

UNIVERSIDAD RICARDO PALMA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE TITULACIÓN POR TESIS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



**ANÁLISIS DE LA TÉCNICA DEL RECICLADO CON
ASFALTO ESPUMADO PARA LA REHABILITACIÓN DE
LA CARRETERA CONOCOCHA – HUARAZ**

TESIS
**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO CIVIL**

PRESENTADA POR:

Bach. JUNCO ALFARO, DANIEL AUGUSTO

Bach. DE LA CRUZ SANCHEZ, CRISTIAN MIGUEL

Asesor: MSc. Ing. HUAMÁN GUERRERO, NÉSTOR W

LIMA – PERÚ

2021

DEDICATORIA

A mi madre Rosa, a mi padre que en paz descansa Augusto por el apoyo que me brindaron durante toda la carrera y en general a toda mi familia que me motivo a seguir adelante.

Daniel Augusto Junco Alfaro

A mis padres, por ser el apoyo para seguir adelante a pesar de las dificultades que pudieran presentarse, a mi abuelo que en paz descansa que me brindó su apoyo siempre y a toda mi familia por su confianza.

De la Cruz Sánchez Cristian Miguel

AGRADECIMIENTO

Nuestro sincero agradecimiento a nuestra alma mater, por darnos la oportunidad de desarrollarnos profesionalmente.

Al MSc. Ing. Néstor Huamán por el constante asesoramiento y amplio conocimiento brindado; y a todas las personas que influyeron en el desarrollo de la tesis, entre ellos familiares y compañeros.

Daniel Junco y Cristian De la Cruz

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	xi
ABSTRACT.....	xii
INTRODUCCIÓN	xiii
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
1.1 Descripción y Formulación del Problema General y Específico	15
1.1.1 Problema general	15
1.1.2 Problemas específicos.....	15
1.2 Objetivo General y Específico	16
1.2.1 Objetivo general.....	16
1.2.2 Objetivos específicos	16
1.3 Limitaciones	16
1.4 Justificación e importancia	16
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	18
2.1 Antecedentes del Estudio de Investigación	18
2.1.1 Ámbito internacional	18
2.1.2 Ámbito nacional.....	19
2.2 Bases teóricas.....	21
2.2.1 Pavimento	21
2.2.1.1 Tipos de pavimentos.....	22
2.2.1.2 Elementos estructurales que conforman un pavimento.....	23
2.2.1.3 Mezclas Asfálticas para el Pavimento.....	24
2.2.1.4 Factores de Deterioro del Pavimento	26
2.2.1.5 Ciclo de Vida del Pavimento.....	26
2.2.1.6 Fallas en el Pavimento.....	27
2.2.1.7 Tipos de mantenimiento vial	37
2.2.1.8 Actividades de Rehabilitación y Mantenimiento	39
2.2.2 Pavimento Asfáltico Reciclado (RAP)	39
2.2.2.1 Reciclaje en Caliente.....	41
2.2.2.2 Reciclaje en Frío.....	43
2.2.3 Asfalto Espumado.....	50
2.2.3.1 Fundamentos del Asfalto Espumado.....	50

2.2.3.2 Propiedades físicas	56
2.2.3.3 Propiedades Empíricas	57
2.2.3.4 Índice de Espumación	61
2.2.4 Diseño de Mezclas	66
2.2.4.1 Caracterización de los materiales	66
2.2.4.2 Diseño de Mezclas con Asfalto Espumado	68
2.2.5 Diseño Estructural	71
2.2.5.1 Método AASTHO 93 en el Diseño de Pavimentos Flexibles	71
2.3 Estudios Previos de la Carretera a Estudiar	83
2.3.1 Ubicación:	83
2.3.2 Coordenadas y altitud:	83
2.3.3 Condiciones climáticas:	83
2.3.4 Clasificación de la vía:	84
2.4 Definición de términos básicos	84
2.4.1 Reciclado de Pavimentos	84
2.4.2 Asfalto Espumado	84
2.4.3 Medio Ambiente	85
CAPÍTULO IV: SISTEMA DE HIPÓTESIS	86
4.1 Hipótesis	86
4.1.1 Hipótesis general	86
4.1.2 Hipótesis específicas	86
4.2 Variable	86
4.2.1 Definición conceptual de las variables	86
4.2.2 Operacionalización de las variables	86
CAPÍTULO V: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACION.....	88
5.1 Enfoque	88
5.2 Tipo, método y diseño de la investigación	88
5.2.1 Tipo	88
5.2.2 Método de investigación	88
5.2.3 Diseño de la investigación	89
5.3 Población de estudio	89
5.4 Diseño muestral	89
5.5 Relación entre variables	90

5.6 Técnicas e instrumentos de recolección de datos	90
5.6.1 Tipos de técnicas e instrumentos	90
5.6.2 Criterios de validez y confiabilidad de los instrumentos	90
5.7 Procedimiento de la recolección de datos	90
5.8 Técnicas para el procesamiento y el análisis de datos	90
CAPÍTULO VI: PRESENTACION Y ANALISIS DE RESULTADOS DE LA	
INVESTIGACION	91
5.1 Análisis de Resultados de la Investigación	91
5.1.1 Determinación del Índice de Condición de Pavimento	91
5.1.1.1 Procedimiento de Evaluación de la Condición del Pavimento	92
5.1.1.2 Calculo del PCI de las unidades de muestreo para inspección	93
5.1.1.3 Clasificación de la Condición del Pavimento	95
5.1.2 Ventajas Técnicas de la Aplicación	98
5.1.2.1 Diseño de Mezclas	98
5.1.2.2 Diseño Estructural	118
5.1.3 Ventajas Ecológicas de la Aplicación	121
5.1.3.1 Explotación de Canteras	121
5.1.3.2 Generación de Residuos Solidos	122
5.1.3.3 Consumo de Agua	124
5.1.3.4 Consumo de Combustible	126
5.1.4 Ventajas Económicas de la Aplicación	130
5.1.4.1 Insumos de Mano de Obra	130
5.1.4.2 Insumo de Materiales de Obra	132
5.2 Contrastación de Hipótesis	132
5.2.1 Contrastación de hipótesis específicas	132
5.2.2 Contrastación de hipótesis general	133
CONCLUSIONES	135
RECOMENDACIONES	137
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	138
ANEXOS.....	142
Anexo 1: Matriz de Consistencia	143
Anexo 2: Operacionalización de Variables	144

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N°1: Esquema del sistema estructural de un pavimento flexible	22
Figura N°2: Esquema del sistema estructural de un pavimento rígido	23
Figura N°3: Fallos en la construcción de pavimentos.....	29
Figura N°4: Fallos en la construcción de pavimentos.....	29
Figura N°5: Exudaciones en pavimentos asfálticos	30
Figura N°6: Segregaciones en pavimentos asfálticos	32
Figura N°7: Agrietamientos y fisuras en pavimentos asfálticos	34
Figura N°8: Deformación plástica 1 en pavimentos asfálticos.....	36
Figura N°9: Deformación plástica 2 en pavimentos asfálticos.....	36
Figura N°10: Equipo utilizado para reciclado en frío “in situ”	50
Figura N°11: Cámara de expansión	51
Figura N°12: Esquema conceptual de microestructura.....	52
Figura N°13: Esquema conceptual del proceso de curado del asfalto espumado.....	54
Figura N°14: Probeta de Asfalto Espumado	55
Figura N°15: Esquema del Asfalto Espumado	55
Figura N°16: Proceso de expansión de la burbuja del Asfalto Espumado	57
Figura N°17: Representación del aumento de volumen por la espumación del Asfalto	58
Figura N°18: Características del Asfalto Espumado	59
Figura N°19: Relación entre propiedades del Asfalto Espumado	60
Figura N°20: Relación entre la viscosidad y la relación de expansión de espuma.....	62
Figura N°21: Ciclo de vida del asfalto espumado	63
Figura N°22: Relación entre la razón de expansión real (ERa) y la razón expansión máxima medida (ERm) con la vida media.....	63
Figura N°23: Índice de espumación ($IE=A1+A2$) para la caracterización de la espumabilidad	64
Figura N°24: Evolución AASHTO en el cálculo de SNr	78
Figura N°25: Coeficiente estructural de capa para el concreto asfáltico	80
Figura N°26: Coeficiente estructural de capa para la base granular	81
Figura N°27: Coeficiente estructural de capa para la subbase granular	81
Figura N°28: Levantamiento de fallas 1 en la carpeta de rodadura.....	93
Figura N°29: Levantamiento de fallas 2 en la carpeta de rodadura.....	93

