- El proceso del reciclado de pavimentos

3.3 EJECUCIÓN DE TRABAJOS

Para la ejecución de los trabajos es importante definir una adecuada planificación de los mismos.

- Dependiendo del equipo disponible, del tipo de cemento disponible para ser utilizado y las condiciones climáticas, habrá que definir el número de pasadas o franjas de trabajo para la anchura completa de la vía y la longitud de las mismas con el fin de evitar las juntas frías entre las diferentes franjas, las cuales generalmente son menores a 500 m.
- Se deben identificar las actividades auxiliares que puedan detener el proceso de reciclaje, como son la carga de cemento, sustitución de picas y portapicas, carga de agua en cisternas, etc. estas pueden suponer una disminución importante de los rendimientos previstos.
- Gestionar el tráfico de la vía a reciclar, para que pueda ser cerrada completamente por un período de tiempo, para dar luego paso alternativo a las unidades de tránsito detenidas.

3.3.1 Extendido de cemento

Dependiendo del método a utilizar, el cemento se aplica antes (mediante un esparcido manual) o al mismo tiempo que se tritura el pavimento. Este último se añade el cemento en forma de lechada según la dosificación prevista (suspensión agua-cemento).

Si se ha de utilizar dosificadores en polvo, es preferible emplear equipos con el vertido regulado por la velocidad de avance. La dosificación prevista debe ser distribuida uniformemente sobre la superficie del tramo a reciclar. Para minimizar las pérdidas de cemento causadas por el viento y sobre todo evitar las molestias que ello origina en obra, es importante que haya una coordinación entre las cuadrillas de extendido de cemento y del reciclado del pavimento, de modo que la longitud de cemento que se extendió por delante de la recicladora sea lo más reducida posible.

El uso de equipos provistos de un depósito para almacenar cemento, otro de agua y un mezclador de suspensión agua – cemento, para incorporar la lechada resultante directamente dentro de la recicladora, siendo así la dosificación de cemento más precisa, sin embargo su limitación de empleo radica en casos en los que la humedad de las capas a reciclar se encuentra próxima a la óptima del ensayo Proctor Modificado.



Figura N°18.- Extendido manual de cemento

3.3.2 Pulverizado y mezclado

Con el fin de garantizar una buena uniformidad del material reciclado y una profundidad de mezcla constante, es necesario un equipo con la potencia adecuada. Por otra parte, la unidad debe avanzar a una velocidad constante lo suficientemente lenta para lograr una mezcla homogénea.

El reciclado se lleva a cabo generalmente en franjas que deben traslaparse suficientemente (unos 20 cm aproximadamente), para evitar que cualquier material se quede sin mezclar en los bordes de las mismas.

Generalmente el procedimiento más común consiste en utilizar un reciclador para pulverizar el pavimento existente y mezclar el material resultante con el cemento y el agua. Como se mencionó en el Capítulo I, del presente informe, las picas del tambor fresador experimentan un desgaste elevado y es necesario cambiarlas cada cierto tiempo, dependiendo del tipo de material a pulverizar (Ver Figura N°19).



Figura N°19.- Reemplazo de picas

3.3.3 Ejecución de juntas transversales

Los pavimentos reciclados con cemento se comportan como pavimentos semi-rígidos, por lo tanto; el desarrollo de las grietas transversales es efecto combinado de la contracción, las cargas de tráfico y los gradientes térmicos.

La experiencia acumulada muestra que la forma más eficaz de reducir al mínimo la aparición de grietas es reducir el espacio entre las juntas.

El uso de equipos para la ejecución de juntas transversales tales como el CRAFT (Creación Automática de Fisuras Transversales), extiende un riego con emulsión sobre los labios de la junta durante la apertura en fresco de la misma. A continuación se procede a la compactación del material, con lo que la superficie de la capa reciclada queda sellada (Ver Figura N°20).



Figura N°20.- Máquina CRAFT (Equipo para la ejecución de Juntas)

3.3.4 Compactación

Una compactación adecuada es fundamental para obtener la resistencia necesaria y durabilidad del pavimento reciclado, por lo que es aconsejable alcanzar la mayor densidad posible. Es recomendable llegar al 100% de la máxima densidad Proctor Modificado, de lo contrario un mínimo de 97% como valor medio del espesor reciclado.

En general, los equipos utilizados en la compactación deben comprender al menos un rodillo vibratorio y un rodillo neumático o bien un rodillo mixto. Sin embargo, en proyectos donde se ha empleado la técnica del reciclado de pavimentos con cemento, el empleo de dos rodillos vibratorios ha dado buenos resultados (Ver Figura N°21).

La compactación debe llevarse a cabo tan rápidamente como sea posible después de la mezcla, por las siguientes razones:

- Para asegurar que el material no quede expuesto al secado, se recomienda disponer de un equipo, tan simple como rociador manual de agua disponible para prevenir la evaporación superficial excesiva.
- El tiempo de trabajabilidad del material reciclado tiende a ser relativamente corto (2 a 3 horas, dependiendo del tipo de cemento empleado y de la temperatura ambiente).



Figura N°21.- Compactación de la base reciclada con cemento

3.3.5 Perfilado

A la salida de la recicladora el volumen de los materiales tratados es superior al inicial, debido al cemento y agua aportados producto del esponjamiento que se produce al triturar capas muy densificadas tras el paso del tráfico en el tiempo. Por tal motivo es necesario perfilar el material resultante, lo que ayuda a mejorar la regularidad superficial. Esta actividad precede a la compactación y por tanto esta siempre dentro del tiempo de trabajabilidad del material reciclado.

Normalmente se emplea una motoniveladora (Ver Fig. N°22). Es importante que el perfilado se realice en todo el ancho de la franja reciclada y nunca llenando los puntos bajos con materiales procedentes de la eliminación de los puntos altos.

El material excedente producto del refinado puede ser eliminado y/o reutilizado para volver a perfilar las bermas adyacentes.



Figura N°22.- Perfilado de material reciclado

3.3.6 Curado y protección del material reciclado

Tan pronto como la compactación final haya culminado, la base reciclada debe ser curada, con el objetivo de proteger al material de las pérdidas de humedad, de la intemperie y del tráfico.

Normalmente se recurre a un riego de emulsión catiónica con una dotación mínima de betún residual del 600 g/m², que se protege con la extensión de arena y/o gravilla. Si el tráfico es importante, es aconsejable la extensión de un tratamiento superficial monocapa o bicapa. (Ver Figura N°23)



Figura N°23.- Riego de curado y protección con arena

La apertura al tráfico de la superficie reciclada debe retrasarse hasta que se produzca la rotura de la emulsión, tomando siempre las debidas precauciones para que la velocidad sea moderada a fin de evitar su deterioro.

También se puede colocar una carpeta asfáltica, inmediatamente después del curado, pero es aconsejable retrasar esta operación al menos 3 días, para

obtener un desarrollo más adecuado de los enlaces que se dan en la base reciclada y/o el agrietamiento por contracción del sistema. (Ver Figura N°24)



Figura N°24.- Colocación de mezcla asfáltica en caliente, sobre base reciclada.

3.4 CONTROL Y ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD

El control de calidad es una parte esencial para la obtención de resultados satisfactorios del proceso de reciclado. Este control se lleva a cabo en 2 etapas: una etapa para controlar la ejecución de los trabajos mientras estos se llevan a cabo y otra para comprobar que el producto final cumple con todas las especificaciones.

Antes de iniciar cualquier trabajo es necesario comprobar el estado de los recursos, principalmente que los equipos sean los adecuados para el reciclado de pavimentos con cemento y que se encuentren en buen estado operacional.

Para tramos de grandes longitudes es necesario construir una sección de prueba, con el fin de ajustar los parámetros de operación del equipo de reciclaje, en particular su velocidad de avance y las condiciones de compactación (cantidad, características, número de pasadas, etc.).

3.4.1 Control de Calidad durante la construcción

La procedencia de los materiales debe ser verificada y la calidad de la producción debe ser controlada, algunos de estos aspectos a controlar son los siguientes:

- a) Materiales de Aportación; la calidad de los materiales de aportación (como los agregados para las correcciones granulométricas, cemento,

- agua y aditivos) deben ser revisados incluyendo su correcta aplicación sobre la vía a reciclar.
- b) Contenido de cemento; cuando el cemento se extiende sobre el pavimento a ser reciclado, su tasa de aplicación se puede comprobar por medio de una bandeja (de peso y área conocida) colocada en la superficie antes del extendido y pesada posteriormente. Cuando el cemento se introduce directamente como lechada a través del equipo de reciclaje es necesario comprobar la operación de las boquillas que inyectan dicha lechada así como la revisión de las lecturas del microprocesador del equipo de reciclaje verificando el consumo de cemento previsto en el diseño. En general la observación antes y después del reciclado permitirá una evaluación de la uniformidad del extendido.
 - c) Contenido de Humedad; el agua añadida a través de las boquillas de inyección durante el proceso de reciclaje debe ser controlada por la unidad de medición del equipo de reciclaje. El contenido óptimo debe mantenerse constante, de lo contrario se tendrán dificultades para alcanzar la densidad especificada dentro del tiempo de trabajabilidad. Se recomienda realizar ensayos de Contenido de humedad con una frecuencia de 200 a 500 m². Que deben ser correlacionados con regularidad con métodos de prueba rápida del densímetro nuclear.
 - d) Granulometría del material reciclado; el análisis granulométrico hace posible corroborar el grado de trituración y/o pulverización del material, así como la uniformidad de la capa reciclada. También podemos verificar si la velocidad del equipo de reciclaje es la adecuada. Se recomienda un análisis granulométrico diario.
 - e) Homogeneidad de la mezcla; debe ser evaluada visualmente, así como en las muestras tomadas al azar en el sentido longitudinal y transversal, teniendo en cuenta que la homogeneidad es generalmente más difícil de lograr en este último. Además con estas muestras se pueden ensayar para obtener densidades secas máximas, valores de resistencia mecánica, módulos de elasticidad, etc.
 - f) Compactación; la densidad y el contenido de humedad generalmente se comprueban en un lugar con un densímetro nuclear (Método Nuclear ASTM D 2922 y D 3017) y/o mediante el Método del cono de arena

(ASTM D 1556). En todo caso la densidad media seca medida en cualquier punto no debe ser menor al 97% de la máxima densidad de referencia. Se recomienda lugares al azar en cada franja de material reciclado, con una frecuencia de una medición por cada 200 m² de superficie.

- g) Profundidad del tratamiento; se debe verificar el espesor de la capa reciclada, el espesor real no debe ser menor que el de diseño. Si el espesor es mayor, daría lugar a un menor contenido de cemento por centímetro de material reciclado y en consecuencia una baja en la resistencia mecánica. La medición directa es posible sólo a través de extracción de testigos o núcleos, después de haber transcurrido un tiempo prudente para realizar dicha actividad. Sin embargo, debido a la naturaleza destructiva de este tipo de medición se restringe su aplicación a 1 ó 2 núcleos por kilómetro.
- h) Aspecto superficial y geometría de la vía; en superficie terminada debe verificarse el cumplimiento de todos los requisitos geométricos y de uniformidad en la apariencia (sin segregación).

3.4.2 Control de Calidad después de la construcción

A efectos de aplicación de los criterios de aceptación o rechazo, se establecerán lotes de una dimensión máxima no superior a 3000 m² o a la superficie construida en un día. Se estudiarán los siguientes puntos:

- a) Espesor del material reciclado; de acuerdo a lo anteriormente mencionado en el Control de calidad durante la construcción se recomienda al menos 1 núcleo por cada kilómetro, a pesar de su dificultad es importante establecer el límite inferior de la capa tratada. El espesor medido del material reciclado debe ser igual o superior al del diseño. De ocurrir lo contrario el revestimiento con carpeta asfáltica debe ser aumentado para compensar dicha deficiencia de espesor. Estos testigos o núcleos también pueden ser ensayados para comprobar densidad, módulo de elasticidad y resistencias mecánicas (compresión y tracción indirecta).
- b) Resistencia mecánica; Se recomienda tomar un mínimo de dos series de muestras por día de trabajo (mañana y tarde) con el objetivo de ensayar al menos dos series de tres probetas después de 7 días. Además por lo menos una serie de tres muestras debe ser preparada cada 2 ó 3 días

para ensayarlas a 28 días. Aunque el control se lleva a cabo para evaluar la resistencia a compresión no confinada (UCS), es recomendable también preparar algunas series de muestras para ensayos de resistencia a la tracción indirecta (ASTM C496 "Método de Ensayo Normalizado para Resistencia a la Tracción indirecta de Especímenes Cilíndricos de Concreto) y/o módulo de elasticidad.

- c) Nivelación; El nivel de la superficie acabada no debe variar en cualquier lugar ± 15 mm desde el nivel de diseño.
- d) Ancho del reciclado; El ancho de la capa del reciclado no debe ser menor que el especificado para cualquier sección de la vía.
- e) Regularidad superficial; La superficie de la capa reciclada debe tener una textura uniforme, sin segregaciones y adecuado bombeo. No debe retener el agua. Además debe presentar un Índice de Rugosidad Internacional (IRI) inferior a 5 sobre la longitud completa del carril a ser considerado.
- f) Deflexiones a corto y largo plazo; Pueden ser útiles para determinar la capacidad de carga alcanzada. Se dice deflexiones a corto plazo (3 – 7 días después del reciclado), pues muestran comprobar la homogeneidad del tratamiento y detectar cualquier zona donde se requiere un espesor extra de carpeta asfáltica.
- g) Control de grietas; Se requiere de una inspección visual del pavimento reciclado, de encontrarse grietas estas deben tratarse cuando sea necesario.

CAPITULO IV: EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO

4.1 ANÁLISIS DE COSTOS

Al comparar las opciones de construcción de una nueva vía pavimentada o la rehabilitación de una ya existente, desde el punto de vista económico, es conveniente tener en cuenta los costos a lo largo de su vida útil, incluyendo:

- Costo de construcción
- Costo de mantenimiento
- Costo para los usuarios de la vía (especialmente en las obras de mantenimiento).

El valor residual del pavimento al final de su vida útil debe ser deducido de estos costos.

Ahora analizaremos el costo que se genera por la construcción de una capa de reciclado. Para ello utilizaremos como referencia información española, para el desglose de las estimaciones (Equipos, Materiales, Mano de Obra, etc.), sin embargo esto tendrá que ser modificado cuando se aplique a otros países.

4.1.1 Costo de construcción de una capa reciclada con Cemento

El costo de construcción depende de los siguientes factores:

- El volumen de material a ser reciclado, en particular: del espesor (a mayor espesor, menor rendimiento y por lo tanto mayor costo), de la superficie (cuanto menor es el área a reciclar, repercute más en algunos costos independientes del trabajo a realizar, como el de la movilización de equipos a la zona de trabajo, así también de la geometría de la superficie, pues formas irregulares incrementan el número de maniobras de los equipos y reducen el rendimiento).
- Las características del pavimento a reciclar, incluyendo el espesor de las distintas capas, la naturaleza y características de los materiales. Pues cuanto más duros sean y más grande su tamaño, mayor será el desgaste de las picas y la carcasa de la recicladora, por lo tanto el incremento de costo de reposición de los mismos y la reducción de rendimientos por los cambios que implica dicha reposición.
- El equipo utilizado para el reciclado, equipos de mayor alcance son más costosos, sin embargo, este costo adicional se compensa en gran parte por los altos rendimientos obtenidos y una mejor calidad de los materiales

reciclados. Por otro lado el uso de equipos que inyectan cemento directamente en la recicladora en forma de lechada, evita los costos asociados con el uso de cemento seco (tanto de dosificación, pérdida de cemento por la acción del viento, horas hombre consumidas por el extendido del cemento).

- La cantidad de cemento requerida depende de las propiedades de los materiales que van a reciclarse. Por lo tanto tiene un efecto doble; por el costo en sí del cemento y por la influencia de la dosificación en el rendimiento de los trabajos.

En vista de todos los factores arriba mencionados, los costos del reciclado con cemento pueden variar considerablemente en diversos proyectos, dependiendo del volumen de material a ser reciclado y la cantidad de cemento requerida.

Mostraremos en el presente capítulo los costos detallados de reciclado para un espesor promedio de 20 cm, según la Asociación Mundial de Carreteras (2003):

- a) Cemento.- El costo del cemento es directamente proporcional a la cantidad de cemento requerida. Los costos adicionales presentes son el transporte y el precio del cemento (ambos puestos en obra). Suponiendo una densidad en seco del 2.1 kg/m³ para el material reciclado (compactado) y un costo de S/ 0.46/kg actualizado para el año 2014, el ratio de costo del contenido de cemento es mostrado en la Tabla N°12.

Tabla 12.- Ratio de costo actualizado de contenido de cemento

Contenido de Cemento	%	3	4	5
	Kg/m ³ (espesor = 20cm)		12.6	16.8
Costo (S/./m ²)		5.75	7.67	9.59

Fuente: World Road Association – Pavement Recycling Guidelines (2003)

- b) Equipos de reciclado.- El costo de los equipos (mezcladores de suspensión, recicladoras, equipos de perfilado y compactación) depende del volumen de trabajo. Al igual que el cemento, la movilización de dichos equipos a obra tiene un impacto significativo en trabajos menores. Otros factores que condicionan el costo de los equipos, es la naturaleza de los materiales (mientras más duro sea el material existente, mayor será el desgaste de los consumibles de la recicladora y además menor

será la velocidad de funcionamiento). Estos factores pueden generar costos no previstos y disminuir la productividad de los trabajos.