Figura N°30: Ajuste del número de valores deducidos “m”	95
Figura N°31: Gráfico 0+000 – 20+000 (Carretera Conococha - Yanacancha)	96
Figura N°32: Gráfico 20+000-40+000 (Carretera Conococha - Yanacancha)	96
Figura N°33: Gráfico 40+000-60+000 (Carretera Conococha - Yanacancha)	97
Figura N°34: Gráfico 60+000-80+000 (Carretera Conococha - Yanacancha)	97
Figura N°35: Gráfico 80+000-100+000 (Carretera Conococha - Yanacancha)	97
Figura N°36: Gráfico 100+000-120+000 (Carretera Conococha - Yanacancha)	98
Figura N°37: Clasificación de la base granular	99
Figura N°38: Determinación de índice de espumación	103
Figura N°39: Determinación del óptimo contenido de agua de espumación para T=160°C	104
Figura N°40: Planificación del proceso constructivo	109
Figura N°41: Delimitación de cortes y traslapas en carpeta asfálticas	110
Figura N°42: (1) Colocación, (2) Esparcido (3) Compactación y (4) Perfilado final de material adicionado para la base granular	111
Figura N°43: Equipos para aplicación de la tecnología	113
Figura N°44: Picas, tablero de presión y distribución de boquillas en la recicladora ..	113
Figura N°45: Compactación primaria	114

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N°1: Fallas tratadas con esta tecnología.	43
Tabla N°2: Límites mínimos en las características del Asfalto Espumado	60
Tabla N°3: Facilidad del AE para dispersarse (capacidad de mezclado)	65
Tabla N°4: Valores mínimos para la vida media, en segundos, y la tasa de expansión, en relación volumen original, para AE.	66
Tabla N°5 Recomendaciones para la incorporación de cemento a la mezcla con Asfalto Espumado.....	69
Tabla N°6: Periodos Típicos de Diseño.....	72
Tabla N°7: Factor de distribución por carril DL.....	73
Tabla N°8: Número de ejes equivalentes de 8.2 ton.....	73
Tabla N°9: Niveles sugeridos de confiabilidad	74
Tabla N°10: Desviación standard del error combinado en la (Zr).....	74
Tabla N°11: Coeficiente de drenaje de bases y sub base granulares	77
Tabla N°12: Coeficiente de drenaje de bases y sub base granulares	82
Tabla N°13: Coeficiente de drenaje de bases y sub base granulares	82
Tabla N°14: Coordenadas de la carretera Conococha - Huaraz	83
Tabla N°15: Operacionalización de Variables.....	87
Tabla N°16: Rangos de calificación del PCI	91
Tabla N°17: Formato de Relevamiento de Fallas	92
Tabla N°18: Proporciones de aporte de materiales para diseños de mezcla $e=0.175$... 100	100
Tabla N°19: Proporciones de aporte de materiales para diseños de mezcla $e=0.20$ 100	100
Tabla N°20: Flujo de agua inyectada.....	102
Tabla N°21: Flujo de agua inyectada (lt/h) para el equipo calibrado	102
Tabla N°22: Resumen de ensayos de espumación, razón de expansión y vida media 103	103
Tabla N°23: Resumen de condiciones óptimas de espumación para la carretera Conococha - Huaraz.....	104
Tabla N°24: Tiempo de flujo de asfalto (s)	106
Tabla N°25: Resumen de datos necesarios para el diseño.....	107
Tabla N°26: Resumen de resistencia a la tracción indirecta obtenidos de los diseños de mezcla	107
Tabla N°27: Valores para cálculo de ratios de gasto por metro lineal de carretera.....	111

Tabla N°28: Área esparcida y esparcimiento longitudinal	112
Tabla N°29: Avance porcentual de reciclado para el tramo Conococha- Catac.....	115
Tabla N°30: Avance porcentual de reciclado para el tramo Catac- Huaraz	116
Tabla N°31: Estadística de tracción indirecta en base reciclada tramo Conococha Huaraz	118
Tabla N°32: Resumen 1 de diseño estructural para RPTAE, tramo Conococha- Catac	119
Tabla N°33: Resumen 2 de diseño estructural para RPTAE, tramo Conococha- Catac	120
Tabla N°34: Cantidad de material para base granular a utilizar	121
Tabla N°35: Cantidad de material a eliminar	122
Tabla N°36: Generación de residuos sólidos del reciclado in-situ con asfalto espumado	122
Tabla N°37: Generación de residuos sólidos del recapeo asfáltico	122
Tabla N°38: Comparación de la cantidad de residuos sólidos generales	123
Tabla N°39: Propiedades químicas del agua del Río Santa.....	124
Tabla N°40: Cantidad de agua empleada en el reciclado in-situ con asfalto espumado	124
Tabla N°41: Cantidad de agua empleada en la sobrecapa asfáltica.....	125
Tabla N°42: Comparación del consumo de agua para cada método de rehabilitación.	125
Tabla N°43: Consumo promedio de combustible por hora máquina	126
Tabla N°44: Cantidad de horas máquina y combustible en el reciclado espumado in-situ	127
Tabla N°45: Cantidad de horas máquina y combustible empleado en la sobrecapa asfáltica	128
Tabla N°46: Consumo de horas máquina y de combustible.....	129
Tabla N°47: Exceso en el consumo de recursos del recapeo sobre el reciclado in-situ	129
Tabla N°48: Incidencia del transporte en el consumo de combustible.....	130
Tabla N°49: Cuadro A.P.U. Base Reciclada (RAP) E=150mm	131
Tabla N°50: Cuadro Consumo de Insumos y Costo Total Mano de Obra - Técnica RPAE	131
Tabla N°51: Insumos de materiales de obra para reciclado con asfalto espumado	132

RESUMEN

La presente investigación, tiene como finalidad hacer el análisis económico, ambiental y técnico de un pavimento realizado con reciclado de asfalto espumado usando como tesis de referencia el proyecto realizado en Conococha – Huaraz ya que fue uno de los primeros pavimentos reciclado con esta tecnología. El análisis consta de una parte económica haciéndonos saber cuánto es el gasto tanto como ensayos, gabinete y campo realizado para nuestra investigación, consta de una parte ecológica ya que al ser un reciclado los materiales se reutilizaran al máximo y por ende no se explotaran canteras y por ultimo un diseño de mezcla y paquete estructural ya que al ser pavimento reciclado espumado tiene un diseño adicional ya que nuestro tipo de reciclado trabaja con agua y aire a una cierta presión. Como objetivo general de esta tesis es el diseño de mezcla especial que tiene un reciclado de asfalto espumado. El tramo a tratar es el de Conococha – Catac ubicado en Huaraz con un tramo aproximado de 45 km haciéndose las investigaciones necesarias como es el Análisis del índice de pavimento (PCI) para tener como solución un reciclado.

Al finalizar nuestro trabajo se llegó a la conclusión que este tipo de reciclado es mucho más provechoso que las técnicas convencionales generando un menor costo global y menos impacto ambiental.

Este sistema de reciclado tiene como principal beneficio la rapidez de ejecución de obra ya que el trabajo se hace in-situ, entonces tiene un menor tiempo de paralización de vías, siendo lo menos molesto para el tránsito.

ABSTRACT

The purpose of this research is to carry out the economic, environmental and technical analysis of a pavement made with recycled foamed asphalt using as a reference thesis the project carried out in Conococha - Huaraz since it was one of the first pavement recycled with this technology. The analysis consists of an economic part letting us know how much is the expense as much as tests, cabinet and field carried out for our research, it consists of an ecological part since being recycled the materials will be reused to the maximum and therefore quarries and quarries will not be exploited. Finally, a mix design and structural package, since it is foamed recycled pavement, it has an additional design since our type of recycling works with water and air at a certain pressure. The general objective of this thesis is the special mix design that has a recycled foamed asphalt. The section to be treated is that of Conococha - Catac located in Huaraz with an approximate section of 45 km, carrying out the necessary investigations such as the Pavement Index Analysis (PCI) to have a recycling solution as a solution.

At the end of our work, it was concluded that this type of recycling is much more profitable than conventional techniques, generating a lower overall cost and less environmental impact.

The main benefit of this recycling system is the speed of execution of the work since the work is done in-situ, so it has a shorter stoppage time, being the least annoying for traffic.

INTRODUCCIÓN

Los trabajos de mantenimiento periódico son realizados generalmente en el primer año de intervención en los proyectos de infraestructura vial tienen una amplia gama de opciones como alternativas que van desde los sistemas tradicionales hasta las más modernas, como es el caso del reciclado en frío de pavimentos asfálticos con la tecnología del asfalto espumado y es evidente que depende de los recursos económicos con los que se cuenta para realizar la intervención.

Una de las actividades que mayor cantidad de residuos genera son las técnicas convencionales, en búsqueda de alternativas para reducir este impacto ambiental han ido generándose nuevos conceptos y principios dentro de un marco denominado “sostenibilidad” cuyo principio es reducir, reciclar y reutilizar, que ha contribuido a reducir la producción y acumulación de residuos mediante tecnologías constructivas que emplean materiales reciclados.

A través del desarrollo del siguiente trabajo se presentan las definiciones de los componentes del paquete estructural y los diversos factores que causan daño al pavimento, con la descripción de la evaluación del pavimento del corredor vial se evaluará el estado de la vía antes de colocar nuestro pavimento espumado y se podrá calcular los beneficios a futuro del mismo.

También se destaca a conocer en este trabajo los ensayos realizados que se hicieron en su momento con la finalidad de conocer los materiales y de qué tipo son para complementarlas con los materiales encontrados en canteras.

El desarrollo de la tesis conlleva a la implementación de vías con un reciclado de asfalto que permitan a las ciudades un libre tránsito. Para desarrollar este tipo de técnica se requiere un pavimento en deterioro y un mínimo de agregados adicionales, puesto que se trata de conservar el medio ambiente con el reciclado de asfalto.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción y Formulación del Problema General y Específico

En los últimos años la preocupación por la conservación del medio ambiente ha ido cambiando, siendo así que tanto en la ingeniería civil especializada en la infraestructura vial han surgido nuevas tecnologías con asfalto reciclado para proyectos de rehabilitación de carreteras.

La técnica del reciclado con asfalto espumado es una técnica que fue desarrollada en Estados Unidos a mediados de los años 60, es decir no se trata de una novedad tecnológica, conforme se iba desarrollando esta nueva técnica y se obtenían nuevos avances, a nivel internacional ya son varios proyectos que se van realizando usando esta nueva tecnología del asfalto reciclado principalmente en Europa.

En el presente trabajo de investigación se propone hacer un análisis técnico – económico y ambiental del uso y aplicación de la Técnica del reciclado con asfalto espumado en la carretera de Conocochoa-Huaraz, las cuales se encuentran en un avanzado estado de deterioro, por otro lado también se plantea evaluar la parte estructural de esta nueva técnica, ya que la carretera en mencion tiene un alto nivel de tránsito pesado durante toda época del año, acelerando así su nivel de deterioro.

1.1.1 Problema general

¿Cómo se podría hacer la rehabilitación de la carretera de Conocochoa-Huaraz usando la técnica del reciclado con asfalto espumado?

1.1.2 Problemas específicos

- a) ¿Cuál es el aporte estructural del uso de la técnica del reciclado con asfalto espumado en la carretera de Conocochoa-Huaraz?
- b) ¿En qué medida la técnica del Reciclado con asfalto espumado puede mejorar la capacidad del pavimento a las cargas proyectadas que ejerce el alto tránsito pesado de la carretera Conocochoa-Huaraz?

- c) ¿Cuáles son las ventajas ambientales tras el uso del reciclado de asfalto espumado?

1.2 Objetivo General y Específico

1.2.1 Objetivo general

Uso de la técnica del reciclado con asfalto espumado para la rehabilitación de la carretera Conococha – Huaraz.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Analizar las condiciones de la carpeta asfáltica después de la aplicación de la técnica del reciclado con asfalto espumado.
- b) Analizar las ventajas técnicas que puede tener el uso de la técnica del reciclado con asfalto espumado.
- c) Analizar las ventajas ambientales que trae consigo el uso de la técnica del reciclado con asfalto espumado.

1.3 Limitaciones

La principal limitación del presente trabajo es de no poder usar actualmente laboratorios para la realización de ensayos, es por ello que se plantea comparar ensayos de mezclas asfálticas usando la técnica del reciclado con asfalto espumado y así poder adecuarlas a nuestro trabajo.

1.4 Justificación e importancia

El presente trabajo de investigación se desarrolló con el fin de promover e impulsar el uso de la técnica del reciclado con asfalto espumado con procedimientos constructivos eficientes.

La utilización de esta técnica de reciclado de asfalto en el Perú puede generar reducción de costos en la elaboración de proyectos para la rehabilitación de carreteras

además de ser amigable con el medio ambiente, siendo así esta una buena opción al uso de las técnicas convencionales.

Para lo cual este trabajo de tesis podrá servir de referencia en la elaboración de futuros proyectos de mantenimiento de la carretera de Conococha-Huaraz.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes del Estudio de Investigación

2.1.1 Ámbito internacional

Cancinos (2013) manifestó en su estudio:

Analiza el problema que representa para las entidades encargadas de la conservación vial, los trabajos de rehabilitación de pavimentos que conforman la red vial del país. Dentro de la ingeniería vial se encuentran una amplia gama de soluciones y la estudiada en este caso es la del reciclado en frío con asfalto espumado. Esta tecnología se ha impuesto a las tradicionales por las ventajas económicas, ecológicas y técnicas.

Paniagua (2013) en su investigación:

Esta investigación de laboratorio buscó caracterizar mecánicamente las mezclas con Asfalto Espumado bajo distintos modos de carga y deformación, con el objetivo de determinar bajo qué condición mecánica el contenido de Asfalto Espumado afecta de mayor manera al desempeño de estos materiales

Robles Díaz (2009) propone:

Este trabajo nos entrega una guía para el estudio y diseño de rehabilitación de un pavimento mediante el uso de asfalto espumado. El empleo del pavimento asfáltico existente, es decir, el reciclado de éste, nos lleva a trabajar con la tecnología de reciclado en frío in-situ para el cual se desea emplear como ligante el asfalto espumado y así lograr la rehabilitación final del pavimento, reduciendo el consumo energético y costos del proyecto.

Ulloa et al. (2018) proponen:

Una condición necesaria para garantizar un buen desempeño y eficiencia de los materiales componentes de estructuras de pavimento, es contar con procedimientos de laboratorio para el diseño y evaluación

del desempeño que logren ser representativos de las condiciones reales a las que será sometido el material. Así mismo, el mejoramiento de materiales de baja calidad o subproducto de procesos de intervenciones en carreteras para ser reutilizados y reciclados, toma cada vez más auge por razones ambientales y económicas al escasear las fuentes de materiales.

Vélez (2016) describe en su trabajo de investigación:

El propósito de este proyecto es estudiar el estado del arte de esta técnica y la forma como se aplica en el país. Para cumplir con este objetivo se realizó una revisión de las guías técnicas internacionales que fijan los lineamientos de la técnica de reciclaje de pavimentos en frío con técnicas de asfalto espumado, la cual se complementó con el análisis de un caso de estudio. Se encontró que estas guías están basadas en las condiciones particulares de su contexto de origen, lo que lleva a la necesidad de realizar modificaciones a los procesos que dictan con el fin de adaptarlos a las particularidades del contexto colombiano. Con base en el análisis realizado, se proponen algunas acciones de mejora de las prácticas constructivas actuales con el fin de controlar el impacto de la variabilidad propia de esta técnica de reciclaje y la incertidumbre de las propiedades mecánicas de los materiales empleados en los pavimentos colombianos.

2.1.2 Ámbito nacional

Gonzales (2017) describe en su tesis:

Este proyecto trata fundamentalmente de comparar la mezcla de asfalto por el método tradicional con la técnica del asfalto espumado, demostrando las ventajas que tiene el uso y aplicación de esta nueva técnica, por medio de ensayos de laboratorio, costos de ejecución, y en el ámbito ambiental.

Fernández (2010) propueso:

Este proyecto se ejecutó en el marco del Mantenimiento Periódico de la Carretera Conococha – Yanacancha (120.0 Km.), ubicada en el departamento de Ancash; y consistió en el Reciclado de la vía existente, empleando por primera vez en el Perú y el mundo, la tecnología de Asfalto Espumado, sobre los 4,000 m.s.n.m. Se entiende como reciclaje a todo proceso de transformación que permite el reaprovechamiento de un residuo sólido para cumplir con su fin inicial u otros fines. En este caso se ha reutilizado el 100% de los materiales que conformaban la estructura del pavimento. Este proceso es perfectamente aplicable en cualquier carretera del país, ya que se puede emplear agentes adicionales según la región, las condiciones y propiedades del suelo existente, el tipo de tráfico y/o las características climatológicas presentes en una determinada zona geográfica. Apostar por esta innovadora técnica no sólo significó reducir el tiempo de ejecución y aminorar el costo operativo por kilómetro; sino que permitió reducir notablemente el impacto de la construcción sobre el medio ambiente, ya que, al reciclar la totalidad de los materiales existentes en la vía mediante la recuperación de sus propiedades estructurales, se evitó la sobre explotación de canteras y la generación de botaderos, práctica común en las obras de infraestructura vial. El presente informe expositivo plasma mi experiencia en el desarrollo de este proyecto desde la etapa de diseño como proyectista, pasando por el control de calidad y culminando en la faceta de contratista durante de ejecución de la obra.

Espinoza y Vildoso (2014)

En este trabajo de investigación se evalúa y compara dos proyectos en nuestro país con la tecnología de asfalto espumado, comenzando por la Oroya – Chicrin – Huanuco – Tingo Maria – Dv. Tocache que corresponde a la vía central del Perú.

Contreras (2014) realizó en su investigación:

Sostenimiento con el reciclado in-situ empleando asfalto espumado es el metodo mas beneficioso, desde los puntos de vista tecnico-economico y ecologico, en el mantenimiento periodico de pavimentos flexibles. Para sustentar esta hipotesis se baso en los datos obtenidos en tramos entre los distritos de Catac y Recuay el cual fue rehabilitado con esta tecnologia.