Cabe resaltar que la diferencia entre los trabajos mayores y menores radica en la incidencia en el costo que representa la movilización y desmovilización de los equipos de reciclaje (mezcladores de suspensión, recicladoras, equipos de perfilado y compactación). Generalmente los trabajos mayores suponen superficies de más de 50,000 m².

- c) Mano de obra y equipos auxiliares.- Los equipos auxiliares presentes durante el proceso de reciclado, son las cisternas de agua, su carga puede contemplar un costo por el uso de dicho recurso (derecho de explotación). Otro equipo presente son aquellos para la ejecución de juntas teniendo en cuenta las separaciones cada 3 m.

Además asignaciones de costo a la mano de obra para las operaciones, de extendido de cemento, eliminación de excedentes para corregir los bordes, etc.

- d) Otros costos.- Aquellos costos que se detallan anteriormente no incluyen: la membrana de curado de la capa reciclada, el suministro de agregados cuando sea necesario una corrección granulométrica, corrección de la pendiente transversal del pavimento y/o completar el espesor para iniciar el reciclado.

- e) Costo Total.- Los costos mencionados anteriormente totalizan el proceso de reciclado de pavimentos con cemento. Mencionaremos con fines ilustrativos el costo total promedio de un reciclaje con cemento para una superficie de 50,000 m² de pavimento con un espesor promedio de 20 cm. según la Tabla N°13.

Tabla N°13.- Costo promedio actualizado al 2014, de reciclado de 20 cm.

Costo Item	Mínimo (SI./m ²)	Máximo (SI./m ²)
Cemento	5.75	9.59
Equipos de reciclado	4.04	4.83
Equipos auxiliares	1.39	1.61
Mano de Obra	0.11	0.11
Curado	1.01	1.01
Total	12.30	17.15

Fuente: World Road Association – Pavement Recycling Guidelines (2003)

El costo total del reciclado cerca de 50,000 m² de pavimento in-situ con cemento, con ejecución de juntas, oscila entre 12.3 y 17.15 Nuevos soles por metro cuadrado (S./m²), dependiendo del espesor de la capa a reciclar y de la dosificación de cemento requerida. Pudiendo aumentar dichos ratios en trabajos menores.

4.2 ANÁLISIS DE PRODUCTIVIDAD

Los análisis de productividad vienen definidos por la relación de los resultados obtenidos (producción) y los recursos utilizados para obtenerlos, midiendo así el desempeño del proceso.

Además realizaremos un análisis de valor ganado al proceso del reciclado de pavimentos con cemento, respecto a los objetivos previstos de costo y tiempo del Proyecto "Servicio de Conservación Vial Panamericana Sur Dv. Atico – Pte. Camiara".

Para lograr ello trabajaremos con la herramienta del Informe Semanal de Producción (ISP), la cual nos permitirá diagnosticar el estado actual del proceso a través de la medición de la productividad y/o rendimiento, identificando desviaciones respecto a los objetivos de desempeño del proceso, estableciendo así acciones correctivas y poder proyectar la duración y recursos para la culminación del proceso.

Para la elaboración del Informe Semanal de Producción se requerirá de la siguiente información:

- Recursos utilizados en el proceso.
 - Registro de avance real.
 - Rendimientos previstos del proceso.
 - Avance programado del proceso.
- a) Recursos utilizados por proceso.- Se recabará información de las horas trabajadas de los equipos en registro de partes diarios de Equipos, así como las horas hombre (HH) por parte diario de Mano de Obra, Reporte de salida de Materiales de Almacén relacionados directamente a la ejecución del proceso, y aquellos recursos que no hayan sido contemplados en los rubros mencionados.

- b) Registro del Avance Real.- Se realizará el registro de los avances diariamente, asignado responsabilidades al personal en obra para conseguirlos (controladores de campo), además la unidad de registro de los avances debe ser de conocimiento de todos los involucrados. Dichos avances se deben obtener por mediciones directas e indirectas, comúnmente se realiza un reajuste entre ambas para emitir los reportes oficiales.
- c) Rendimientos previstos del proceso.- Los rendimientos previstos pueden ser aquellos considerados en el presupuesto, siempre y cuando se haya verificado que sean aplicables a las condiciones reales del proyecto. De lo contrario realizar un nuevo análisis de costos y rendimientos para poder medir el proceso durante su ejecución.
- d) Avance programado del proceso.- Los avances programados, resultan del planeamiento interno del proyecto, si bien es cierto la distribución de las cantidades a ejecutar en el tiempo es lineal (prorratio), es necesario hacer una redistribución de los mismos de acuerdo a las condiciones reales del proyecto.

Una vez disponible la información requerida para la elaboración del ISP, ésta es consolidada y reportada semanalmente, con el objetivo de analizar el desempeño del proceso constructivo.

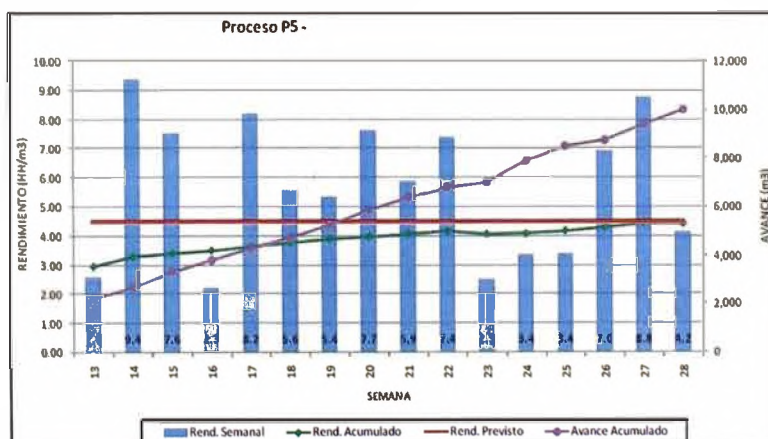


Figura N°25.- Ejemplo de Informe Semanal de Producción - Gráfico Proceso

4.2.1 Análisis de Valor Ganado

Para el análisis del desempeño del proceso se utilizará la metodología del Valor Ganado, donde mediremos los siguientes indicadores:

- Los índices CPI (Índice del Desempeño del Costo) y SPI (Índice de desempeño del Cronograma), que son usados para determinar si a una fecha de corte el proceso se encuentra dentro del costo previsto y dentro del cronograma actualizado respectivamente.
- El análisis también debe considerar la identificación de causas que conllevan a los resultados obtenidos, así como el establecimiento de las acciones correctivas a implementar para mejorar el desempeño del proceso.
- Los índices CPI y SPI se calculan a través de las siguientes fórmulas:

$$CPI = \text{Valor Ganado (EV)} / \text{Costo Real (AC)}$$

$$SPI = \text{Valor Gando (EV)} / \text{Valor Planeado (PV)}$$

Para el cálculo de los parámetros de Valor Ganado, Valor Planeado y Costo Real, debemos tener en cuenta lo siguiente, según PMBOK 2004 "A Guide to the Project Management Body of Knowledge – Fourth Edition":

- Valor Planeado (PV) es el presupuesto autorizado asignado al trabajo que debe ejecutarse para completar una actividad o un componente de la estructura de desglose del trabajo.
- Valor Ganado (EV) es el valor del trabajo completado expresado en términos del presupuesto aprobado asignado a dicho trabajo para una actividad del cronograma o un componente de la estructura de desglose del trabajo.
- Costo Real (AC) es el costo total en el que se ha incurrido realmente y que se ha registrado durante la ejecución del trabajo realizado para una actividad o componente de la estructura de desglose del trabajo.

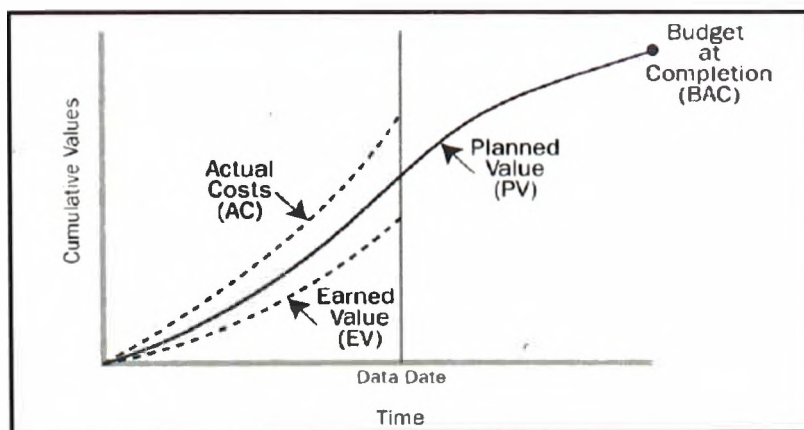


Figura N°26.- Curvas de Valor Ganado, Valor Planeado y Costos Reales

CAPITULO V: APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DEL RECICLADO DE PAVIMENTOS CON CEMENTO EN EL SERVICIO DE CONSERVACIÓN VIAL PANAMERICANA SUR

5.1 OBJETIVO

Demostrar la viabilidad técnica y económica del Reciclado de pavimentos en frío con cemento, como alternativa de mejoramiento y rehabilitación en la carretera asfaltada Panamericana Sur, en el tramo Atico – Dv. Quilca – La Repartición, a lo largo de 19.5 Km de longitud, entre las progresivas 721+100 – 740+600.

5.2 ALCANCE

- Verificar la viabilidad técnica y económica del Reciclado de pavimentos en frío con cemento en el Proyecto de Conservación Vial de la carretera asfaltada: Panamericana Sur.
- Verificar el cumplimiento de los niveles de servicio exigidos en los Términos de Referencia, por la ejecución de trabajos de Reciclado de pavimentos en frío con cemento.
- Evaluar el proceso constructivo y control de calidad, de acuerdo a los lineamientos descritos en el Capítulo III del presente informe.
- Comparar los costos y rendimientos obtenidos del proceso del Reciclado de pavimentos en frío con cemento, con respecto a los valores previstos en la línea base del Presupuesto de Obra.

5.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO

5.3.1 Contrato de Conservación Vial por Niveles de Servicio

El contrato por niveles de servicio es un tipo de contrato en el que los pagos por la gestión y mantenimiento de los activos viales están estrechamente asociados al cumplimiento por parte del contratista de unos indicadores mínimos de niveles de servicio claramente definidos.

Los activos viales generalmente comprendidos en este tipo de contratos son por ejemplo: la superficie del pavimento, bermas, obras de arte, cunetas, señalización horizontal y vertical, barandas, túneles, puentes, entre otros. Y los servicios para mantener y gestionar el corredor vial contratado incluyen el mantenimiento rutinario, mantenimiento periódico, atención de emergencias, etc.

A diferencia de las contrataciones tradicionales de mantenimiento de vías, la Entidad contratante no indica ni el método ni el material a emplear para el mantenimiento durante la Conservación Periódica; no obstante queda a responsabilidad del contratista presentar un "Plan de Conservación" que contenga las mejores alternativas técnicas, para el desarrollo y el cumplimiento de los niveles de servicio exigidos en el contrato.

Para entender mejor la definición de los Contratos por niveles de servicio, por ejemplo, al contratista no se le paga por el número de baches arreglados, sino por los resultados obtenidos de su actividad: los baches han desaparecido (es decir, se ha cubierto el 100% de los baches). Si no se consideran los indicadores de nivel de servicio o no se rectifican con prontitud las deficiencias encontradas, ello repercute negativamente en el pago del contratista mediante una serie de sanciones claramente definidas. Si se ha cumplido con los indicadores, el pago se efectúa periódicamente en general en mensualidades iguales.

5.3.2 Información Contractual del Proyecto

Proyecto :	Servicio de Conservación Vial por Niveles de Servicio de la Carretera Asfaltada: Panamericana Sur. Tramo: Atico – Dv. Quilca – La Repartición, Dv. Matarani – Pte. Montalvo y Dv. Ilo – Pte. Camiara
Ubicación :	Regiones de Arequipa, Moquegua y Tacna
Longitud :	457.822 Km
Cliente :	Provías Nacional - Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC)
Supervisión :	Provías Nacional Unidad Zonal Arequipa
Contratista :	Consorcio Vial Sur del Perú (Cosapi S.A – Mota Engil S.A)
Convocatoria :	Concurso Público N° 0016 - 2010 - MTC/20
Contrato de Servicios :	N° 171 – 2010 – MTC/20 (08 Noviembre 2010)
Monto Contractual :	S/. 170'988,278.73 Nuevos Soles (Inc. I.G.V.)
Sistema de Contratación :	Precios Unitarios
Fecha de Inicio Contractual :	03 Diciembre 2010
Fecha de Término :	02 Diciembre 2015
Plazo Contractual :	05 Años

5.3.3 Contexto Físico

La carretera asfaltada: Panamericana Sur en el Tramo Atico – Dv. Quilca – La Repartición, Dv. Matarani – Pte. Montalvo y Dv. Ilo – Pte. Camiara, pertenece a la ruta nacional PE – 1S y está localizada en las Regiones de Arequipa y Moquegua y Tacna.

El proyecto conforma un corredor vial de suma importancia para el desarrollo de la economía de la zona ya que interconecta importantes provincias como Camaná, Arequipa, Islay, Mariscal Nieto, Ilo y Jorge Basadre. Según la Figura N°27.

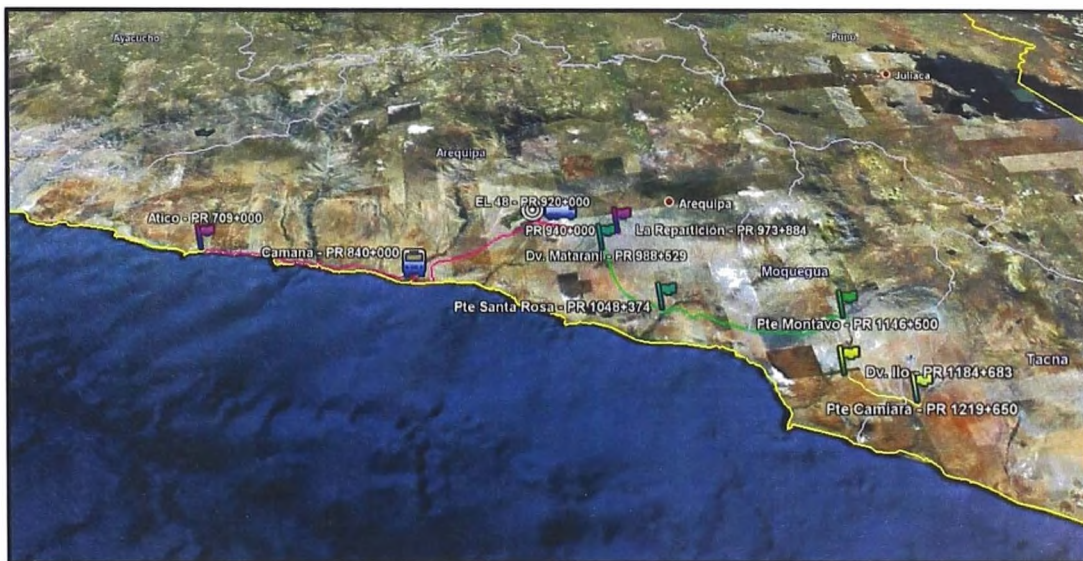


Figura N°27.- Tramos Viales del Servicio de Conservación Vial Panamericana Sur

El corredor Vial corresponde a 3 tramos claramente definidos, el Tramo I corresponde a Atico – Acc. Microondas – La Repartición, el Tramo II a Dv. Matarani – Pte. Santa Rosa y el Tramo III se subdividen en 2 subtramos Pte. Santa Rosa – Pte. Montalvo y Dv. Ilo – Pte. Camiara respectivamente.

Dado que el Proyecto vial bordea la costa sur del Perú, el clima de la zona se caracteriza por ser seco y árido. Gran parte de la longitud del proyecto se extiende en zonas desérticas donde se registran temperaturas altas durante el día (24°C) y hasta de 0°C en las noches. A lo largo se atraviesan diversas altitudes empezando por las zonas de Atico y Camaná a 58 msnm, ascendiendo a una altura de 1420 msnm en la provincia de Moquegua y nuevamente disminuyendo a 160 msnm en la provincia de Ilo.

El Consorcio Vial Sur del Perú planifica ejecutar actividades de Conservación Periódica a lo largo de los 3 tramos (considera un conjunto de actividades

mayores que procurarán recuperar las condiciones iniciales de serviciabilidad de la vía), Conservación Rutinaria (considera un conjunto de actividades de carácter preventivo que se ejecutarán permanentemente a lo largo de la vía y que se realizarán diariamente con la finalidad de preservar todos los activos viales), Atención de emergencias y todas las actividades de Gestión y relevamiento de información indicada en los Términos de Referencia del contrato.

Cabe resaltar que los trabajos a evaluar del reciclado de pavimentos serán enfocados al Tramo I del proyecto, cuyas características generales de vía vienen definidas en la Tabla N°14.

Tabla N°14.- Datos General Tramo I

TRAMO	CALZADA	ANCHO PROMEDIO CALZADA (m)	ANCHO PROMEDIO DE BERMA (m)	ESPESOR PROMEDIO CARPERTA ASFALTICA (m)	ESPESOR PROMEDIO MATERIAL GRANULAR (m)	CATEGORÍA
Atico-Acc. Microondas-La Repartición	Calzada única	6.8	1.5	0.1	0.2	Primera Clase

5.3.4 Niveles de Servicio exigidos

Para el Tramo I Atico – Acc. Microondas – La Repartición, los términos de referencia del contrato, establecen los niveles de servicio en las zonas donde se ejecute la Conservación Rutinaria (Antes y Después) y Conservación Periódica, de acuerdo a las variables e indicadores de las Tablas N°15, 16 y 17.