Ccoyllo (2019) se planteo:

Que como problema general: ¿De que manera el metodo de asfalto espumado influye en los factores de diseño de mezclas asfalticas para pavimentos flexibles en Lima?. Llegando a la conclusion de que el metodo de asfalto espumado mejora notable los factores de diseño de mezclas asfalticas para pavimentos flexibles en Lima.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Pavimento

Un pavimento puede definirse como el conjunto de capas de materiales apropiados, comprendidas entre el nivel superior de las subrasante y la superficie de rodamiento, encargadas de transmitir adecuadamente las cargas producidas por el tránsito al suelo de fundación.

Dándole un enfoque más práctico y orientado al servicio otorgado, se puede decir que un pavimento es la superestructura de la obra vial que hace posible el tránsito de vehículos cumpliendo con condiciones estructurales, funcionales y de seguridad adecuadas. A partir de ambas perspectivas, se reconoce que algunos de los requisitos que debe cumplir un pavimento con el fin de asegurar dichas condiciones son los siguientes:

- Ser resistente a la acción de cargas impuestas por el tráfico.
- Ser resistente a la acción del clima.
- Tener una superficie apropiada para el tránsito de vehículos.
- Reducir los costos de circulación de los usuarios.

2.2.1.1 Tipos de pavimentos

En la actualidad, fundamentalmente por un principio de practicidad, los pavimentos se dividen en dos tipos: rígidos y flexibles. Sin embargo, este tipo de diferenciación es hasta cierto punto materia de juicio ya que no es fácil precisar qué tan rígido puede ser un pavimento flexible o qué tan flexible puede llegar a ser un pavimento rígido. Los pavimentos rígidos son aquellos cuyo elemento estructural fundamental es una losa de concreto hidráulico de gran resistencia que descansa sobre una base granular. Por otro lado, los pavimentos flexibles son aquellos cuya capa superior está compuesta por concreto asfáltico, el cuál necesariamente descansa sobre dos capas granulares: la base y sub-base (Rico y Del Castillo, 1999).

- Pavimento flexible

Higuera (2010) menciona que se llama pavimento flexible a todo aquel que está conformado por una capa de rodadura o una capa bituminosa la cual se apoya sobre una o varias capas de gran flexibilidad, estas capas son la base y la sub base, que transmiten los esfuerzos de la parte superior hacia el terreno de fundación por medio de un mecanismo de disipación de tensiones, las cuales se van reduciendo con la profundidad. (p. 15)

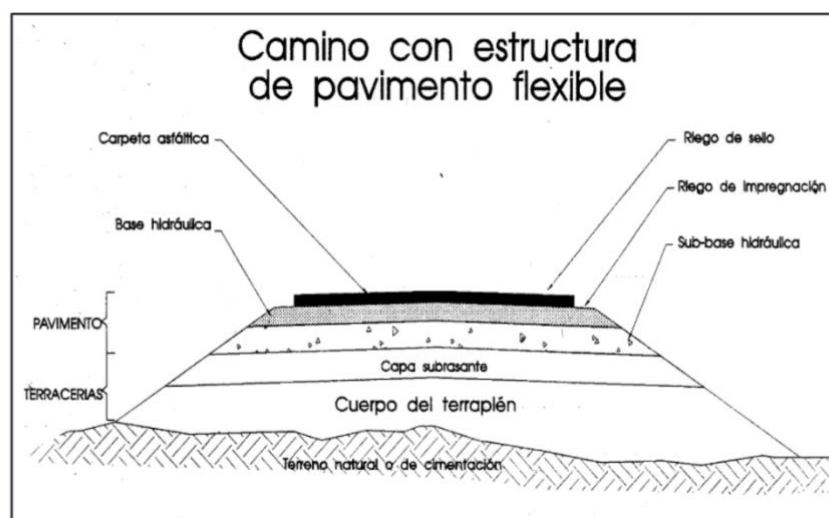


Figura N°1: Esquema del sistema estructural de un pavimento flexible
Fuente: Adaptado de Murillo (2012)

- Pavimento rígido

Higuera además señala que se llama pavimento rígido a todo aquel que está constituido por una losa de concreto hidráulico de gran rigidez la cual se apoya sobre la subrasante o sobre una capa de un material seleccionado a la cual se llama subbase del pavimento rígido.

Dado que el concreto hidráulico posee una alta rigidez, así como también un elevado módulo de Young o módulo de elasticidad, la distribución de esfuerzos se producen en un área muy extensa. (p. 17)



Figura N°2: Esquema del sistema estructural de un pavimento rígido
Fuente: Adaptado de Murillo (2012)

2.2.1.2 Elementos estructurales que conforman un pavimento

Rondón y Reyes (2015) definen a los siguientes elementos estructurales:

- Subrasante

Capa en la cual se apoya el pavimento, esta puede ser de suelo natural propiamente compactado, o puede ser elaborado con material seleccionado de relleno de buena calidad debido a los requerimientos del diseño geométrico de la vía, este material tendrá que cumplir con las normas de calidad del Ministerio de Transporte y Comunicaciones, MTC. (p. 397)

- Subbase

Aquella capa que está por encima de la subrasante y que está conformada por materiales pétreos de buena gradación, esta capa al igual que la subrasante debe de cumplir con los requisitos de calidad del Ministerio de Transporte y Comunicaciones, MTC.

Esta capa es la que está por debajo de la capa base, generalmente la subbase se construye para obtener menores espesores de la capa base y lograr una mejora en el presupuesto inicial. (p. 397)

- Base

Capa que se encuentra por debajo de la superficie de rodadura y por encima de la subbase, está compuesta por materiales pétreos de buena distribución granulométrica. Esta capa tiene como principal función estructural reducir los esfuerzos cortantes que se transmiten a las capas inferiores del pavimento, además permite el drenaje del agua atrapada dentro del cuerpo del pavimento.

- Carpeta Asfáltica

La carpeta asfáltica es aquella capa que está conformada por material pétreo cementado con asfalto y que se coloca por encima de la base. Esta capa tiene como función impedir que el agua filtre hacia las capas inferiores del pavimento, ya que el exceso de humedad reduce la capacidad portante del pavimento pudiendo así ocasionar fallas estructurales, además otra de sus funciones es resistir la acción destructora de los agentes climáticos y el deterioro ocasionado por los vehículos que transitan sobre este. (p. 397)

2.2.1.3 Mezclas Asfálticas para el Pavimento

Padilla (2014) señala:

Las mezclas asfálticas o también llamadas aglomerados, es el resultado de la combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonado; están constituidas por aproximadamente un 90 % de agregados pétreos, un 5 % de ligante asfáltico y otro 5 % de polvo mineral (filler), estas

generalmente son fabricadas en plantas de asfalto pero en algunos casos pueden fabricarse in situ.

Las mezclas asfálticas son utilizadas en las capas de rodadura o en las capas inferiores para la construcción de pavimentos, carreteras, aeropuertos, entre otros y tienen como función proporcionar una superficie de rodadura segura, cómoda y económica a los usuarios.

Según su tipología estas se pueden dividir en:

- Mezcla Asfáltica en Caliente

Se define como mezcla asfáltica en caliente a la combinación de un ligante hidrocarbonado, agregados incluyendo el polvo mineral y aditivos, de manera que todas las partículas del agregado queden recubiertas por una capa homogénea de ligante. El proceso de fabricación consiste en calentar a altas temperaturas el ligante y los agregados, enseguida esta mezcla debe ser puesta en obra a una temperatura muy superior a la ambiente.

Son empleados en la construcción de carreteras, vías urbanas, aeropuertos, entre otros, y se utilizan tanto en las capas de rodadura como para las capas inferiores de los pavimentos.

- Mezcla Asfáltica en Frio

Son las mezclas fabricadas con emulsiones asfálticas, y su principal campo de aplicación es en la construcción y en la conservación de carreteras secundarias. Para retrasar el envejecimiento de las mezclas abiertas en frío se suele recomendar el sellado por medio de lechadas asfálticas. Se caracterizan por su trabajabilidad tras la fabricación incluso durante semanas, la cual se debe a que el ligante permanece un largo periodo de tiempo con una viscosidad baja debido a que se emplean emulsiones con asfalto fluidificado: el aumento de la viscosidad es muy lento en los acopios, haciendo viable el almacenamiento, pero después de la puesta en obra en una capa de

espesor reducido, el endurecimiento es relativamente rápido en las capas ya extendidas debido a la evaporación del fluidificante. Existe un grupo de mezclas en frío, el cual se fabrica con una emulsión de rotura lenta, sin ningún tipo de fluidificante, pero es menos usual, y pueden compactarse después de haber roto la emulsión. El proceso de aumento paulatino de la resistencia se le suele llamar maduración, que consiste básicamente en la evaporación del agua procedente de la rotura de la emulsión con el consiguiente aumento de la cohesión de la mezcla. (p. 45)

2.2.1.4 Factores de Deterioro del Pavimento

Padilla (2014) menciona además que los deterioros de los pavimentos asfálticos se deben a una serie de factores como lo pueden ser el medioambiente (lluvia, gradientes de temperatura), tráfico (cargas por eje, presión de inflado de los neumáticos, intensidad), materiales inadecuados, procesos de elaboración de las mezclas inapropiados, técnicas de construcción deficientes (transporte, extensión y compactación), fórmula de trabajo deficiente. Todos estos defectos se pueden detectar una vez que se haya concluido la obra, como por ejemplo una mala textura superficial, geometría, aspecto y también estos defectos se pueden detectar en un periodo considerable de tiempo durante la vida de servicio del pavimento, los cuales son objeto de estudios y clasificaciones cada vez más rigurosas, indican la patología en general del firme. (p. 52)

2.2.1.5 Ciclo de Vida del Pavimento

Limo y Neira (2020) definen este ciclo:

Como toda obra de ingeniería, los pavimentos comienzan su deterioro en el preciso momento en el que se han terminado de construir. Rodríguez et al. (2004) reconoce tres fases a lo largo de la vida del pavimento:

- Fase de consolidación:

Es la fase inicial en la vida del pavimento. Hace referencia a la consolidación que sufre la estructura de pavimento al momento de que ellos vehículos empiezan a transitar 58 por ella. Esta fase tiende a ser relativamente rápida e inexistente cuando se ha realizado una adecuada compactación a las diversas capas del pavimento.