5.4 ESTUDIOS PRELIMINARES

El contratista como parte integral del contrato de conservación vial por niveles de servicio debe realizar un inventario vial calificado (durante las fases pre-operativas), bajo dichos resultados el contratista deberá elaborar un informe técnico de situación inicial, comprendiendo así, Estudio de tránsito, Evaluación y Diagnóstico Superficial y Estructural del Pavimento, Evaluación del estado del Drenaje, Tramificación del Pavimento del Corredor Vial y la Evaluación Estructural de los Puentes y Obras de Arte.

En el presente Capítulo abordaremos principalmente la Evaluación superficial y estructural del pavimento, Estudios de Tráfico y la Tramificación del Corredor

Vial correspondiente al Tramo I: Atico – Acc. Microondas – La Repartición, comprendido entre las progresivas Km 709+000 al Km 973+884.

Tabla N°15.- Niveles de Servicio antes de la Conservación Periódica

VARIABLE	INDICADOR	FORMA DE MEDICIÓN	TOLERANCIA
Calzada	- Limpieza - Baches	Inspección Visual Inspección Visual	- Siempre limpia - Cero baches
Bermas	- Limpieza	Inspección Visual	- Siempre limpia
Zonas Laterales (Derecho de Vía)	- Roce	Inspección Visual	- Altura máx. 0.30 m
Drenaje	- Cunetas - Alcantarillas - Bajadas de agua - Badenes	Inspección Visual	Siempre limpias, libre de residuos sólidos, vegetación y cualquier otro elemento que cause obstáculo.
Estructuras Viales	Puentes y Pontones Muros	Inspección Visual	- Siempre limpios y libre de obstáculos. - Juntas de dilatación sin restricciones. - Apoyos: libres de restricciones al desplazamiento y rotación. - Drenes abiertos

Fuente: Bases Estándar de Concurso Público N°0016-2010-MTC/20, Cap. III, Términos de Referencia

Tabla N°16.- Niveles de servicio Conservación Periódica

VARIABLE	INDICADOR	FORMA DE MEDICIÓN	TOLERANCIA
Calzada	Indice de Rugosidad Internacional (IRI)	Perfilógrafo	≤ 2 m/km

Fuente: Bases Estándar de Concurso Público N°0016-2010-MTC/20, Cap. III, Términos de Referencia

Tabla N°17.- Niveles de Servicio después de la Conservación Periódica

VARIABLE	INDICADOR	FORMA DE MEDICIÓN	TOLERANCIA
Calzada	- Limpieza - Baches - Fisuras >3mm y <6mm - Fisuras >6mm	Inspección Visual Inspección Visual Odómetro Odómetro	- Siempre limpia - Cero baches - 10% tolerancia - área - 0% tolerancia - área
Bermas	- Limpieza - Baches	Inspección Visual	- Siempre limpia - Cero Baches
Zonas Laterales (Derecho de Vía)	- Roce - Taludes / Terraplenes	Inspección Visual	- Altura máx. 0.30 m - Deberán presentarse sin deformaciones, asentamiento o erosión alguna
Drenaje	- Cunetas - Alcantarillas - Bajadas de agua - Badenes	Inspección Visual	Siempre limpias, libre de residuos sólidos, vegetación y cualquier otro elemento que cause obstáculo.

Estructuras Viales	Puentes y Pontones Muros	Inspección Visual	<p>Se señalan las siguientes tolerancias sin ser limitativas, para mayor información remitirse a las notas:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Puente, accesos y cause: siempre limpios y libre de obstáculos. - Juntas de dilatación: funcionales (completas y sin restricciones). - Apoyos: libres de restricciones al desplazamiento y rotación. - Estructuras metálicas sin oxido. - Estructuras de concreto sin delaminación, ni disgregación, ni contaminación con sales, ni exposición de armadura en corrosión y sin fisuras mayores a 0.5mm. - Conexiones completas y ajustadas. - Barandas completas y pintadas. - Drenes completos, abiertos y con prolongación bajo la losa no menor a 0.30m. - Espesor de carpeta asfáltica sobre puente no mayor a 0.05m (salvo el caso de puentes arco de timpano relleno, alcant. y marcos).
Señalización	<ul style="list-style-type: none"> -Verticales -Horizontales -Hitos kilométricos -Guardavias 	<ul style="list-style-type: none"> -Reflectómetro -Reflectómetro -Inspección visual -Inspección visual 	<ul style="list-style-type: none"> -Completas y limpias, Amarillo: 250cd/lux/m², Blanco: 320cd/lux/m², Naranja: 60cd/lux/m². - Amarillo: 150cd/lux/m², Blanco: 150cd/lux/m². -Completos, limpios y pintados. -Completos limpios, pintados y sin deformaciones.

Fuente: Bases Estandar de Concurso Público N°0016-2010-MTC/20, Cap. III, Términos de Referencia

5.4.1 Evaluación de la condición superficial, estructural y funcional inicial del Tramo I: Atico – Acc. Microondas – La Repartición

De acuerdo al capítulo II, del presente Informe de Suficiencia, el Consorcio Vial Sur del Perú realizó la evaluación de la condición estructural y funcional del pavimento existente resultando de esta las mediciones de deflexiones, rugosidad, daños y ahuellamientos que se muestra a continuación:

a) Mediciones de Daños Superficiales

A fin de determinar la condición superficial del pavimento, se inspeccionó las fallas de la calzada y berma. De acuerdo con los datos registrados por dichas inspecciones (tipos de fallas, extensión y gravedad), presentes en el Anexo N°01 "Evaluación Superficial Tramo I", se procedió a calcular el Índice de deterioro Superficial del pavimento (I_s) por medio de la metodología VIZIR. De acuerdo a la Figura N°28.



Figura N°28.- Medición del Índice de deterioro Superficial (Is) del Tramo I (Km. 709+000-754+020)

b) Mediciones de Rugosidad e Índice de Serviciabilidad Presente (PSI)

La evaluación de la rugosidad del pavimento existente, se llevó a cabo empleando el Perfilógrafo RSP-L5 (Road Surface Profiler) y las mediciones obtenidas se efectuaron bajo la norma ASTM E 950-98 (Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer Established Inertial Profiling) y para el análisis de la información de rugosidad, se tomaron los valores promedio de la huella izquierda y huella derecha de cada carril de circulación.

De acuerdo al Gráfico N°29, se observa que no hay grandes diferencias entre los valores de rugosidad entre el carril derecho e izquierdo. Además en el Anexo N°02 "Rugosidad Tramo I", se presenta la información obtenida en campo de la Rugosidad (IRI) expresada en (m/Km).

En términos generales, para el Tramo I Atico - Acc. Microondas - La Repartición, se observa que no existen diferencias grandes en la regularidad superficial entre los carriles de la calzada debido a que se tienen valores de IRI entre 0.69 y 33.15 m/km, con un valor promedio de 2.79 m/km para el carril izquierdo y valores entre 0.7 y 24.84 m/km, con un valor promedio de 2.78 m/km para el carril derecho. Es necesario aclarar que los altos valores de IRI unitario corresponde a la presencia de numerosos reductores de velocidad tipo resalto (Ver Figura N°30).

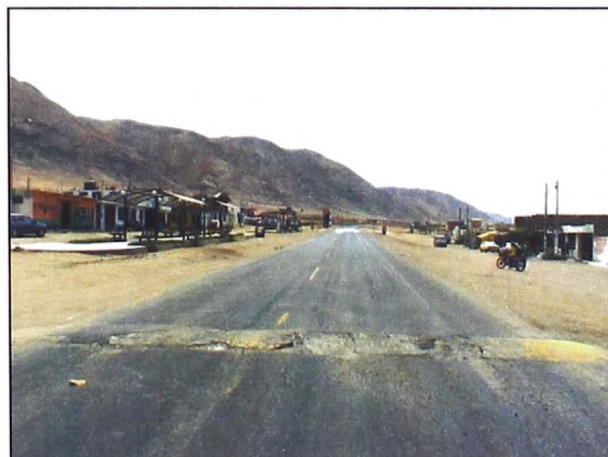


Figura N°30.- Resalto presente en el Tramo I Atico – La Repartición

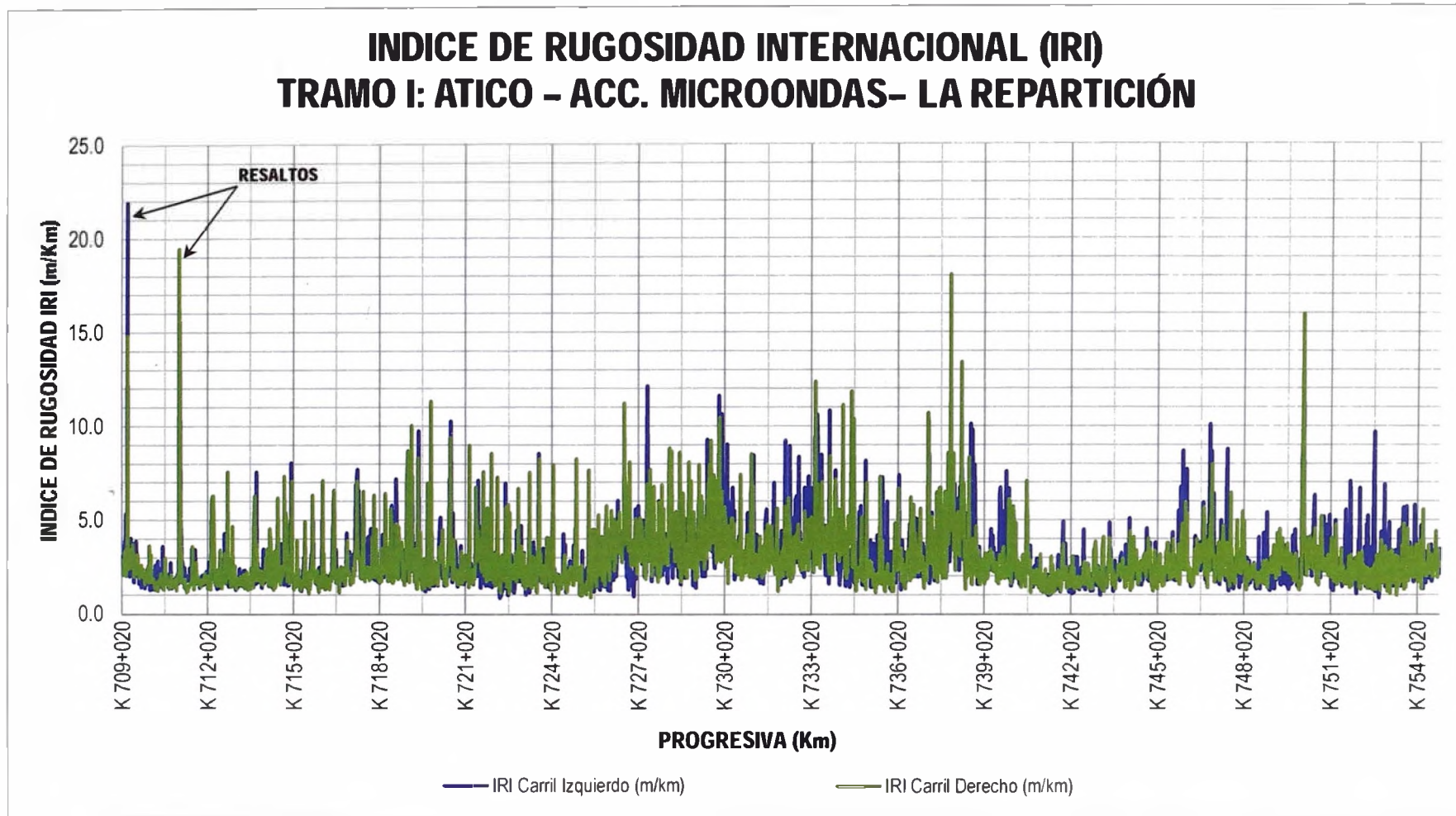


Figura N°29.- Medición del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) por carril del Tramo I (Km. 709+020-754+020)

c) Mediciones de Ahuellamientos

Las mediciones de ahuellamientos que se llevaron a cabo y fueron registradas en el Anexo N° 03 "Ahuellamientos Tramo I", los valores obtenidos fueron menores a 1.00 cm. Esto implica que el confort del usuario de la vía no se vio afectado.

d) Mediciones de Deflexiones

Para la medición de deflexiones se empleó la metodología no destructiva, utilizando para ello el Deflectómetro de Impacto (Heavy Falling Weight Deflectometer, HWD).

Además para llevar a cabo dichas mediciones se tomaron en cuenta las normas ASTM D 4694-96 "Standard Test Method for Deflections with a Falling-Weight-Type Impulse Load Device (2003)", ASTM D 4695-03 "Standard Guide for General Pavement Deflection Measurements" y ASTM D 5858-96 "Standard Guide for Calculating In Situ Equivalent Elastic Module of Pavement Materials Using Layered Elastic Theory (2003)" (Ver Anexo N°04 "Deflectometría Tramo I").

En las Figuras N°31 y 32 se muestran los valores de deflexión central y Módulo Resiliente, cabe resaltar además que registro total de la deflectometría evaluada muestra valores variables de deflexión central normalizadas por carga y por temperatura para el Tramo I: Atico – Acc. Microondas– La Repartición, siendo así que dichos valores están entre 66 y 1299 micrones (μm).

Otro punto analizado fueron los valores de deflexión admisible que de acuerdo al estudio de tráfico se dividen en 3 Sectores, Sector 1: Atico-Camaná (Km. 709+000 - 836+700), Sector 2: Camaná - Desvío Aplao (Km. 836+700 - 901+000) y Sector 3: Desvío Aplao – Majes - La Joya - La Repartición (Km. 901+000 - 908+000 - 965+000 - 973+000). Para el caso en estudio del tramo a reciclar se estudiará el Sector 1, con un valor de deflexión admisible de $693\mu\text{m}$.

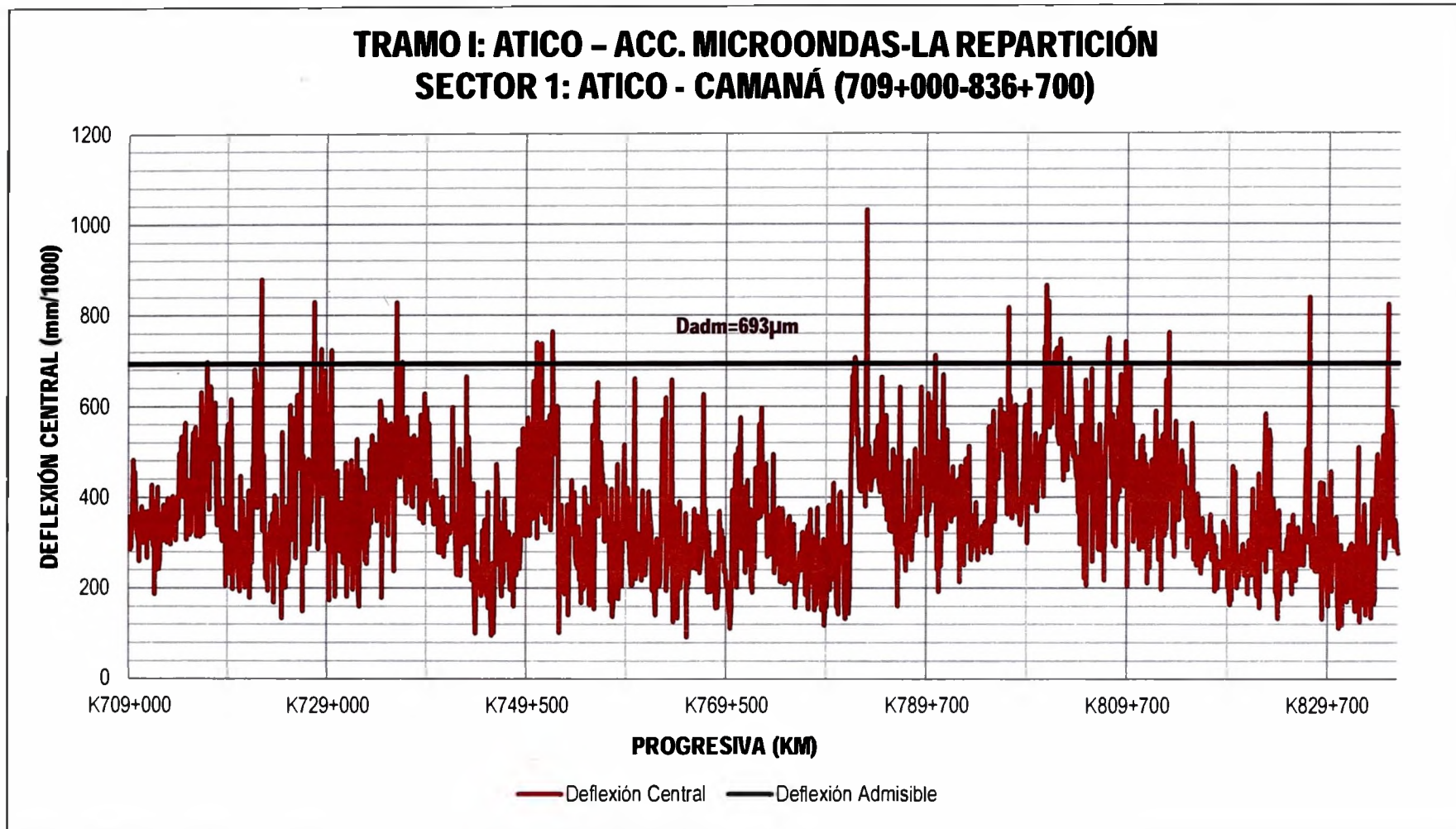


Figura N°31.- Deflexión Central del Tramo I (Km. 709+000-836+700)