- Fase elástica:

Esta fase inicia inmediatamente después de que el pavimento se ha consolidado por completo. Se podría decir que es la fase más importante y la de mayor duración, ya que de esta fase depende que tan larga sea la vida útil del pavimento. Cuando un vehículo transita por el pavimento, este recibe una carga que genera hundimiento en su superficie (deflexión) tendiendo a recuperarse en el momento en el que deja de recibir la carga. En esta fase no se presentan fallas en la estructura del pavimento provocada por agentes externos al mismo, pudiendo presentarse fallas locales cuando no se han tenido en cuenta diversos factores al momento de su construcción.

- Fase de fatiga:

Es la última fase en la vida del pavimento. La constante aplicación de cargas sobre el mismo genera que pierda su propiedad elástica y el pavimento no pueda regenerarse. Una vez que esto sucede se presentan grietas longitudinales a causa de la fatiga en el pavimento que, junto con la acción del agua que penetra a las capas internas del pavimento por medio de estas grietas, provocan un deterioro gradual y constante de la vía, requiriéndose que esta tenga que ser reconstruida.

2.2.1.6 Fallas en el Pavimento

Padilla (2014) menciona los deterioros o fallos debidos solamente a formulaciones defectuosas de las mezclas asfálticas y de su puesta en obra.

- Fallos en la construcción

Durante la fase de construcción y puesta en obra de las mezclas asfálticas se pueden producir errores y fallos accidentales, como:

a) La segregación de la mezcla del pavimento, que a su vez se puede clasificar en los tipos siguientes:

- Segregación aleatoria.
- Segregación transversal.
- Segregación longitudinal, bien sea en el centro o en los lados.

b) Defectos en las mezclas difíciles de compactar.

Los dos tipos extremos de mala compactabilidad de las mezclas ocurren con las poco trabajables y con las blandas.

Las mezclas poco trabajables también llamadas agrias, tienen un esqueleto mineral con rozamiento interno muy elevado, debido al empleo de agregados cúbicos, duros y de alta textura, así como a granulometrías determinadas y a morteros rígidos. El mayor peligro, suponiendo que su comportamiento estructural sea el previsto, radica en la necesidad de que la compactación sea enérgica y contundente sin llegar a romper las partículas minerales. Una mala densidad final reduce la durabilidad notablemente.

Las mezclas blandas se caracterizan por la dificultad de compactación al responder como un material parcialmente plástico ante las pasadas de los rodillos, con fenómeno similar al colchoneo. Pueden producirse mezclas blandas por algunos de los factores siguientes:

- Uso de agregados pétreos con partículas redondeadas o pulidas tales como la arena natural.
- Falta de la cantidad adecuada de filler mineral.
- Excesiva humedad en la mezcla.



Figura N°3: Fallos en la construcción de pavimentos
Fuente: Adaptado de Diseño de Pavimentos I (2010)



Figura N°4: Fallos en la construcción de pavimentos
Fuente: Adaptado de Diseño de Pavimentos I (2010)

- Exudaciones

La exudación se caracteriza por la presencia de ligante libre o polvo mineral incorporado en la superficie del pavimento. Las superficies ricas en asfalto, especialmente en tiempo húmedo, pueden llegar a ser deslizantes si han perdido su textura. Las causas de las exudaciones son las siguientes:

- Exceso de ligante asfáltico.
- Escaso contenido de vacíos.

- Migración de los ligantes asfálticos de las capas inferiores debido a partes exudadas en las capas inferiores, dotaciones irregulares en los tratamientos de adherencia entre capas asfálticas y ligante asfáltico libre por mala adhesividad con los agregados pétreos.



Figura N°5: Exudaciones en pavimentos asfálticos
Fuente: Adaptado de Diseño de Pavimentos I (2010).

- Segregaciones

La segregación, disgregación y peladura, es la separación de las partículas minerales de la superficie del pavimento. El agregado fino, se separa de las partículas de mayor tamaño, lo que da lugar a una apariencia de capa de pavimento erosionada y rugosa. Las causas de este defecto son las siguientes:

- Esfuerzos cortantes horizontales en la superficie de rodadura, debidos a la acción de los neumáticos de los vehículos.
- Entrada de agua en el pavimento a través de los huecos de la propia mezcla. La presión hidrostática considerable creada por las sollicitaciones del tráfico puede causar la separación de las partículas minerales de la capa superficial. Este tipo de disgregación ocurre inmediatamente después de la puesta en obra de la capa asfáltica, con malas condiciones climatológicas o compactación escasa. La extensión de la disgregación puede limitarse con el tiempo.
- Emisiones y vertidos de carburantes de los vehículos con el tiempo, de forma que los disolventes actúan contaminando los ligantes asfálticos.

Las segregaciones importantes pueden crear una dificultad al tráfico. Aparte de la incomodidad para los vehículos, estos suelen producir un incremento en el mismo deterioro.

Otros factores que contribuyen a la segregación son los siguientes:

- Bajo contenido de ligante asfáltico.
- Agregados absorbentes que reducen el contenido efectivo de ligante asfáltico en la mezcla.
- Alta viscosidad del ligante asfáltico que llega a producir una mezcla frágil.
- Contaminación de ligante asfáltico como resultado de partículas de fuel que no se han quemado en la planta asfáltica.
- Sobre calentamiento en la manipulación, que haya envejecido al ligante asfáltico.
- Mala granulometría de la mezcla con insuficiencia de finos.
- Baja compactación del material que aumenta la permeabilidad, acelera el envejecimiento del ligante asfáltico y no permite la cohesión adecuada del mismo.
- Mala calidad del mortero formado por agregado fino, polvo y ligante asfáltico, que se traduce por una escasa resistencia después de sometido a la acción del agua. El mortero superficial puede desaparecer a causa de la abrasión.

La segregación en la superficie puede clasificarse en los tipos siguientes:

a) Segregación aleatoria, que tiene un origen más difícil de determinar. Sus causas pueden ser:

- No disponer de acopios uniformes.
- Vertidos en los dosificadores en frío.
- Error en la carga del árido en los dosificadores en frío.
- Demasiadas operaciones de arrancado y parada en las plantas de tambor secador.

- Diferencias notables de nivel en la mezcla almacenada en el silo.
- Operaciones irregulares en la descarga de los camiones.
- Demanda descompensada de la extendedora.

b) Segregación transversal, se pone de manifiesto con una peculiar mancha en la superficie. El grado de segregación se cuantifica por los cambios de textura y es fácilmente reconocible. Esta segregación puede ser debida a:

- Empleo del material inicial que proviene del arranque de la planta.
- Inadecuadas operaciones de carga de los camiones.
- Vaciado excesivo y mal manejo de las alas de las tolvas de las extendedoras.
- Material segregado en la tolva de carga de las plantas.
- Compuertas de la mezcladora mal cerradas.
- Almacenamiento de los dosificadores primarios al límite de su capacidad.

c) Segregación longitudinal, bien sea en el centro o en los lados, se puede producir en el centro de la banda extendida o en los bordes, y puede deberse a defectos en los husillos o a una velocidad inadecuada de la extendedora.