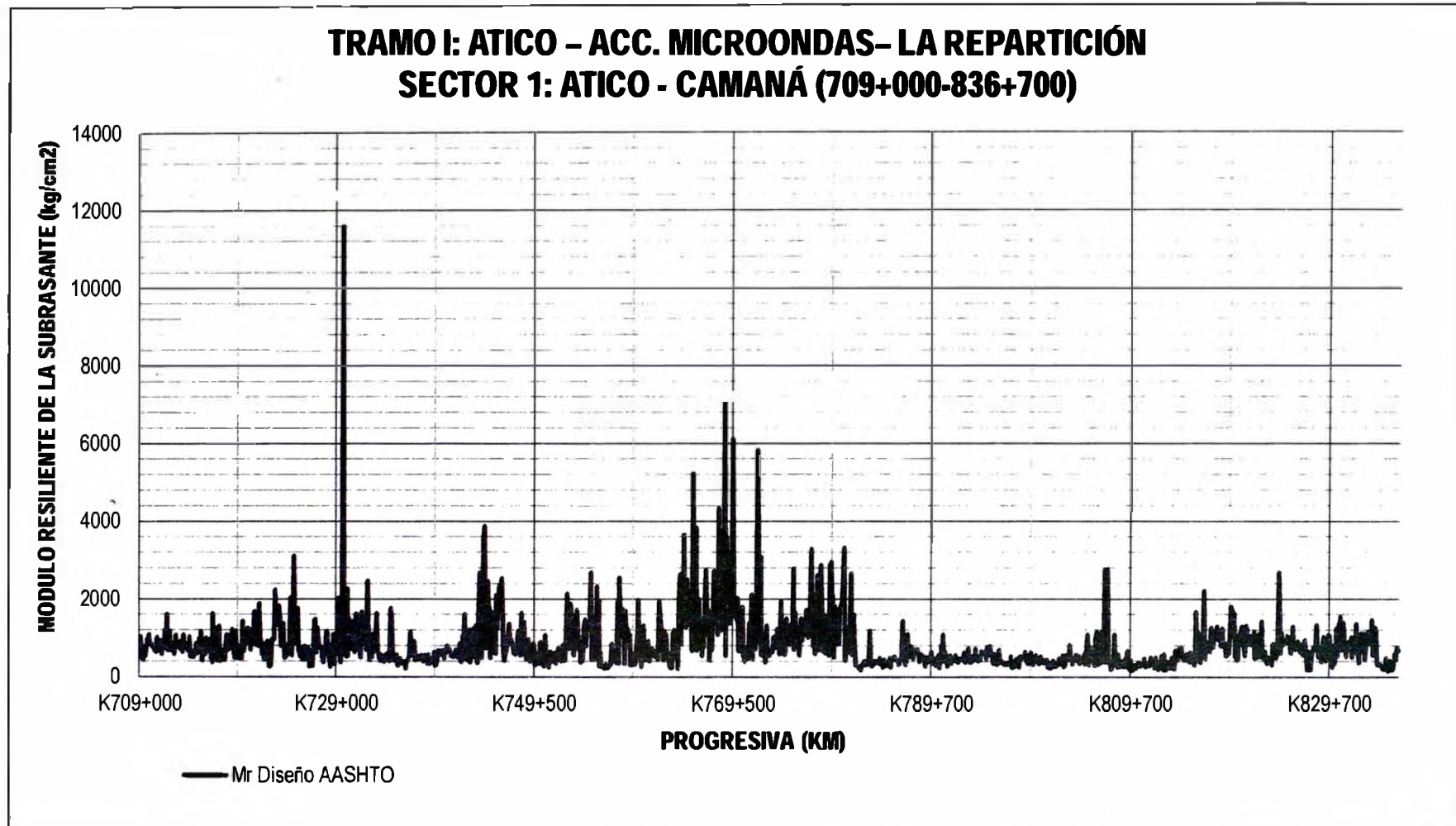


Figura N°32.- Módulo Resiliente de la subrasante Tramo I (Km. 709+000 – 836+700)

5.4.2 Mecánica de Suelos para la caracterización de la estructura del Pavimento Existente

Con el fin de caracterizar los materiales que conforman la estructura de pavimento, se ejecutaron 1 calicata cada 10 kilómetros a una profundidad máxima de 1.5 m; en cada calicata se realizó el registro de excavación con los espesores y la descripción visual de cada capa de material encontrado, granulometría, límites de consistencia, clasificación SUCS y AASHTO, y CBR. Adicionalmente, se realizaron algunas calicatas superficiales para la verificación de espesores. Por lo anterior, para el procesamiento de la información de deflectometría, especialmente para determinar el número estructural (SN_{ef}), el módulo resiliente de la subrasante (M_r) y el módulo de la estructura de pavimento (E_p) se emplearon espesores promedio por sectores, según lo encontrado en las calicatas. En la Tabla N°18 se presenta el resumen de calicatas y los ensayos de laboratorio realizados para el tramo evaluado.

Los materiales encontrados corresponden a materiales granulares que según el sistema de clasificación AASHTO, son en su mayoría tipo A-1-a (0), correspondientes a mezclas bien gradadas, compuestas predominantemente por piedra o grava, con o sin material ligante. En cuanto a la clasificación en el sistema unificado los suelos son gravas pobremente gradadas, que clasifican como GP o GP-GM.

También se encontraron materiales que se clasifican dentro del subgrupo A-1-b (0), que corresponde a materiales formados predominantemente por arena gruesa bien gradada, con y sin ligante. Existe presencia de materiales de los subgrupo A-2-4 (gravas y arenas limosas y arcillosas) y A-3 (arena fina), cuyo contenido de finos es igual o menor del 35% y en menor proporción se encuentran limos regulares con un porcentaje de finos superior al 35% correspondiente al grupo A-4.

Tabla N°18.- Resumen de Calicatas y ensayos de laboratorio Tramo I (Km 710+00 – 790+00)

PROGRESIVA (Km)	LADO	CALICATA	MUESTRA	PROF.(m)	HUMEDAD NATURAL	LIMITES < N° 40			CLASIFICACION		OPTIMO HUMEDAD %	MAXIMA DENSIDAD gr/cm3	DENSIDAD DE CAMPO		C.B.R. 0,1"		
						L.L.	L.P.	I.P.	SUCS	ASSHTO			DENSIDAD SECA gr/cm3	COMPACTACION %	100 %	EXP. %	INSITU %
KM 710+000	DERECHO	C-1	M-1	0,05 - 0,30	3.0	N.P.	N.P.	N.P.	GP-GM	A-1-a (0)							
KM 710+000	DERECHO	C-1	M-2	0,30 - 1,50	1.2	N.P.	N.P.	N.P.	GP	A-1-a (0)	7.4	2.145	2.105	98.1	56.0	0.0	46.6
KM 720+000	DERECHO	C-2	M-1	0,05 - 0,30	3.7	17	15	2	GP-GM	A-1-a (0)							
KM 730+000	DERECHO	C-3	M-1	0,12 - 0,27	2.0	16	14	2	GP-GM	A-1-a (0)							
KM 730+000	DERECHO	C-3	M-2	0,27 - 0,57	3.0	20	17	3	GM	A-1-b (0)	6.4	2.242	2.177	97.1	55.7	0.00	41.3
KM 740+000	IZQUIERDO	C-4	M-1	0,10 - 0,30	3.3	15	N.P.	N.P.	SW	A-1-b (0)							
KM 740+000	IZQUIERDO	C-4	M-2	0,30 - 0,45	3.6	15	N.P.	N.P.	GW	A-1-a (0)							
KM 740+000	IZQUIERDO	C-4	M-3	0,45 - 1,50	3.1	N.P.	N.P.	N.P.	SP	A.3 (0)	12.4	2.042	1.942	95.1	26.1	0.00	15.8
KM 750+000	DERECHO	C-5	M-1	0,08 - 0,23	4.4	17	N.P.	N.P.	SP	A-1-a (0)							
KM 750+000	DERECHO	C-5	M-2	0,23 - 1,50	5.5	27	23	4	GP-GM	A-1-a (0)	6.4	2.169	2.150	99.1	58.3	0.00	53.6
KM 760+000	DERECHO	C-6	M-1	0,14 - 0,29	3.4	20	19	1	SW-SM	A-1-a (0)							
KM 770+000	DERECHO	C-7	M-1	0,04 - 0,34	2.5	16	N.P.	N.P.	GP	A-1-a (0)							
KM 780+000	DERECHO	C-8	M-1	0,10 - 0,30	1.9	17	N.P.	N.P.	GP-GM	A-1-a (0)							
KM 790+000	DERECHO	C-9	M-1	0,10 - 0,20	5.1	16	N.P.	N.P.	SP	A-1-b (0)							
KM 790+000	DERECHO	C-9	M-2	0,20 - 0,45	3.5	N.P.	N.P.	N.P.	SP	A.3 (0)							

Así mismo mediante las calicatas realizadas se determinaron los espesores de la estructura del pavimento, según la Figura N°33. Dicha información será empleada para el análisis estructural del pavimento existente (Ver Anexo N°05 “Registros de excavación preliminar – Tramo I”)

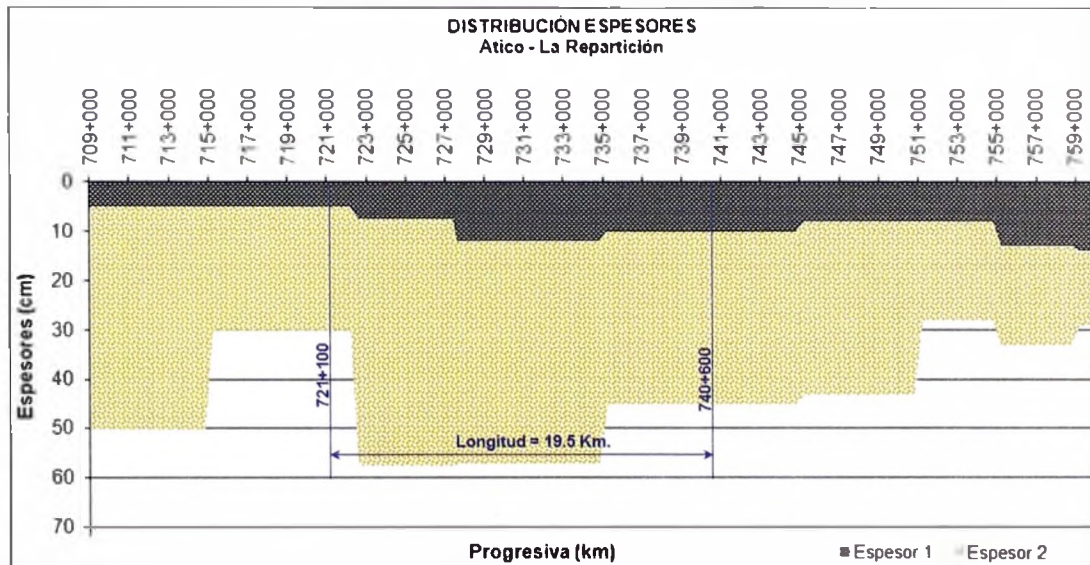


Figura N°33.- Distribución de Espesores Tramo I (Km. 709+000 – 759+000)

5.4.3 Tráfico de Diseño

Con base en el estudio de tránsito realizado, se tomó la información de número de ejes equivalentes (EAL a 8.2 toneladas acumuladas) para un período de 5 años, para poder determinar el faltante estructural por medio de la metodología AASHTO-93. El presente informe no aborda en detalle el documento que contiene el estudio de tráfico y carga, el cual contiene las consideraciones tenidas en cuenta para determinar el número de ejes equivalentes año a año. La Tabla N°19 presenta de manera resumida el número de ejes empleado.

Tabla N°19.- Número de Ejes Equivalentes Atico – La Repartición

Tramo	Número de ejes equivalentes para un periodo de 5 años
Atico-Camaná (Km. 709+000 – Km. 836+700)	4'978,507
Camaná-Desvío Aplao (Km. 836+700 – Km. 901+000)	5'352,616
Desvío Aplao –Majes -La Joya-La Repartición (Km. 901+000 – Km. 908+000 – Km. 965+000 – Km. 973+000)	8'245,283

5.4.4 Tramificación

Para un mejor análisis de los estudios realizados y lograr determinar las secciones homogéneas del Tramo I: Atico – Acc. Microondas – La Repartición, se empleó la metodología de CONREVIAL.

En la Figura N°34 se presenta la distribución de la deflectometría Benkelman obtenida a partir de la correlación de las deflexiones registradas con el Deflectómetro de Impacto. Adicionalmente, se muestra la deflexión admisible y la deflexión característica para los tramos homogéneos definidos en función de la deflectometría.

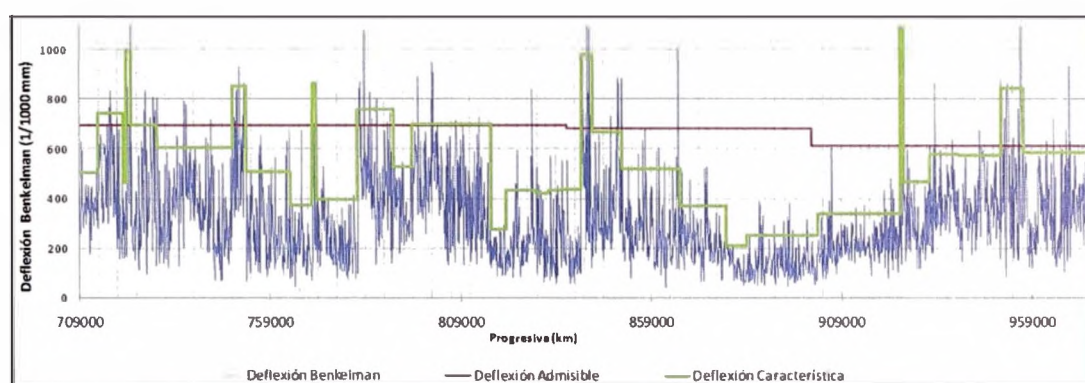


Figura N°34.- Distribución de la Deflexión Benkelman del Tramo I

En función categorización de las variables analizadas anteriormente, tales como: mediciones de daños superficiales, rugosidad e Índice de Serviciabilidad Presente, ahuellamientos, deflexiones y la caracterización in-situ de la estructura del pavimento existente, se muestra un resumen de la tramificación y/o sectorización del Tramo I: Atico – Acc. Microondas – La Repartición. (Ver Tabla N°20).