Figura N°6: Segregaciones en pavimentos asfálticos
Fuente: Adaptado de Padilla (2004)

- Agrietamientos y fisuras

Padilla (2014) además define a el agrietamiento y fisuración como un mecanismo habitual de fallo mecánico por fatiga de una capa de pavimento. Aparte de ello, las grietas prematuras indican un problema de diseño o de construcción de la mezcla asfáltica. Las causas son las siguientes:

- Las grietas se producen por unas tensiones mayores que la tensión de rotura de la mezcla.
- Las grietas comienzan en la zona donde la tracción por flexión es máxima y progresan bajo las cargas repetidas. Se suele formar un mapa de grietas formado por un conjunto de grietas longitudinales y transversales.
- La deformación elástica transversal se produce con las flexiones de la capa de pavimento. La grieta inicial comienza longitudinalmente al lado exterior de la huella de la rueda. Esta grieta es seguida por otra paralela en el borde interior de la huella.
- El uso del asfalto de alta viscosidad puede ocasionar que las mezclas sean menos resistentes al efecto acumulado de las flexiones.
- Los cambios extremos de temperaturas pueden causar en un pavimento cambios de volumen que producen grietas térmicas que, usualmente son transversales.
- La combinación de grietas longitudinales y de transversales, puede formar elementos o losas rectangulares independientes. Aunque la causa de este agrietamiento no sea debido a las cargas, una vez producido, las sollicitaciones del tráfico incrementarán severamente el deterioro al haber perdido las capas su continuidad física y resistente.
- También se producen grietas longitudinales en las juntas de trabajo. Ocurren cuando las juntas se compactan de forma insuficiente y/o a baja temperatura. Cuando crecen las grietas longitudinales, el agua penetra en el firme, deteriorándolo.
- Las grietas aleatorias por fatiga, se suelen formar por la fatiga de la mezcla asfáltica en alguna de las capas. Estas grietas están

relacionadas con las sollicitaciones del tráfico. Las grietas comienzan en la parte inferior de las capas donde las tensiones son más altas, formándose una o dos grietas longitudinales próximas a las huellas de las ruedas y terminan con un estado generalizado de superficie agrietada. Normalmente la fatiga es más acusada en la parte externa del carril con más tráfico, debido a las condiciones de borde.

- Las grietas generalizadas en las zonas de rodadura pueden ser causadas también por una inadecuada compactación, o mal diseño, de las capas inferiores que puede agravarse con la presencia de agua, más que por típico fenómeno de fatiga. En éste caso, en la capa inferior se refleja el asentamiento, deformación o agrietamiento causado por las malas prestaciones mecánicas.



Figura N°7: Agrietamientos y fisuras en pavimentos asfálticos
Fuente: Adaptado de Padilla (2004)

- Deformaciones plásticas

Son las variaciones permanentes del perfil superficial de la capa de mezcla asfáltica por acumulación de deformaciones permanentes y/o por desplazamiento de la masa de la misma. Son de distintos tipos:

- a) El arrollamiento se asocia normalmente a una baja estabilidad de las mezclas que se manifiesta en una deformación plástica perpendicular al eje de la vía.

b) Las roderas, que se producen transversalmente, en la huella de las ruedas de los vehículos con densificación y/o desplazamiento lateral.

Las roderas pueden describirse de la siguiente forma:

- Roderas con desplazamiento plástico, con una depresión cerca del centro de la carga aplicada y con elevaciones a cada lado de la depresión. Este tipo de rodera está causado generalmente por insuficientes huecos en la mezcla (menos del 3%). En este caso, una sobre compactación ocasiona que el ligante rellene los huecos entre las partículas. También el betún actúa como un lubricante más que como un ligante en época estival.
- Roderas por consolidación. Son unas depresiones cerca del centro de la carga aplicada sin el acompañamiento de las elevaciones laterales. Estas roderas se producen generalmente por un exceso de huecos con falta de estabilidad de la mezcla.
- Deformación mecánica. Es el resultado de un asentamiento de las capas inferiores que puede acompañarse de grietas en las capas de pavimento. Este fallo ocurre cuando la estructura del pavimento no está bien proyectada o construida.

El material puede también desplazarse por deslizamiento de las capas inferiores debido a presiones horizontales. Este desplazamiento está causado algunas veces por suciedad, contaminaciones o excesiva cantidad de ligante en el tratamiento de adherencia de la superficie inferior. El desplazamiento puede ocurrir en la unión de un pavimento rígido y un pavimento asfáltico tal como sucede en algunas losas de aproximación de los puentes. Este desplazamiento ocurre frecuentemente en las zonas de las intersecciones donde las fuerzas horizontales de los vehículos son más elevadas.

Las causas de las deformaciones plásticas son las siguientes:

- Contenido inadecuado de vacíos en las mezclas convencionales (menos del 3%).

- Excesivo contenido de vacíos (mayor del 8%) en estas mismas mezclas.
- Baja viscosidad de los ligantes asfálticos.
- Errores en el proyecto de la mezcla, ya que las propiedades del ligantes no son las mismas a la temperatura de los ensayos que a la temperatura del servicio en obra. En definitiva se dispone de un ligante más blando que el que estaba previsto.
- Contaminación del ligante asfáltico con partículas de fuel no quemado.
- Insuficiente estabilidad del material todavía caliente cuando se ha permitido el paso anticipado del tráfico.
- Excesiva consolidación bajo tráfico de las capas del firme.
- Tiempo de aplicación de la carga más prologado que el previsto Las mezclas bituminosas tienen respuestas más elásticas a las cargas de corta duración y menos elásticas a las cargas lentas. Por ésta razón, las deformaciones plásticas se presentan sobre todo en las rampas y en otras zonas de tráfico lento.



Figura N°8: Deformación plástica 1 en pavimentos asfálticos
Fuente: Adaptado de Padilla (2004)



Figura N°9: Deformación plástica 2 en pavimentos asfálticos
Fuente: Adaptado de Padilla (2004)

2.2.1.7 Tipos de mantenimiento vial

Según MOPC (2015), el mantenimiento de carreteras y vías (mantenimiento de vías terrestres) es importante porque de esta manera se asegura la vida útil esperada de las mismas, manteniendo un buen funcionamiento de la carretera. En este artículo mostramos los tipos de mantenimiento de carreteras (clasificación de mantenimiento), esperamos que sea útil.

Los tipos de mantenimiento de carreteras que se pueden realizar son los siguientes:

- Mantenimiento de rutina
- Mantenimiento preventivo
- Mantenimiento periódico
- Mantenimiento de emergencia

a) Mantenimiento de Rutina

Es lo que se realiza en el transcurso del año, la finalidad de este mantenimiento es evitar el inicio del deterioro de la carretera en cuestión.

Las actividades a realizar son las siguientes:

- Limpieza de zanjas
- Limpieza de alcantarillas
- Limpieza de deslizamientos de tierra menores
- Despeje de zanjas y zonas laterales
- Reparación de la señalización vertical
- Limpieza de las salidas de los puentes
- Limpieza de los elementos derramados en la carretera (Calzada)
- Repintado de señalización horizontal
- Relleno de baches en la vía
- Mantenimiento preventivo

- Se realiza antes de la temporada con la mayor presencia de precipitaciones.

b) Mantenimiento Preventivo

Las actividades a realizar son las siguientes:

- Limpieza de zanjas
- Limpieza de alcantarillas
- Limpieza de los pilotes del puente
- Dragado de ríos
- Limpieza de los torrentes
- Mantenimiento periódico
- Esto se hace cada 1 a 5 años, asegurando así la vida útil de la carretera.

c) Mantenimiento Periódico

Las actividades a realizar son las siguientes:

- Reconfiguración de la plataforma
- Sellado de asfalto
- Capa de refuerzo de asfalto
- Sustitución de escombros
- Perfiles y nivelación

d) Mantenimiento de Emergencia

Es la que se realiza durante la época de lluvias, ya que en este período puede haber casos de emergencia.

Las actividades a realizar son las siguientes:

- Limpieza de deslizamientos de tierra
- Sustitución de la plataforma
- Construcción de variantes
- Estabilización de taludes

2.2.1.8 Actividades de Rehabilitación y Mantenimiento

Las actividades de mantenimiento en su conjunto tienen como finalidad la protección del pavimento de los agentes medioambientales, en especial del agua. El agua ingresa a la estructura del pavimento a través de grietas presentes en su superficie, por lo que sellar estas grietas y mantener al pavimento impermeable es fundamental para evitar su deterioro.

Las actividades de mantenimiento están enfocadas a mantener la durabilidad y flexibilidad de la superficie del pavimento; sin embargo, no tratan los efectos de la fatiga producidos por las cargas del tráfico, por lo que este tipo de fallas requiere de algún tipo de rehabilitación estructural para devolver el pavimento a un estado óptimo.

2.2.2 Pavimento Asfáltico Reciclado (RAP)

MOPC (2015) define además que el pavimento de una carretera está sujeto a la acción continua del tráfico y de la meteorología. Estos dos factores, junto con el envejecimiento natural de los materiales, hacen que el firme sufra un proceso de progresivo deterioro. Este envejecimiento y deterioro del firme conlleva una disminución paulatina en los niveles de seguridad y confort del tráfico, que al sobrepasar ciertos valores hacen necesaria una operación de conservación. La conservación de la red viaria es en la actualidad un aspecto de gran importancia debido a los recursos que moviliza.

El presupuesto necesario para el mantenimiento, así como los problemas ambientales que de él se derivan, justifican la búsqueda de nuevas técnicas que permitan reducir costes y sean respetuosas con el medio. En este contexto, el reciclado de firmes, como medio de racionalizar los recursos, toma un renovado protagonismo y se convierte en una necesidad. La creciente sensibilización social acerca de la necesidad de preservar el medio ambiente ha hecho que la legislación sea hoy mucho más proteccionista que en el pasado. Esto dificulta la obtención de materias primas adecuadas, aumentando su coste y el de su transporte hasta la obra, ya que casi nunca se producen en el lugar

donde se necesitan. De igual manera, es creciente la dificultad para encontrar un vertedero para los materiales retirados del firme a precio razonable. Estos problemas son especialmente ciertos en ámbitos urbanos. El desecho de los materiales envejecidos del firme, además de provocar problemas relacionados con la adquisición de nuevas materias y con su vertido, resulta contraproducente desde el punto de vista técnico, ya que pese a estar envejecidos, conservan buena parte de sus cualidades.