Tabla N°20.- Resumen de parámetros por sector homogéneo del Tramo I: Atico – Acc. Microondas – La Repartición

Tramo homogéneo	Progresiva Inicio	Progresiva Fin	Longitud (km)	Is promedio	IRI promedio (m/km)	Promedio de PSI (Paterson)	Ahuellamiento promedio (mm)	Mi diseño promedio (kg/cm2)	Espesor de Carpeta Asfáltica promedio (cm)	Espesor de Granular promedio (cm)	Deflexión VB (mm/1000)	Desviación Estándar (mm/1000)	DC Viga Benkelman (mm/1000)	Deflexión Admisible (mm/1000)	Número de Ejes Equivalentes 6 Años	% Falas estructurales en Carpeta Asfáltica	% Falas funcionales	% Falas Térmicas	H refuerzo CONREVAL (cm)
1	709+000	713+700	4.7	2.0	2.3	3.3	2.6	728	5	45	365	84	503.6	693.3	4.978.507	7%	0.04%	0.02%	0.0
2	713+700	720+400	6.7	3	2.7	3.1	6.0	862	5	29	477	163	744.9	693.3	4.978.507	11%	0.27%	0%	1.2
3	720+400	721+100	0.7	3	2.3	3.3	6.6	843	5	25	316	90	464.8	693.3	4.978.507	5%	0.35%	0%	0.0
4	721+100	722+500	1.4	3	2.7	3.1	7.7	548	5	27	553	270	997.3	693.3	4.978.507		0.18%	0%	0.0
5	722+500	729+200	6.7	3	3.0	2.9	4.6	875	9	49	400	179	694.7	693.3	4.978.507		0.01%	4%	0.0
6	729+200	749+100	19.9	3	3.1	2.9	4.6	939	10	38	358	151	607.0	693.3	4.978.507		0.69%	58%	0.0
7	749+100	752+600	3.5	4	2.9	3.0	3.5	725	8	28	580	165	852.0	693.3	4.978.507		0.00%	37%	3.5
8	752+600	764+200	11.6	3	3.0	2.9	5.6	726	12	27	275	142	508.4	693.3	4.978.507	2%	0.06%	43%	0.0
9	764+200	769+900	5.7	3	3.7	2.5	4.4	2110	10	70	209	101	374.4	693.3	4.978.507	13%	0.000%	66%	0.0
10	769+900	771+000	1.1	2	3.5	2.6	4.5	621	5	32	496	225	866.3	693.3	4.978.507	7%	0.01%	56%	4.0
11	771+000	781+900	10.9	3	2.9	3.0	4.3	1195	11	32	232	102	400.0	693.3	4.978.507	10.1%	0%	52%	0.0
12	781+900	791+300	9.4	3	2.5	3.1	3.2	426	10	30	476	173	760.3	693.3	4.978.507		0%	69%	1.8
13	791+300	796+100	4.8	3	2.4	3.2	5.4	471	10	30	361	101	526.9	693.3	4.978.507	6%	0.0%		0.0
14	796+100	816+900	20.8	3	2.9	2.9	4.1	405	14	35	435	161	700.3	693.3	4.978.507		0.0%	65%	0.2
15	816+900	820+800	3.9	2	2.2	3.4	1.9	1009	17	30	173	62	274.9	693.3	4.978.507	0%	46.20%	0%	0.0
16	820+800	828+600	7.8	3	2.2	3.4	2.6	714	15	30	234	122	433.9	693.3	4.978.507	8%	0.91%	41%	0.0
17	828+600	832+000	3.4	3	2.4	3.2	4.1	689	9	38	239	111	420.4	693.3	4.978.507	15%	0%		0.0
18	832+000	835+200	3.2	3	2.4	3.3	3.7	611	16	32	217	131	433.1	693.3	4.978.507	10%	0%		0.0
19	835+200	840+600	5.4	2	2.8	3.0	3.7	457	22	50	205	140	436.0	680.8	5.352.616	9%	0%	60%	0.0
20	840+600	843+500	2.9	3	3.7	2.6	4.1	172	22	50	545	266	983.2	680.8	5.352.616	8.1%	0.4513%	4%	
21	843+500	851+200	7.7	2	2.5	3.2	2.3	298	22	38	388	171	670.2	680.8	5.352.616	4%	0.0069%		0.0
22	851+200	866+600	15.4	3	2.9	3.0	4.8	494	20	49	282	146	521.6	680.8	5.352.616		1.7%	61%	0.0
23	866+600	878+600	12.0	3	3.1	2.8	3.8	1051	15	42	224	90	372.1	680.8	5.352.616		0.000%	67%	0.0
24	878+600	884+000	5.4	1	1.9	3.5	1.6	1935	15	35	131	48	210.2	680.8	5.352.616	0%	0%		0.0
25	884+000	902+700	18.7	1	2.2	3.3	1.5	1124	11	37	142	69	254.8	680.8	5.352.616	0%	0%		0.0
26	902+700	924+400	21.7	1	2.5	3.2	1.1	514	12	40	220	72	339.0	611.1	8.245.283	3.1%	0.0475%		0.0
27	924+400	925+300	0.9	3	4.5	2.2	2.6	303	13	44	685	479	1472.0	611.1	8.245.283	3%	0.0000%		0.0
28	925+300	932+100	6.8	1	2.7	3.1	1.7	428	12	35	296	105	469.6	611.1	8.245.283	0%	0.0%		0.0
29	932+100	939+800	7.5	2	3.5	2.6	2.9	351	11	35	390	114	578.0	611.1	8.245.283	0%	0.008%		0.0
30	939+800	950+900	11.3	2	3.0	2.9	4.6	335	10	35	371	124	575.7	611.1	8.245.283	1%	0%		0.0
31	950+900	956+700	5.8	2	3.4	2.7	3.8	283	10	33	471	226	843.7	611.1	8.245.283	1%	0.000%		0.0
32	956+700	974+000	17.3	1	2.9	2.9	2.1	391	11	33	352	141	584.5	611.1	8.245.283	1%	0%		0.0

Para los sectores homogéneos 4, 5 y 6, aproximadamente en 20km de recorrido, se observa que el porcentaje de Fallas Estructurales supera el 15%, categorizando a dichos tramos en mal estado, causado por una presencia importante de fisuras longitudinales y transversales. Por tal motivo se plantearon 3 alternativas técnicas de conservación para poder contrarrestar dichas fallas estructurales, mencionándose inicialmente las siguientes:

- Tratamiento de fisuras longitudinales y transversales.
- Fresado a nivel de Carpeta Asfáltica + Tratamiento Monocapa + Mezcla Asfáltica en Caliente.
- Reciclado de 15cm de espesor (Incluye Carpeta Asfáltica y Base Granular) + Mezcla Asfáltica en Caliente.

La primera alternativa fue descartada debido a que de acuerdo al Presupuesto Interno Meta, la cantidad a ejecutar para la partida "Tratamiento de Fisuras longitudinales y transversales" superaba a la cantidad contractual y por ende el Costo/Beneficio para dicha actividad no era económicamente factible.

La segunda alternativa presentaba un aumento significativo de la cantidad a ejecutar de la partida "Transporte de Material Excedente" producto del fresado de aproximadamente 20 Km de vía. Se sumó además la necesidad de contar con Depósitos de Material Excedente, para lo cual se tenía que ubicar a lo largo del corredor espacios adecuados, así como solicitar los permisos a las autoridades competentes para su funcionamiento.

La tercera alternativa resultaba muy provechosa, por el hecho de que se elegiría un reciclado en frío con cemento por lo tanto no existiría problema con la eliminación del material excedente, ya que el 100% del material reciclado sería convertido en una base tratada con cemento. El costo-beneficio de dichos trabajos resultaba inmejorable frente a las alternativas clásicas de conservación. Por lo tanto se optó por ejecutar dentro del Tramo I, entre las progresivas 721+100 – 740+600, Reciclado de pavimento en frío con cemento de 15cm + Carpeta Asfáltica de 5cm, en una cantidad 350,500.00 m².

5.5 RECURSOS A EMPLEARSE

El planeamiento interno establecido por el Equipo de dirección del proyecto “Servicio de Conservación Vial: Panamericana Sur”, determinaron el ritmo de avance y el tipo de recurso a utilizar para el Reciclado de Pavimentos en frío con Cemento. Bajo esta premisa se definen lo siguiente:

- Mano de Obra

El proceso general del reciclado de pavimentos en frío con cemento, estará a cargo de un Ingeniero de campo o supervisor responsable designado por el Jefe de Obra.

La mano de obra prevista en el presupuesto interno es la siguiente:

- Un (01) capataz.
- Dos (02) oficiales (Para verificación de material reciclado)
- Un (01) oficial para control de espesor.
- Nueve (09) peones esparcidores de cemento.
- Seis (06) peones en perfilado.
- Cuatro (04) peones vigía (Control de Tránsito)

La mano de obra real durante la ejecución de obra es la siguiente.

- Un (01) capataz.
- Un (01) oficial (Para verificación de material reciclado)
- Un (01) oficial para control de espesor.
- Nueve (09) peones esparcidores de cemento.
- Seis (06) peones en perfilado.
- Cinco (05) peones vigía (Control de tránsito)

El responsable coordina con las áreas involucradas (Administración de Obra, Taller de Equipos y Recursos Humanos) los relevos necesarios para completar las cuadrillas en los días de descanso del personal obrero, debido a que el proyecto evaluado realiza jornales atípicos de trabajo. Cabe mencionar que todo el personal involucrado en los trabajos de reciclado, están capacitados para tomar las acciones preventivas respecto a la seguridad, de acuerdo a las Plan de Seguridad, Salud y Medio Ambiente.

– Equipos

El Gerente de Proyecto y/o Jefe de Obra, solicitará al Área de Procura del proyecto el suministro de los Equipos para la ejecución de los trabajos de Reciclado en Frio con Cemento.

De acuerdo al Presupuesto Interno del Proyecto, para el reciclado de pavimentos se tiene Previsto utilizar los siguientes equipos:

- Un (01) camión volvo 15 m3.
- Un (01) camión baranda.
- Tres (03) cisterna de agua.
- Un (01) recicladora.
- Dos (02) motoniveladora.
- Cuatro (04) rodillo vibratorio.
- Un (01) camioneta rural tipo combi

Los equipos utilizados realmente durante la ejecución de los trabajos fueron:

- Un (01) camión volvo 15 m3.
- Un (01) camión baranda.
- Tres (03) cisterna de agua.
- Una (01) recicladora.
- Tres (03) motoniveladora.
- Tres (03) rodillo vibratorio.
- Un (01) camioneta rural tipo combi.

Listados en los costos indirectos del Presupuesto Interno del Proyecto, podemos mencionar algunos Equipos que son utilizados durante los trabajos de reciclado de pavimentos, tales como: Ensayos, medición e Inspección, equipos de telecomunicaciones, etc.

– Materiales

Se realizará el suministro por parte de Almacén de los principales materiales a utilizar para ejecutar los trabajos de reciclado de pavimentos:

- Cemento Portland Tipo I (Bolsa de 42.5Kg)

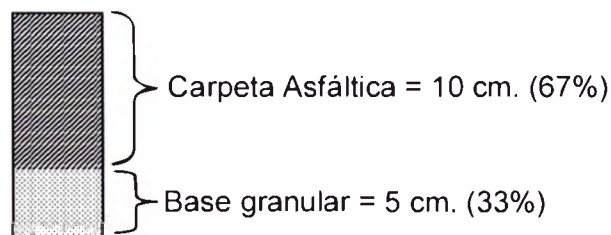
- Agua para reciclado.
- Elementos de Desgaste (Repuestos), para todos los equipos.
- Combustible – Lubricantes, para todos los equipos.

Los trabajos de reciclado de pavimentos en frío con cemento, serán ejecutados por una única cuadrilla (Mano de Obra y Equipos), mencionados anteriormente.

5.6 DISEÑO DE MEZCLA

5.6.1 Proceso de Muestreo

Para el proceso de muestreo, se realizaron calicatas con una profundidad de 30 centímetros cada 500 metros, desde la progresiva 721+100 hasta la 740+600, haciendo un total de 38 calicatas y recuperándose en promedio 25 kilogramos por cada calicata. Durante el proceso de muestreo también se determinó que la carpeta asfáltica existente representa el 67% y la base granular el 33% del espesor total a reciclar ($e=15\text{cm}$).



5.6.2 Preparación de muestras para el Diseño de Mezcla

El material muestreado de las diferentes calicatas que incluye carpeta asfáltica y parte de material granular, se mezcló para obtener una muestra combinada que sea representativa del material reciclado a profundidad total. La densidad in-situ de los componentes debe ser considerada cuando los materiales estén mezclados. Para determinar el óptimo contenido de cemento se empleará la metodología descrita en el Capítulo II del presente informe, cumpliendo así requerimientos mínimos de ensayos de granulometría, grado de compactación, resistencia a la compresión no confinada ($>2\text{ MPa}$) y resistencia a la tracción indirecta ($>200\text{ KPa}$).

De acuerdo a la metodología empleada para determinar el óptimo contenido de cemento, se realizaron 3 muestras con adición de 0.5%, 1.0% y 1.5% de

cemento (porcentaje en peso de la mezcla), verificando en dichas pruebas la granulometría obtenida, el grado de compactación, resistencia a la compresión no confinada y resistencia a la tracción indirecta (ambas con probetas Marshall de 10 centímetros de diámetro), cumplan con los requerimientos mínimos. Resultado de las pruebas se eligió el diseño más óptimo para un contenido de cemento del 1.0% en peso de la mezcla.

Determinado el óptimo contenido de cemento, cada muestra fue ensayada en granulometría (ASTM D422 "Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils"), humedad natural (ASTM D 2216 "Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water Content of Soil and Rock by Mass) y Proctor Modificado (ASTM D1557 "Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort"). Para ilustrar los ensayos de las muestras podemos observar en la Figura N°35 para las progresivas 740+100 – 740+600, los husos granulométricos recomendados por el Manual de reciclado en frío Wirtgen. Sin embargo para mayor detalle se cuenta con los registros de dichos ensayos en el Anexo N°06 "Muestreos y Diseño".

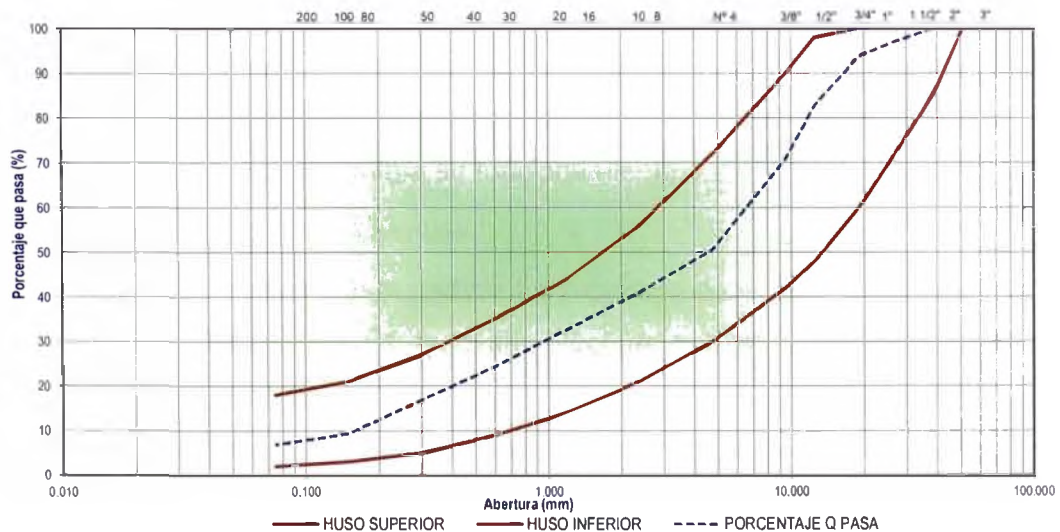


Figura N°35.- Granulometría por Tamizado Muestra Km. 740+100 – 740+600

5.7 PROCESO CONSTRUCTIVO Y ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD

5.7.1 Proceso Constructivo

El proceso constructivo del reciclado de pavimentos en frío con Cemento del proyecto "Servicio de Conservación Vial: Panamericana Sur", sigue las siguientes actividades de acuerdo a la Figura N°36.

a) Actividades Previas

Cierre de carril con divisiones intermedias colocando las señales preventivas y los dispositivos de seguridad. El personal debe contar con su uniforme e implementos de seguridad, de acuerdo a normas establecidas.

Evaluar las condiciones climáticas, de modo que sean favorables, es decir, no se permitirá la ejecución del reciclado in situ con cemento, cuando la temperatura esté por debajo de 10°C o superior a los 35°C o esté lloviendo.

En los casos del esparcido del cemento a granel, su distribución podrá interrumpirse a juicio del Ingeniero Inspector, si la velocidad del viento fuera excesiva.

Es importante disponer de los materiales y equipos necesarios para el reciclado en frío del pavimento asfáltico. Los equipos deben ser evaluados previamente a su funcionamiento.

b) Preparación de la Superficie

Limpieza inicial de la superficie La superficie debe estar limpia, exenta de partículas extrañas. Es necesario efectuar un barrido, que también puede ser con herramientas manuales.

Delimitación de la superficie a reciclar por franjas y para el esparcido de cemento. Se procede a delimitar el área a reciclar, dividiéndola en tres franjas longitudinales. Cada franja se divide transversalmente para extender el cemento según dosificación de diseño.

c) Extendido de Cemento Portland

Luego de distribuidos los sacos de cemento, según dosificación, se procede al extendido uniforme con el empleo de rastrillos, obteniendo una lámina de cemento, de un espesor lo más uniforme posible.

d) Reciclado de Pavimento

Antes de iniciar el reciclado, es importante, se revise el stock de cemento y agua, para evitar paralizaciones en la producción.

El suministro de agua se realiza desde una cisterna conectada directamente a la recicladora a través de un tiro asegurado con pines.

La recicladora deberá disgregar y mezclar uniformemente los materiales del pavimento asfáltico, sin producir segregación.

Procesados los primeros 10 metros, se detendrá el tren de reciclado (recicladora y cisterna) para controlar la profundidad del reciclado y la humedad según especificaciones. Luego continuará el proceso hasta culminar la longitud programada.

Continuarán las verificaciones de profundidad del reciclado y de haber variaciones, se notificará al operador para que aumentar o disminuir el espesor.

Una vez terminada la franja, se cerrará el tráfico hasta que el tren del reciclado retroceda al punto de partida y se repite el proceso para la segunda y tercera franja. Entre franjas debe existir un traslape mínimo de 15cm, para evitar materiales sin mezclar en las juntas longitudinales y transversales.

e) Compactación

La compactación preliminar debe realizarse inmediatamente después de mezclar los materiales del pavimento asfáltico y el cemento, para evitar pérdidas de humedad y la actividad se ejecute en cuatro (4) horas.

Luego se perfila la superficie con motoniveladora, para obtener una superficie nivelada y a continuación se realiza la compactación final con rodillos vibratorios, hasta alcanzar la densidad especificada.

La compactación longitudinal empieza por los bordes, desplazándose gradualmente hacia el centro, excepto en curvas peraltadas, donde avanzará del borde inferior al superior.

f) Curado

Cuando terminen las operaciones de perfilado y compactación y antes de transcurridas las tres horas, se procederá a la aplicación de un riego de

agua. El curado debe ejecutarse con la frecuencia requerida y durante tres (3) días como mínimo.

g) Ejecución de Juntas

Cuando el trabajo se interrumpe por más de cuatro horas, es necesario hacer juntas transversales de trabajo, las cuales se hacen, disgregando el material de la zona ya tratada, en un ancho indicado en las especificaciones técnicas.

h) Apertura al tránsito

Alcanzada la densidad especificada y efectuadas las correcciones, el tramo podrá abrirse al tránsito.

i) Calidad del Producto Terminado

Realizar las evaluaciones y ensayos correspondientes para el control de calidad del reciclado.

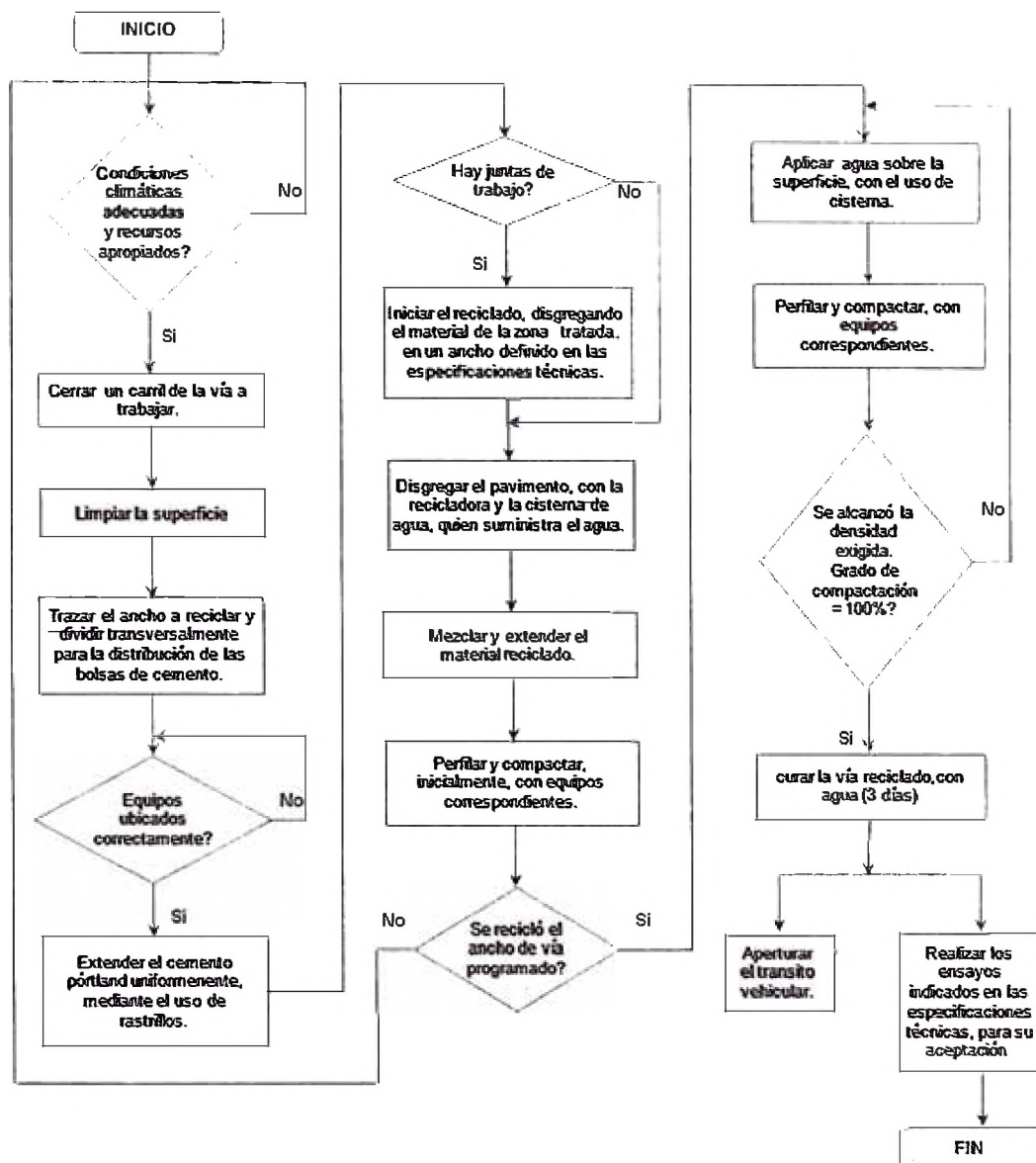


Figura N°36.- Diagrama de flujo de Reciclado de pavimentos en frío con cemento

5.7.2 Aseguramiento de la Calidad

El aseguramiento y control de la calidad durante la etapa de ejecución de los trabajos de reciclado de pavimentos en frío con cemento, se basó principalmente en lo siguiente (Ver Anexo N°07 "Control de Calidad - Tramo I"):

- Control de dosificación del contenido de cemento; el óptimo contenido de cemento (1.0% en peso de la mezcla) representa aproximadamente para 0.15m de espesor a reciclar una tasa de 3.6 kilogramos de cemento por metro cuadrado de área a reciclar (3.6 Kg/m²), a esto se agregó un

porcentaje por desperdicios de material del 5%, resultando así la tasa a controlar de 3.8 Kg/m². Aproximadamente 22 bolsas de cemento por cada 100 metros de longitud de reciclado (ancho reciclado = 2.5 metros). Además se verificó visualmente que el esparcido de cemento sea uniforme, dado que esta actividad se realiza con herramientas manuales.

- Control del Contenido de Humedad, Densidad In-situ y Grado de Compactación; el control se llevó a cabo de acuerdo a muestreos durante la ejecución de los trabajos de reciclado en frío con cemento. Las muestras fueron sometidas a ensayos para determinar el contenido de humedad (ASTM D2216), densidad in-situ de acuerdo al Método del Cono de Arena (ASTM D1556), ensayos de compactación Proctor Modificado, para luego determinar el Porcentaje o Grado de compactación (%), el cual es una relación entre la densidad campo con respecto a la Máxima densidad Proctor.

De acuerdo a las especificaciones y controles en obra del reciclado en frío con cemento definido en el Capítulo III, se ha previsto que el porcentaje de compactación sea no menor al 97%.

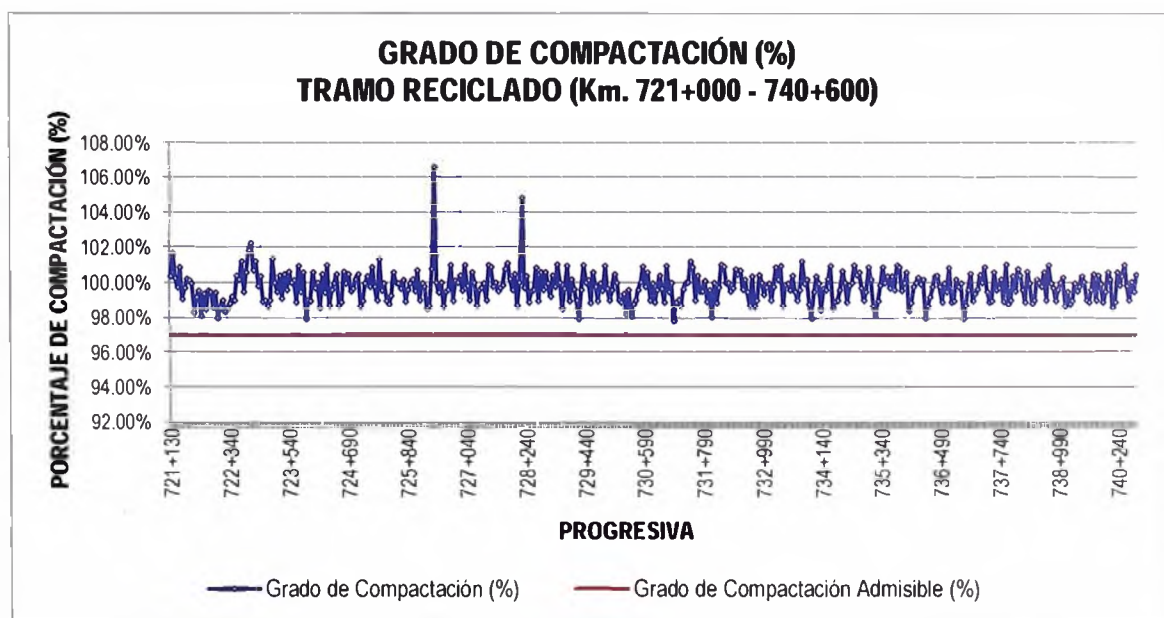
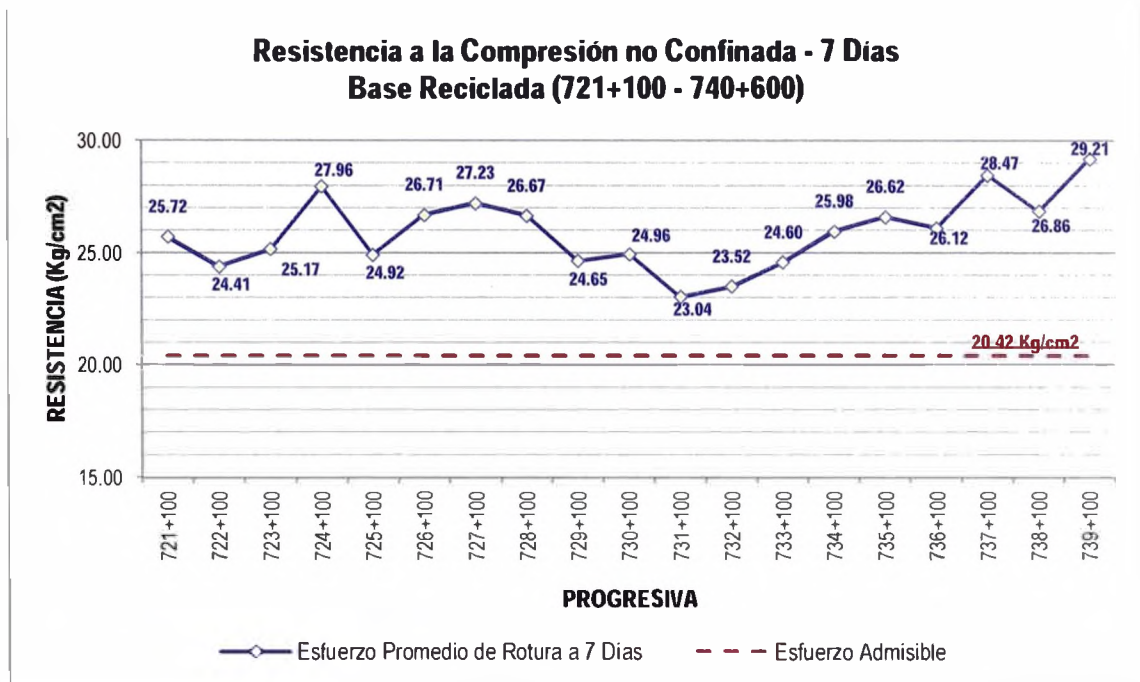


Figura N°37.- Grado de Compactación (%) - Tramo I (Km. 721+000 – 740+600)

Se verificó que el espesor reciclado, de acuerdo a mediciones topográficas, sea de 0.15m.

Adicionalmente se realizó un control y aseguramiento de la calidad después de la ejecución de los trabajos de reciclado de pavimentos en frío con cemento, verificando lo siguiente:

- Se verificó que la resistencia a compresión no confinada de probetas tipo Marshall (Diámetro=4 pulgadas) sea superior a 20.42 Kg/cm² (ASTM D2166 "Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil).



**Figura N°38.- Resistencia a la Compresión No confinada (Ensayo a 7 días) - Tramo I
(Km. 721+000 – 740+600)**

- Se verificó que la resistencia a la tracción indirecta de probetas tipo Marshall sea superior a los 2.04Kg/cm² en estado seco y superior a los 1.02Kg/cm² en estado húmedo. (ASTM D 4123 "Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures"). Ver gráficos N°39 y 40.

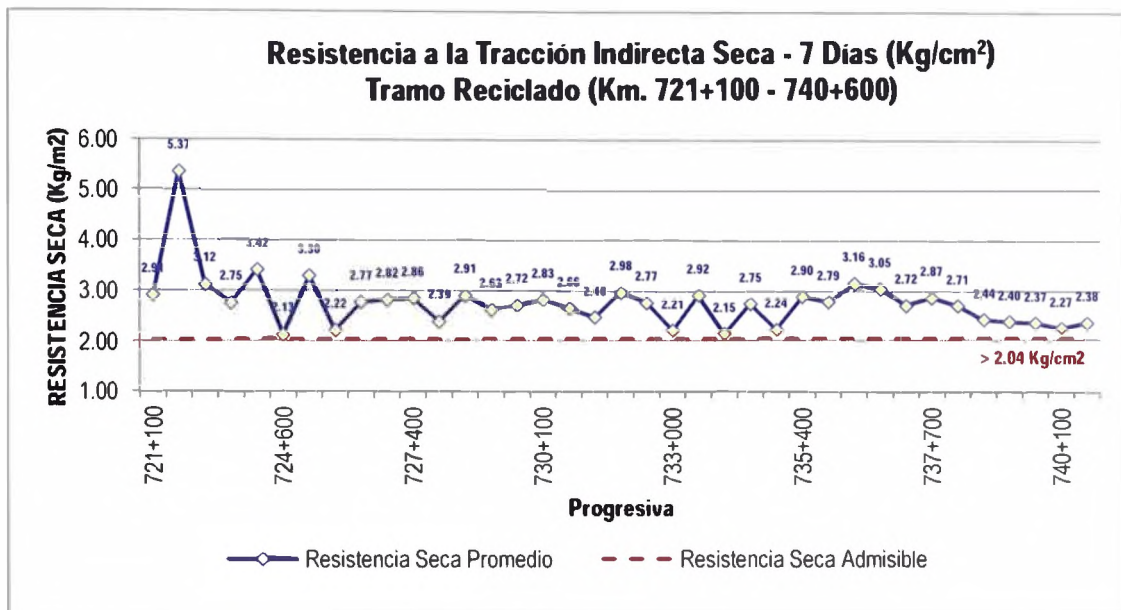


Figura N°39.- Resistencia a la Tracción Indirecta Seca (ensayo a 7 Días) – Tramo I (Km. 721+00 – 740+600)

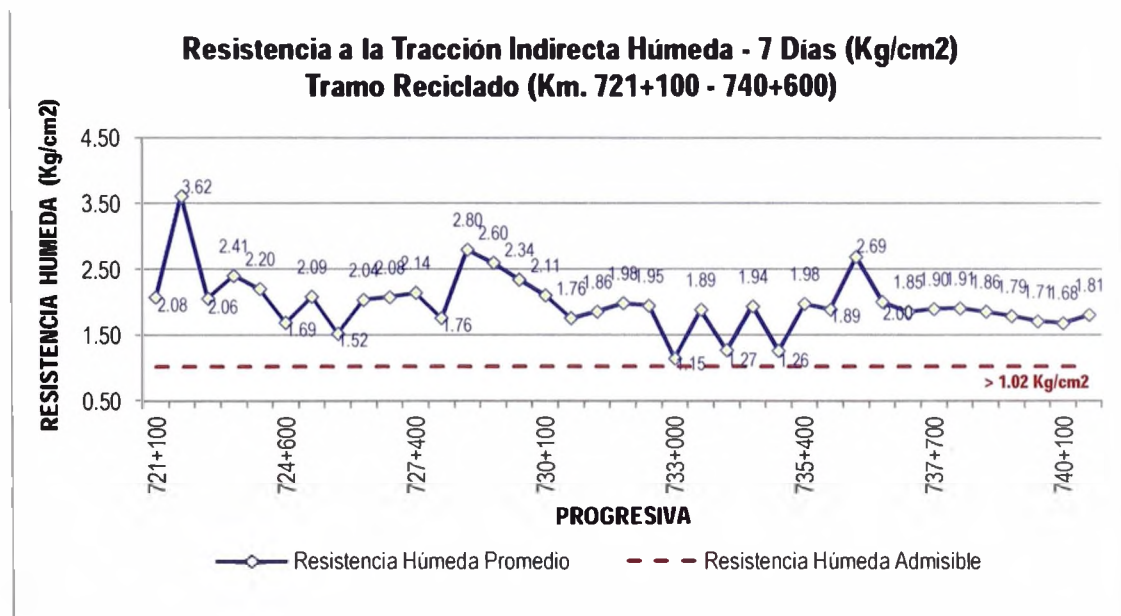


Figura N°40.- Resistencia a la Tracción Indirecta Húmeda (ensayo a 7 Días) – Tramo I (Km. 721+000 – 740+600)

- Se realizó y verificó la medición de las deflexiones con la Viga Benkelman de la base reciclada tratada con cemento sean menores que 0.8 mm.