El fresado y reutilización del conglomerado asfáltico comporta un gran ahorro, ya que requiere sólo de un 1% a un 3% de betún adicional, mientras que un nuevo hormigón asfáltico puede necesitar más del 6%. Este aspecto, junto con el reducido coste de transporte y la escasa energía necesaria para la producción de un firme reciclado, hacen que el ahorro energético sea importante respecto de la construcción convencional de pavimentos. El sistema de gestión de cualquier firme debe controlar sus características durante toda su vida útil. De esta manera se podrá decidir en cualquier momento la mejor opción de conservación para mantener el nivel de servicio exigido por las necesidades del usuario.

Estos sistemas pretenden ser la herramienta ideal para encontrar el momento y el procedimiento óptimo para realizar la conservación de modo que se obtenga el mejor resultado posible al menor coste para la sociedad. Incluimos en este coste social tanto el coste efectivo de la reparación como los posibles gastos externos referidos a la circulación de los vehículos, a los posibles accidentes que puedan derivar del mal estado del firme, a los tiempos de demora, etc. Las operaciones de conservación pueden ser muy frecuentes pero poco importantes o por el contrario, escasas y de mayor envergadura. Aquellas actuaciones de menor presupuesto o más espaciadas en el tiempo comportarán un mayor coste social. En cambio, una actuación más completa y costosa o más frecuente comportaría un menor coste social. Así pues, es la administración la que debe decidir aquella actuación menos costosa socialmente posible teniendo en cuenta el presupuesto que dispone. El sistema de gestión proporciona los elementos de juicio necesarios para poder decidir cuál es la mejor estrategia

para cada caso particular, considerando a la vez las necesidades y las prioridades de la red.

El sistema simula las consecuencias positivas y negativas de cada actuación posible, lo que permite una mejor planificación de la red y una mejor administración del presupuesto destinado a la conservación.

2.2.2.1 Reciclaje en Caliente

Restrepo y Stephens (2015) definen los procesos denominados en caliente, como aquellos compuestos por actividades que implican variaciones drásticas y/o considerables de temperatura. Se define como el proceso mediante el cual los materiales del pavimento asfáltico disgregado se combina con materiales pétreos nuevos, adicionando ligantes bituminosos y en casos específicos agentes rejuvenecedores que garanticen la homogenización de la mezcla y la calidad de la misma después del reproceso. (p. 33)

Según Aviles (2015), la utilización de mezclas recicladas en caliente puede llevar a ahorros económicos debido a la menor utilización de betún y de materiales nuevos, así como al ahorro producido en el vertido. No obstante, debe hacerse un balance económico de estos ahorros con los gastos relativos al proceso de fresado, el traslado, tratamiento y almacenamiento del RAP, el sobrecalentamiento de los materiales pétreos y el del ligante especial (en caso de ser utilizado), además de la amortización de los equipos necesarios. Los resultados dependerán esencialmente del precio del betún y de los materiales pétreos existentes en la zona del proyecto.

a) En planta

Aviles además indica que se entiende por reciclado de mezclas bituminosas en planta en caliente la reutilización de mezclas bituminosas retiradas de capas envejecidas mediante un tratamiento en una central de fabricación en caliente. En este tratamiento se añaden a

las mezclas antiguas otros materiales pétreos y ligante nuevos y, a veces, un agente rejuvenecedor del ligante. (p. 58)

Restrepo y Stephens (2015) mencionan como principales actividades se tiene la demolición del pavimento existente, lo cual hace necesario la utilización de martillos neumáticos que generarán grandes bloques de pavimento o una maquina fresadora que disgregue los agregados y a su vez vaya realizando el cargue en las respectivas volquetas. Una vez el RAP sea transportado a la central se procede a realizar las actividades tendientes a reutilizar el material reciclado (Machaqueo o molienda, clasificación y homogenización).

Las técnicas existentes en la actualidad se basan en la utilización de equipos que permitan el reciclado tanto en centrales continuas como discontinuas:

Técnica del calentamiento indirecto, empleada en las centrales continuas de tambor-secador-mezclador. En la parte frontal del tambor se introducen los áridos, que se secan y calientan; en medio del tambor se introduce la mezcla que se va a reciclar, y en la parte posterior del mismo se añade el betún. Los áridos actúan como una pantalla para evitar la acción directa de la llama sobre el material reciclado. La mezcla antigua se calienta por transferencia del calor de los áridos. Los materiales se van moviendo a lo largo del tambor por el giro de éste, produciéndose un flujo continuo de material durante todo el proceso. La necesidad de mantener una pantalla de áridos delante de la mezcla reciclada limita de nuevo la proporción de material reciclado en la mezcla final. En la práctica suele irse a proporciones del 10-30%. La temperatura empleada en el proceso es la usual en estas centrales (160 °C). (p. 35)

b) En vía (In Situ)

Según Aviles (2015), consiste en la conservación de pavimentos bituminosos degradados que se reutilizan directamente, con o sin aportación de materiales nuevos, mezclándolos in situ y posteriormente

extendiendo y compactando la mezcla para constituir una nueva capa de pavimento.

Generalmente la aplicación de este tipo de reciclaje de pavimentos va encaminada a corregir problemas de orden superficial, es decir, los que están derivados del envejecimiento del ligante, pérdida de textura o pulimiento de los materiales pétreos. No se busca con esta técnica mejorar la capacidad estructural del pavimento.

Se mencionó anteriormente que la aplicación de esta técnica está encaminada a mejorarlas características superficiales del pavimento, por lo tanto su campo de acción se limita a espesores inferiores a 8 cm. En el siguiente cuadro se visualiza cada uno de los síntomas y la posible solución que brinda esta técnica de reciclaje. (p. 22)

Tabla N°1: Fallas tratadas con esta tecnología.

SÍNTOMAS	SOLUCIÓN CON EL RECICLADO
Fisuras en la carpeta asfáltica	Las fisuras son eliminadas
Perdida de adherencia en el agregado pétreo	Mezclado y recubierto con ligante
Desniveles y resaltos hasta 6cm en la carpeta asfáltica	Escarificación y renivelación de la carpeta asfáltica
Perdida del drenaje superficial	El bombeo y las mezclas drenantes son reacondicionadas
Perdida de viscoelasticidad del asfalto	Restablecida por medio de rejuvenecedores
Cambio en la granulometría	La gradación es restablecida
Perdida de transitabilidad y confort	Mejora la resistencia al deslizamiento

Fuente: Adaptado de Repaving (2010)

2.2.2.2 Reciclaje en Frío

Según Restrepo y Stephens (2015), los procesos denominados en frío son aquellos compuestos por actividades que no involucran variaciones drásticas o considerables de temperatura. Esto es, que se consiguen a través de la utilización de equipos e insumos, agentes o aditivos, que se integran para reutilizar el producto asfáltico existente, con el fin de generar un nuevo material que posea unas condiciones mecánicas identificables, manejables y utilizables.

El reciclaje en frío constituye un procedimiento de construcción internacionalmente reconocido desde el punto de vista ecológico, económico y técnico, pues posee, por una parte, características de rapidez en su ejecución debido al avance tecnológico de las máquinas disponibles en la actualidad y, por otro lado, contribuye significativamente en el manejo ambiental al reducir la explotación de canteras fuentes de agregados pétreos. Además, disminuye el ítem del transporte de materiales y permite conseguir un material nuevo de características muy similares al material original, es decir, aquél que se reutiliza, permitiendo también la reducción de los costos finales del mantenimiento.

Los procedimientos para reciclar el pavimento en frío se diferencian de acuerdo con el sitio en donde se ejecuten las actividades. (p. 38)

a) En Planta

Además, Restrepo y Stephens definen que el reciclaje en frío en planta comprende todas aquellas tareas o ejercicios que se llevan a cabo en un lugar predeterminado, acopio, en donde se almacenan los residuos provenientes de pavimentos asfálticos existentes demolidos y transportados hasta el sitio donde se producirá el nuevo material reciclado. Como principales beneficios del reciclado en planta se tiene:

- Control de los materiales de entrada. El reciclado en planta permite obtener un producto final específico al mezclar distintos tipos de agregados. Dichos materiales se pueden someter a ensayos en cualquier momento siendo posible cambiar la proporción de estos en la mezcla.
- Calidad de mezclado. Es posible realizar modificaciones en la operación de mezclado continuo para variar el tiempo en que el material es retenido dentro de la cámara de mezclado, cambiando la calidad de la mezcla.
- Posibilidades de acopiar el material. Para WIRTGEN GRUOP (2004) Particularmente en los materiales tratados con asfalto

espumado, el producto obtenido puede ser almacenado y ser utilizado cuando sea requerido, y de ese modo evitar la dependencia de la producción de la mezcla y la colocación de la misma. (p. 38)

b) En Vía (In situ)

Según Del Val (1998), el reciclado en frío —in situ, es una técnica de rehabilitación de carreteras, que consiste en la reutilización de los materiales procedentes de las capas del pavimento que ya han estado en servicio: materiales que han perdido algunas de sus propiedades iniciales por el uso o envejecimiento (cohesión, textura, composición, geometría, etc), pero que mezclados homogéneamente con un nuevo ligante (emulsión bituminosa) y ciertos porcentajes de agua y aditivos (cemento o cal), tienen el potencial de ser reutilizados para integrar nuevas capas del mismo pavimento. Esta técnica es generalmente utilizada en pavimentos viejos o con avanzado deterioro.