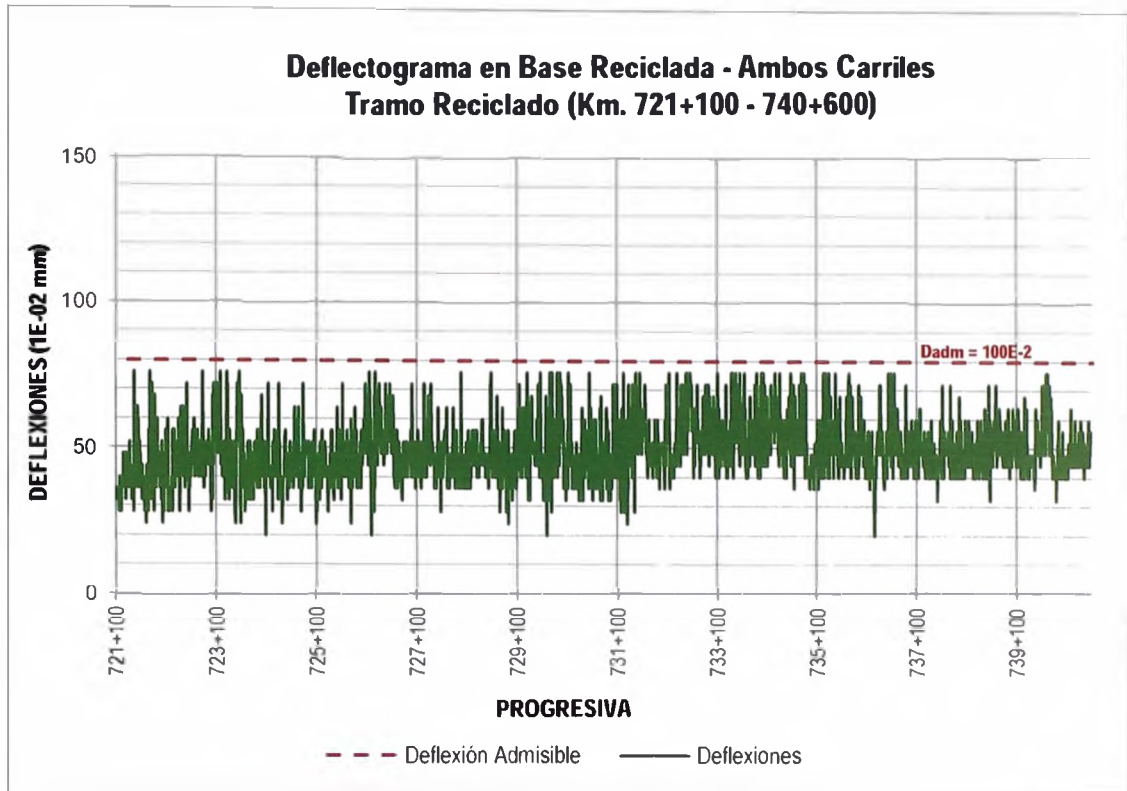


Figura N°41.- Deflectograma en Base reciclada – Ambos Carriles Tramo I (Km. 721+000 – 740+600)

5.8 ANÁLISIS DE COSTOS Y PRODUCTIVIDAD

5.6.1 Análisis de Costos

Se ha realizado el análisis de costos unitarios y de rendimientos para el reciclado de pavimentos en frío con cemento, para ello se ha tomado datos del Presupuesto Interno del proyecto (Costos Unitarios Previstos) y a su vez se ha realizado un registro de costos incurridos durante la ejecución de los trabajos (Costos Unitarios Reales), de acuerdo a las Tablas N°21 y 22. Cabe resaltar que los precios y rendimientos para la elaboración de la propuesta ganadora, fueron hechos en el año 2010 y la ejecución propiamente dicha de los trabajos de reciclado de pavimentos en frío con cemento se dieron lugar en el año 2012.

En Análisis de costo unitario de la tabla N°21 muestra que se ha previsto la utilización de Cemento portland tipo I (1.0% de contenido de cemento como porcentaje en masa) y de picas (consumibles de la máquina recicladora). En el rubro equipos se ha previsto la utilización de una máquina recicladora de ancho de corte de 2.5 metros, equipos de compactación y nivelación, equipos para la

recarga continua de agua (cisternas) y un volquete para el transporte del cemento.

Tabla N°21.- Análisis de Precio Unitario Previsto (Reciclado de Frío, Año 2010)

Partida		RECICLADO EN FRÍO (PREVISTO)					
Rendimiento	m2/DIA	4,620.00			Costo unitario directo por: m2		7.56
Código	Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio \$/.		Parcial \$/.
Mano de Obra							
0147010004	Peón	hh	15.0000	0.0325	9.10		0.30
0147010100	Oficial	hh	3.0000	0.0065	12.86		0.08
0147010101	Capataz	hh	1.0000	0.0022	18.17		0.04
0147030094	Peón Vigia	hh	4.0000	0.0087	7.45		0.06
							0.48
Materiales							
0220010003	Consumibles Picas	pza		0.0481	18.48		0.89
0220010004	Consumibles PortaPicas	pza		0.0036	173.00		0.62
0220010005	Cemento Pórtland	bls		0.0893	17.33		1.55
							3.06
Equipos							
0337010001	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		3.0000	0.48		0.01
0348120094	Camión Cisterna A/E 4000 gln NL/10 6x4	hm	3.0000	0.0065	121.12		0.79
0348120096	Rodillo Vibratorio CAT CS 533	hm	4.0000	0.0087	112.58		0.97
0348120097	Motoniveladora CAT 140 H	hm	2.0000	0.0043	191.49		0.83
0348120098	Camión Volvo (15m3)	hm	1.0000	0.0022	123.04		0.27
0348120101	Camión Baranda	hm	1.0000	0.0022	29.27		0.06
0348120099	Máquina recicladora	hm	1.0000	0.0022	472.55		1.02
0348120101	Camioneta rural tipo combi	hm	1.0000	0.0022	29.27		0.06
							4.02

Sin embargo, durante la ejecución de los trabajos y en comparación con la cantidad prevista de equipos, se redujo la utilización de los equipos de compactación. Pero debido a las constantes fallas en los equipos de perfilado se optó por tener un equipo de reserva (01 motoniveladora adicional).

Respecto de los materiales, se optimizó el uso del cemento portland tipo I, específicamente reduciendo los desperdicios durante el esparcido uniforme de este recurso sobre la vía. Todo lo contrario sucedió para los consumibles de la máquina recicladora que durante el tramo reciclado encontró material con una dureza alta, aumentando así el desgaste de las picas del rotor de la recicladora y esto unido a su alto costo por pieza (incluye su transporte y puesta en obra) marcó significativamente el precio unitario de coste real de la partida Reciclado en Frío con adición de cemento (Ver Tabla N°22).

Tabla N°22.- Análisis de Precio Unitario Real (Reciclado de Frío, Año 2012)

Partida	RECICLADO EN FRÍO (REAL)					
Rendimiento	m2/DIA	5,680.00	Costo unitario directo por : m2			6.70
Código	Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
01.00	Mano de Obra					
01.01	Peón	hh	15.0000	0.0264	9.10	0.24
01.02	Oficial	hh	2.0000	0.0035	12.86	0.05
01.03	Capataz	hh	1.0000	0.0018	18.17	0.03
01.04	Peón Vigia	hh	5.0000	0.0088	7.45	0.07
						0.38
02.00	Materiales					
02.01	Consumibles Picas	pza		0.0640	19.36	1.24
02.02	Consumibles PortaPicas	pza		0.0007	131.22	0.10
02.03	Cemento Pórtland	bls		0.0844	18.59	1.57
						2.90
03.00	Equipos					
03.01	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		3.0000	0.38	0.01
03.02	Camión Cisterna A/E 4000 gln NL/10 6x4	hm	3.0000	0.0053	121.12	0.64
03.03	Rodillo Vibratorio CAT CS 533	hm	3.0000	0.0053	112.58	0.59
03.04	Motoniveladora CAT 140 H	hm	3.0000	0.0053	191.49	1.01
03.05	Camión Volvo NL 12 6x4 15m3	hm	1.0000	0.0018	123.04	0.22
03.06	Camión Baranda	hm	1.0000	0.0018	29.27	0.05
03.07	Máquina recicladora	hm	1.0000	0.0018	472.55	0.83
03.08	Camioneta rural tipo combi	hm	1.0000	0.0018	29.27	0.05
						3.41

Utilizando la metodología del Informe semanal de producción (ISP), se registraron tanto los avances como los costos semanales del Reciclado en frío con cemento (todos los rubros), resultando así un costo unitario acumulado real de S/. 7.05/m², estos costos acumulados también incluyen las horas en Stand by de los equipos durante los periodos muertos de trabajo (de acuerdo a la Figura N°42).

Sin embargo dicho costo fue desgregado para obtener un costo unitario real por rendimientos, para poder ser comparable con el análisis de costo previsto en presupuesto interno, resultando así S/. 6.70/m², la diferencia entre los costos reales acumulados obtenidos en el Informe semanal de producción, con los obtenidos por rendimientos representa el costo real por Stand by de los equipos.

5.8.2 Análisis de Productividad

El análisis de productividad se basó en la comparación de los avances previstos de acuerdo al planeamiento interno del proyecto con los avances registrados durante la ejecución de los trabajos. Además se verificó el uso eficiente de los

recursos de acuerdo a los análisis de costo unitario de la partida “Reciclado en frío con adición de cemento” del presupuesto interno. Esta información fue comparada con la utilización real de los recursos durante la ejecución en los diferentes rubros (Mano de obra, Equipos y Materiales) de acuerdo a la Tabla N°23.

Los controles diarios de avance del Reciclado en frío con cemento muestran valores máximos de hasta 7800 m², para anchos de calzada de 6.8 – 7.0 metros, esto se traduce a que se lograron rendimientos diarios de 1 kilómetro por día. Este rendimiento diario máximo se logró manteniendo operativa a la máquina recicladora durante toda la jornada de trabajo (8 horas/día), se tuvo stock de consumibles para la recicladora (picas y portapicas) y las recargas de agua a la máquina recicladora por parte de las cisternas se mantuvo constante.

Los rendimientos obtenidos como promedio y por debajo de este se traducen en una falta de consumibles para la máquina recicladora, que se dieron lugar entre la cuarta y quinta semana de iniciados los trabajos. La problemática se sentó en que dichos consumibles son escasos en el mercado nacional, debido a que equipos para reciclado de pavimentos no son muy utilizados y más aún que la técnica del reciclado de pavimentos in-situ no es muy difundida, obligando al contratista importar dichos consumibles. Se sumó también a dicha problemática el estado de los equipos del contratista conservador, las constantes fallas mecánicas de estos se traducían en demoras del entregable final.

Sin embargo se mejoraron los rendimientos a partir de la décima semana, superando a las cantidades previstas en el programa interno de trabajo, culminando así los trabajos de reciclado en frío con cemento culminaron dentro del plazo interno y contractual.

Como parte de un análisis integrado entre tiempo y costos, se utilizó además la metodología del Valor Ganado para analizar el estado de los trabajos de reciclado en frío con cemento. Como parte del análisis se emplearon indicadores de tiempo y costo (SPI, CPI, SV y CV) que resultaron favorables para los trabajos ejecutados. De ello se traduce un margen del 6.2% con respecto al total de costo previsto para el Reciclado en frío con cemento.

Cabe indicar que se ejecutaron 0.6% más, es decir se tenía previsto ejecutar 348,484.0 m² de Reciclado en frío con cemento, sin embargo la cantidad final ejecutada llegó a 350,500 m².

En análisis de valor ganado de los trabajos de Reciclado en frío con cemento se muestran en las Figuras N°43, 44, 45 y 46.

Tabla N°23.- Rendimientos y Recursos Diarios (Previsto – Real) para el Reciclado en Frío

DESCRIPCIÓN	PREVISTO				REAL					
	PRODUCCIÓN DIARIA		UNIDAD	PROD.	PRODUCCIÓN DIARIA		UNIDAD	MÍNIMO	PROMEDIO	MÁXIMO
			m2	4,620			m2	3,315	5,680	7,810
RECURSOS	Cuadrilla (unid)	tiempo (h/día)	RENDIMIENTO		Cuadrilla (unid)	tiempo (h/día)	RENDIMIENTO			
Mano de Obra										
Trabajadores	23.0	10	HH/m2	0.0498	23.0	10	HH/m2	0.0694	0.0405	0.0294
Equipos										
Camión Cisterna A/E 4000 gln NL/10 6x4	3.0	10	HM/m2	0.0065	3.0	10	HM/m2	0.0090	0.0053	0.0038
Rodillo Vibratorio CAT CS 533	4.0	10	HM/m2	0.0087	3.0	10	HM/m2	0.0090	0.0053	0.0038
Motoniveladora CAT 140 H	2.0	10	HM/m2	0.0043	3.0	10	HM/m2	0.0090	0.0053	0.0038
Camión Volvo (15m3)	1.0	10	HM/m2	0.0022	1.0	10	HM/m2	0.0030	0.0018	0.0013
Camión Baranda	1.0	10	HM/m2	0.0022	1.0	10	HM/m2	0.0030	0.0018	0.0013
Máquina recicladora	1.0	10	HM/m2	0.0022	1.0	10	HM/m2	0.0030	0.0018	0.0013
Camioneta rural tipo combi	1.0	10	HM/m2	0.0022	1.0	10	HM/m2	0.0030	0.0018	0.0013

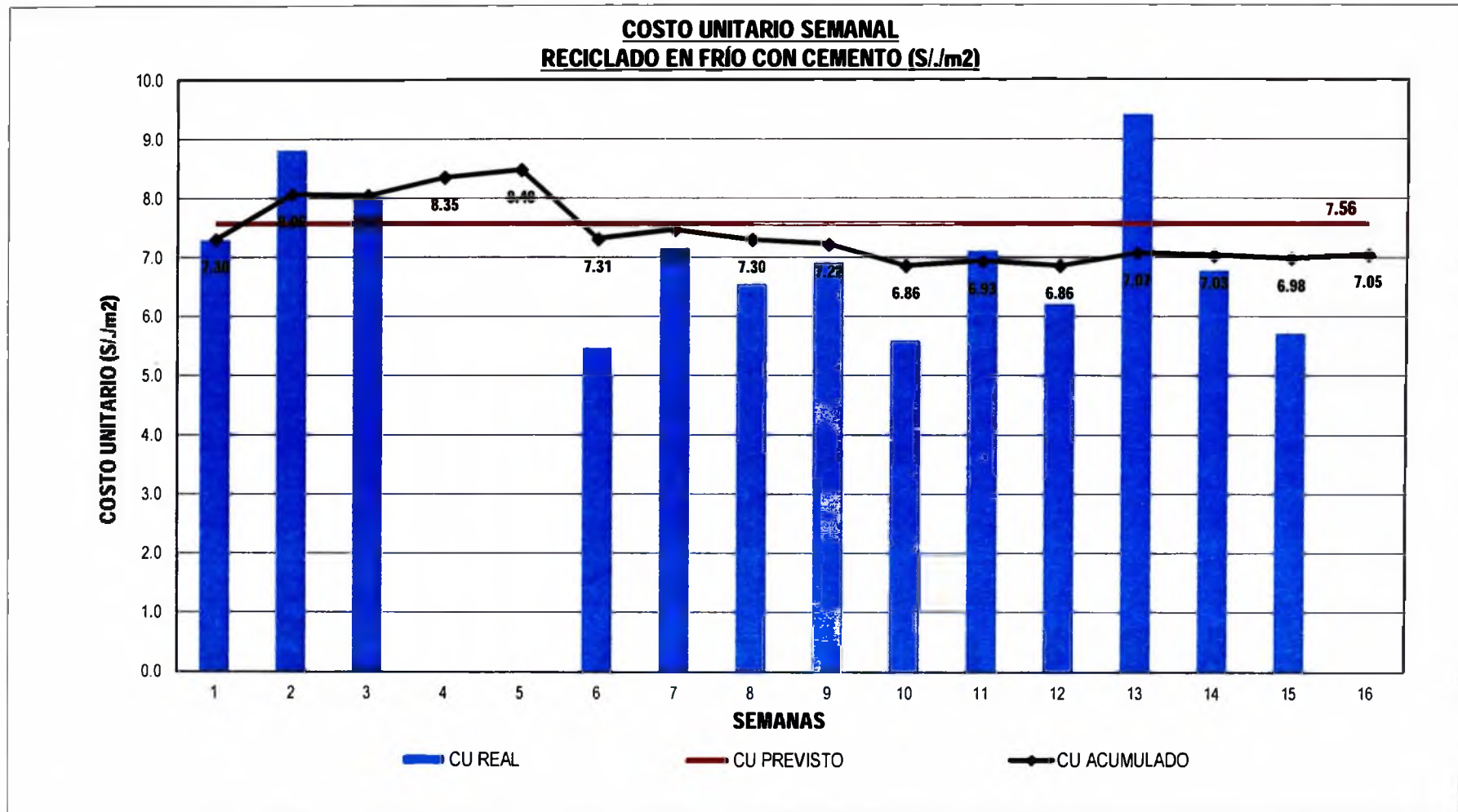


Figura N°42.- Registro de Costos Unitarios “Reciclado en frío con Cemento”

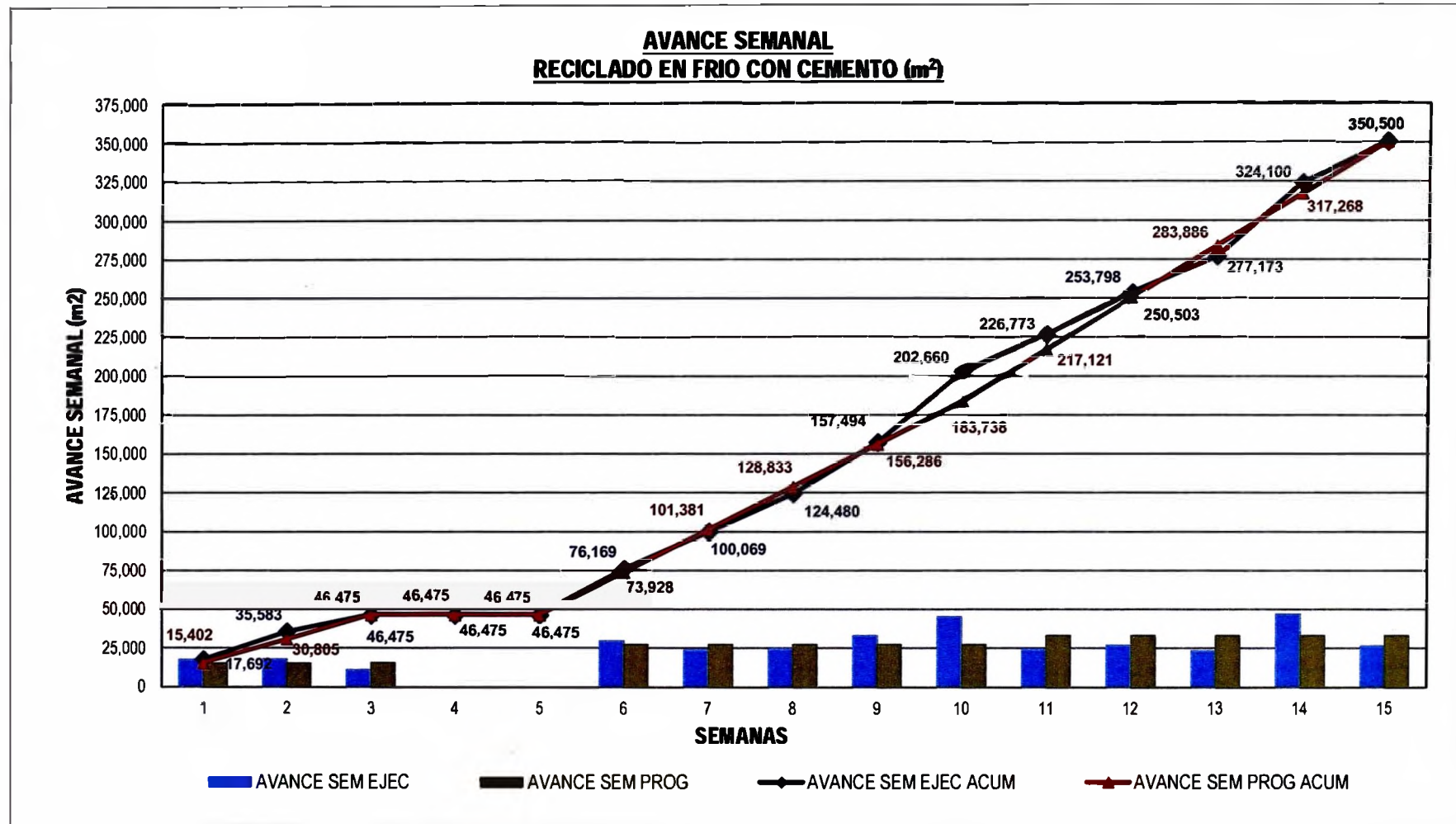


Figura N°43.- Registros de avances semanales “Reciclado en frío con cemento”

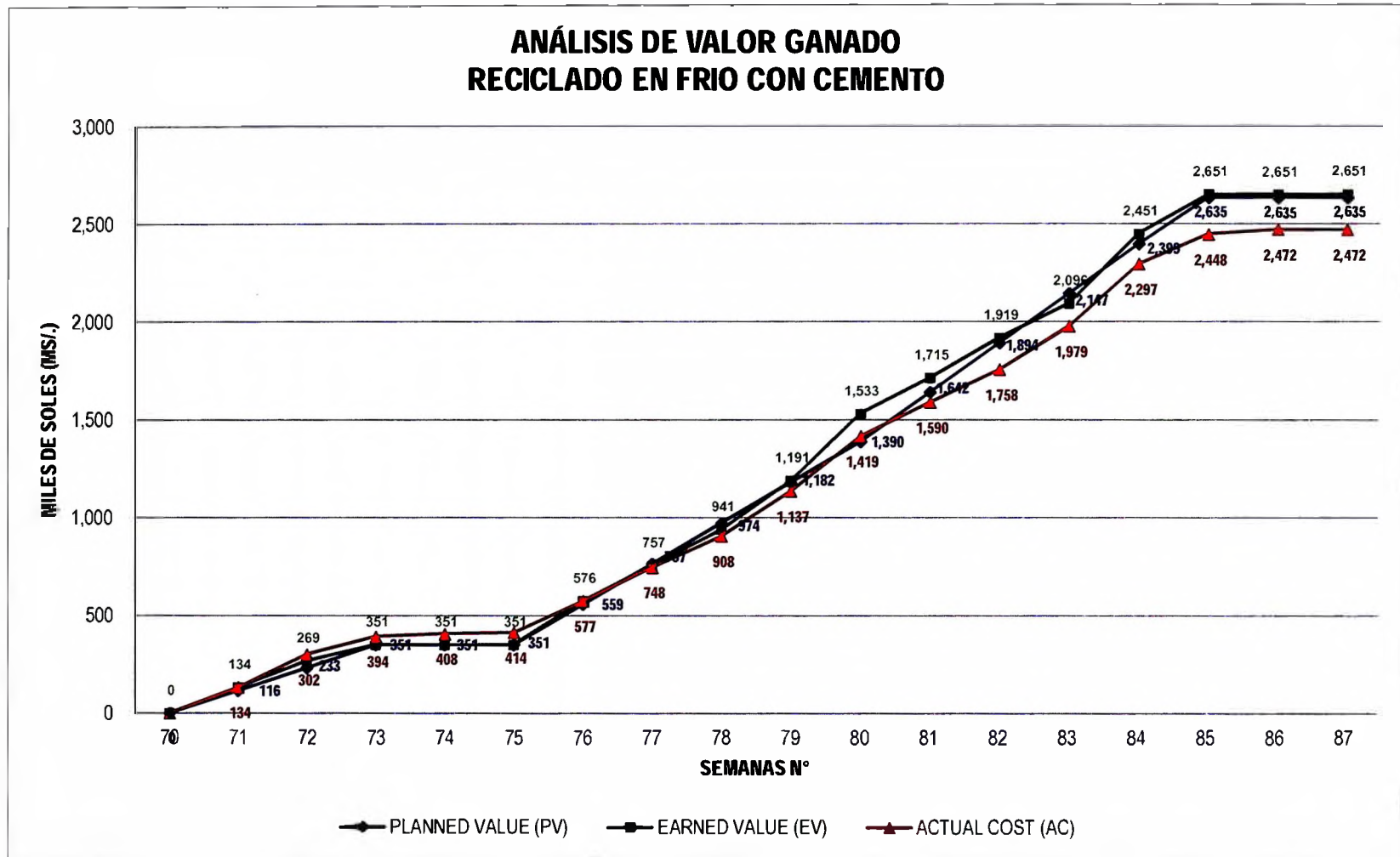


Figura N°44.- Análisis de Valor Ganado – “Reciclado en frío con cemento”

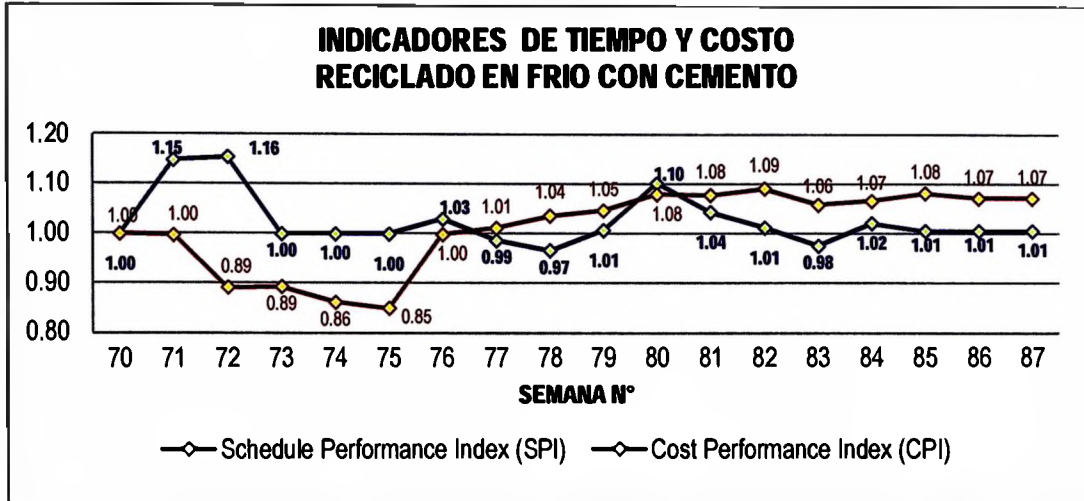


Figura N°45.- Indicadores de tiempo y costo – “Reciclado en frío con cemento”

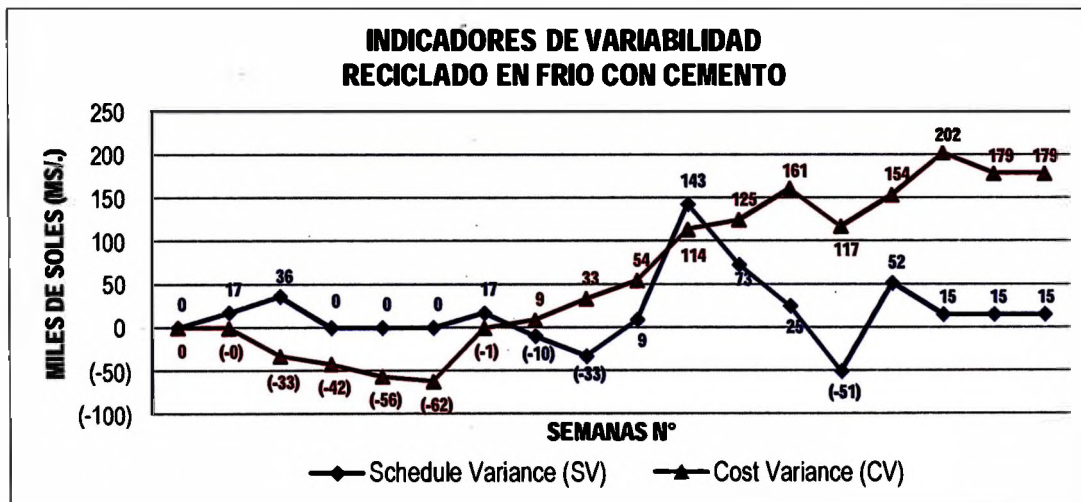


Figura N°46.- Indicadores de variabilidad de Costo y Tiempo – “Reciclado en frío con cemento”

CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- Se determinó ejecutar los trabajos de reciclado de pavimentos in-situ con adición de cemento, como parte del Plan de conservación vial del proyecto, debido a que los estudios de Evaluación superficial, funcional y estructural del Tramo I: Atico – Acc. Microondas – La Repartición, muestran para los sectores homogéneos comprendidos entre las progresivas 721+100 al 740+600, un elevado porcentaje de fallas estructurales presentes en la carpeta asfáltica entre el 17.0%-49.0%.
- De acuerdo al análisis granulométrico realizado a las muestras del material reciclado (100% RAP / Base granular), se observa que la curva se encuentra dentro de los husos granulométricos recomendados por el Manual de Reciclaje en Frío Wirtgen, por lo tanto podemos concluir que los materiales (RAP y Base granular) producto del reciclado, pueden ser utilizados para una base tratada con cemento.
- Utilizar el 1.0% de contenido de cemento (porcentaje en peso de los materiales secos) para la mezcla (67.0% Carpeta asfáltica + 33.0% Base granular), nos permitió cumplir con los requisitos mínimos de resistencia y durabilidad, para la nueva base tratada.
- Se obtuvieron Grados de compactación superiores al 97%, de acuerdo las densidades obtenidas en campo bajo ensayos in-situ por el método del Cono de Arena con respecto a las densidades del ensayo Proctor Modificado, esto garantiza una mayor resistencia de la base tratada con cemento con respecto a lo previsto en el diseño.
- Se alcanzaron resistencias a la compresión no confinada superiores a las mínimas especificadas (mayores a 20 Kg/cm²) para probetas de 100 mm de diámetro y 63.5 mm de espesor y ensayadas a 7 días, entre un mínimo de 23.04 Kg/cm² y un máximo de 29.21 Kg/cm².
- Se alcanzaron resistencias a la tracción indirecta, para probetas de 100 mm de diámetro y 63.5 mm de espesor y ensayadas a 7 días, en estado seco y húmedo, superiores a 2.04 Kg/cm² y 1.02 Kg/cm² respectivamente. Para la resistencia a la tracción en estado seco se obtuvieron valores entre 2.13 – 5.37 Kg/cm² y en estado húmedo valores entre 1.15 – 3.62 Kg/cm².

- Se verificó mediante la medición de Deflexiones con Viga Benkelman, posterior a la compactación y nivelación de la nueva base tratada, que las deflexiones obtenidas del procesamiento de la información se encuentran en el rango permitido de acuerdo a la deflexión admisible ($< 80 \times 0.01 \text{mm}$).
- De acuerdo al análisis de costos unitarios realizados para la partida de reciclado en frío con cemento, se obtuvo un costo por metro cuadrado al término de los trabajos de 7.05 nuevos soles, por debajo del costo por metro cuadrado previsto en el presupuesto interno del proyecto.
- Se verificó mediante el análisis de valor ganado, que el margen económico de la partida Reciclado en frío con cemento obtenido fue positivo alrededor del 6.2% con respecto al total presupuestado para dicho trabajo.
- De acuerdo al análisis de productividad y de medición de rendimientos se logró verificar que los trabajos de reciclado en frío con adición de cemento alcanzaron avances diarios máximos en condiciones óptimas (operacionales y logísticas) de 1.0 Kilómetro/Día, para un ancho promedio de calzada de 6.8 metros.
- Por los resultados obtenidos de mayores resistencias, durabilidad, menores costos y elevados rendimientos de ejecución, la técnica del reciclado de pavimentos en frío con cemento, podría utilizarse como una alternativa técnico – económica para el mejoramiento y rehabilitación de pavimentos existentes en nuestra Red Vial Nacional.

6.2 RECOMENDACIONES

- De acuerdo a los procedimientos constructivos y de aseguramiento de la calidad de los trabajos de reciclado de pavimentos en frío con cemento mostrados en el presente Informe de Suficiencia, recomendamos utilizarlos para un adecuado control en los Proyectos de conservación vial por niveles de servicio, donde esta técnica sea propuesta como alternativa de solución dentro del Plan de Conservación Vial.
- Se recomienda utilizar los Manuales de los proveedores de equipos de reciclado, como punto de partida y guía para la planificación, diseño y ejecución de los trabajos de reciclados in-situ con adición de cemento.

- De acuerdo a la información mostrada en el Informe de Suficiencia, los trabajos de reciclados de pavimentos en frío con adición de cemento, necesitan obligatoriamente de una evaluación superficial, funcional y estructural del pavimento existente, antes de ser propuestos como alternativa de solución en el Plan de Conservación Vial, ya que puede resultar contraproducentes en temas económicos durante la ejecución de los trabajos, afectando de esta manera los márgenes económicos previstos por la Contratista a cargo de la ejecución de los mismos.
- Se recomienda utilizar este tipo de técnica no convencional, en el mejoramiento y rehabilitación de pavimentos existentes para proyectos de Servicios de Conservación Vial, ya que los tramos y/o longitudes a conservar son en su gran mayoría superiores a los 100 Km, esto permite obtener mayores rendimientos en avance con el menor consumo de recursos (Optimización de uso de equipos, menor consumo de horas hombre durante la ejecución, consumo nulo de agregados producto del chancado y trituración en canteras).
- Se recomienda aplicar un adecuado Aseguramiento y Control de Calidad de los trabajos, durante las etapas de evaluación superficial del pavimento y de ejecución de los trabajos de reciclado. Esto nos permitirá reducir las variaciones que se puedan obtener de las muestras de la base reciclada con cemento durante los ensayos de resistencia a la Compresión no Confinada, de Tracción indirecta y de Deflectometría.

BIBLIOGRAFÍA

- CCORA M., Jubert. "Estudio comparativo del mejoramiento de la base aplicando estabilizadores: emulsión asfáltica, cal y cemento carretera Cañete tramo km. 152+000 – 158+000". Tesis para obtener el Título Profesional FIC - UNI, 2011.
- FERNANDEZ L., Vladimir C., "Reciclado en frío de pavimentos flexibles, con el uso de emulsiones asfálticas catiónicas". Tesis para obtener el Título Profesional FIC-UNI, 2012.
- Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA) ~~(2001)~~. "1^{er} Simposio Internacional sobre Estabilización de Explanadas y reciclado In Situ de Firmes con Cemento". Salamanca – España, 2001.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) ~~MTC (2007)~~. "Especificaciones Técnicas Generales para la Conservación de Carreteras", Lima – Perú, 2007.
- STANKEVICH, N., QURESHI, N. & QUEIROZ, C. "~~(2005)~~ Contratación por niveles de servicio para la conservación y mejora de los activos viales". Notas sobre el Transporte N° TN-27. Banco Mundial, Washintong, DC, 2005.
- World Road Association (PIARC), "Pavement Recycling – Guidelines For: In-place recycling with cement, In-place recycling with emulsion or foamed bitumen & Hot mix recycling in plant". Manual del Comité Técnico PIARC C7/8, Francia, 2003.
- Wirtgen, "Wirtgen Cold Recycling Technology". Provider Manual, Windhagen – Germany, Edition 2012.

ANEXOS

1. EVALUACIÓN SUPERFICIAL TRAMO I (Km 709+000 – 754+020).
2. RUGOSIDAD TRAMO I (Km 709+000 – 754+020).
3. AHUELLAMIENTOS TRAMO I (Km 709+000 – 754+020).
4. DEFLECTOMETRÍA TRAMO I (Km 709+000 – 754+020).
5. REGISTRO DE EXCAVACIONES TRAMO I (Km 709+000 – 754+020)
6. MUESTREOS Y DISEÑO TRAMO I (KM 709+000 – 754+020).
7. CONTROL DE CALIDAD TRAMO I – DEFLECTOMETRÍA POST EJECUCIÓN DE LA BASE TRATADA (KM 709+000 - 754+020).