Uno de los campos más atractivos dentro del reciclado es el que corresponde al reciclado en frío in situ, tanto en su variante con ligantes bituminosos como con conglomerantes hidráulicos. En efecto, frente a otras posibilidades de reciclado, el reciclado en frío in situ permite obtener considerables economías y minimizar el impacto ambiental.

A continuación en primer lugar, se tratarán los aspectos relacionados con el procedimiento como tal, es decir, la forma en que el proceso de reciclaje en frío in situ se ejecuta. Más adelante se detallarán las consideraciones de orden técnico, ambiental y económico que deben contemplarse antes de emprender los trabajos.

El reciclaje de pavimentos en frío, “in situ”, o en el mismo lugar, o en vía, consiste en un procedimiento que se ejecuta en varios pasos o fases a saber:

- Disgregación de los materiales del pavimento existente mediante el fresado del espesor recomendado por el diseño del tratamiento. Este

espesor puede involucrar o no las capas de material granular que subyacen las capas asfálticas, o con contenido de bitumen, superiores. La programación de este fresado inicial debe tener en cuenta el ancho efectivo de corte de la máquina y la capacidad del equipo en cuanto a profundidad de fresado. De acuerdo a Del Val (1998), en general, el ancho de los rotores de las máquinas recicladoras es de 2,44 m, pero este tipo de máquinas son mayormente utilizadas en trabajos de estabilización de suelos o de afirmados y han sido desplazadas por las perfiladoras o fresadoras. Estas últimas, poseen rotores que van desde los 0,35 m hasta los 4,20 m.

- Detección y extracción de sobre tamaños. El proceso de disgregación no alcanza, ni está concebido para ello, a triturar el agregado pétreo presente en las capas asfálticas que se están fresando. En algunos casos el espesor total fresado involucra capas de materiales granulares de construcción muy antigua que poseen granulometrías con tamaños superiores a las 2 ϕ . Este tipo de material, para el caso de interés en materiales de buenas especificaciones es inadecuado y debe retirarse para que no afecte las propiedades mecánicas del material reciclado resultante. Podrá haber situaciones en las que no se requiera retirar las partículas de sobre tamaño porque sólo interesa obtener un material de condiciones netamente granulares, sin aprovechar la cantidad de ligante residual presente en la matriz disgregada. Es una práctica generalizada utilizar el escarificador de la motoniveladora sobre la matriz suelta disgregada con el fin de que los sobre tamaños se expongan y puedan ser retirados más rápida y fácilmente.
- Adición y mezclado de agente estabilizador. Después de haber seleccionado el agente estabilizador más conveniente (de acuerdo al diseño), se procede a la adición del mismo según lo especificado en el diseño y se efectúa el mezclado hasta lograr una mezcla homogénea, si es necesario se adiciona el agua para la pre envuelta

(algunos agentes necesitan el agua para su dilución y como vehículo para su reacción química). Este proceso se ejecuta al interior de la recicladora.

- Extendido, nivelación y compactación. Una vez obtenida la mezcla homogénea se procede a realizar el extendido, teniendo en cuenta que si las características del material reciclado son similares a la de una capa de rodadura se podrá llevar a cabo mediante la utilización de una finisher, de lo contrario el equipo a utilizar será una motoniveladora. En lo que respecta a la compactación generalmente se ubica un rodillo vibro compactador adelante del compactador neumático, pues de esta manera se logra un mejor acabado en la nueva capa.
- Curado. Algunos de los agentes estabilizadores requieren de un curado especial, el cual puede lograrse con la apertura del tramo de vía al tráfico. En general se estima que el tiempo de curado está dado por el contenido de humedad en el material reciclado, cuyo valor no debe ser inferior al 7.0%.
- Colocación de la capa superficial nueva o cubrimiento del material reciclado. Por último se realiza la extensión de una capa de rodadura que bien puede ser a base de mezcla asfáltica en caliente o un tratamiento superficial, según esté contemplado en el diseño. Para la vía objeto de estudio se estimó instalar como rodadura un tratamiento superficial doble (TDS), compuesto por una primera capa de triturado tamaño máximo $\frac{3}{4}$ " y una segunda capa de triturado tamaño máximo $\frac{3}{8}$ ".

Antes de iniciar el reciclaje se debe identificar cual es el espesor de cada una de las capas del pavimento y su naturaleza, que tipo de subrasante se tiene y qué tipo de fallo se ha producido.

Además de la identificación de los materiales existentes, es muy importante que se conozcan las condiciones de trabajo. Para ello se

debe identificar con exactitud cuál es el tráfico que soporta la carretera en el momento presente y cuál es su evolución previsible (especialmente en lo que respecta a los vehículos pesados). No se debe olvidar que estos proyectos tienen un período de diseño de 5 a 10 años. El análisis de las deflexiones y las técnicas de cálculo inverso, nos aportan muchos datos para una mejor comprensión del comportamiento mecánico de las capas.

Con el objetivo de lograr identificar claramente las características del pavimento anteriormente descritas es conveniente realizar una caracterización de pavimento existente mediante el reconocimiento previo de la vía a intervenir el cual consiste en:

- Inspección visual.

Del Val (1998), afirma también que, este paso brinda la posibilidad de definir tramos homogéneos (preferiblemente inferiores a 10 km), tipos y niveles de deterioro (piel de cocodrilo, baches, exudaciones, etc) los cuales infieran directamente en la sectorización de la vía. Una vez establecidos los tramos se procede a tomar muestras que permitan identificar entre otras cosas los espesores de las capas del pavimento a reciclar, contenidos de asfalto residual y densidad de las capas. Con el fin de determinar la fórmula de trabajo a utilizar.

- Formula de trabajo.

El parámetro de aceptación de la fórmula de trabajo está dado por el ensayo de inmersión-compresión, el cual establece que el porcentaje óptimo de ligante será aquel que cumpliendo con las especificaciones dadas consiga el máximo de la resistencia a la compresión de las probetas en húmedo. Ensayos que deben ser realizados en laboratorio y dentro de la fórmula de trabajo se hará constar:

- Granulometría de material fresado.
- Porcentaje de agua de envuelta (referente al árido seco).
- Correcciones necesarias para el agregado en su caso.
- Tipo y cantidad de aditivos (cal y/o cemento) en su caso.

- Tipo de la emulsión bituminosa y porcentaje respecto al agregado seco que
 - satisfagan las especificaciones para el ensayo de inmersión – compresión.
 - Ensayo de Próctor Modificado, que se realizará sobre la mezcla del material
 - Fresado más la emulsión.
- Tramos de prueba.
- Se deben realizar tramos de prueba para cada tramo homogéneo, utilizando los equipos con los que se ejecutará el trabajo. Aprobando definitivamente la fórmula de trabajo y evaluando de paso:
- Fresado del material a tratar: Se verificarán las relaciones entre la velocidad de avance del equipo fresador y la granulometría y calidad de envuelta alcanzadas. Se fijará el número y cambio de piezas. Se verificará la profundidad de fresado estipulado en el diseño.
 - Mezclado: Se comprobará la exactitud de los sistemas de dosificación del agua, emulsión y en su caso de los aditivos y agregados correctores.
 - Compactación: La humedad óptima de compactación se fijará en este tramo de prueba y será aquella que consiguiendo una buena envuelta, optimice la compactación, teniendo como punto de partida la humedad determinada mediante el ensayo de Próctor modificado.
 - Acabado de la superficie: Se observará el aspecto de forma tal que cumpla con las condiciones de regularidad indicadas en las especificaciones.
 - Juntas: Se determina los aspectos y perfiles del solape de las juntas transversales y longitudinales.
 - Tiempos de curado: Se decidirán los plazos de apertura al tráfico de la capa reciclada y el de su tapado con una capa superior.

En lo que concierne al equipo a utilizar para llevar a cabo la actividad del reciclaje de pavimentos en frío —in situ‖ La técnica actual aboga por separar las funciones en diferentes elementos. Una tolva de aditivo,

una fresadora que frese marcha atrás y que arrastre un remolque sobre el que deposita el material. Este remolque criba, desmenuza, pesa y mezcla. Además de un recogedor de cordón, una extendedora y un equipo compactador (Fumadó, 2015).

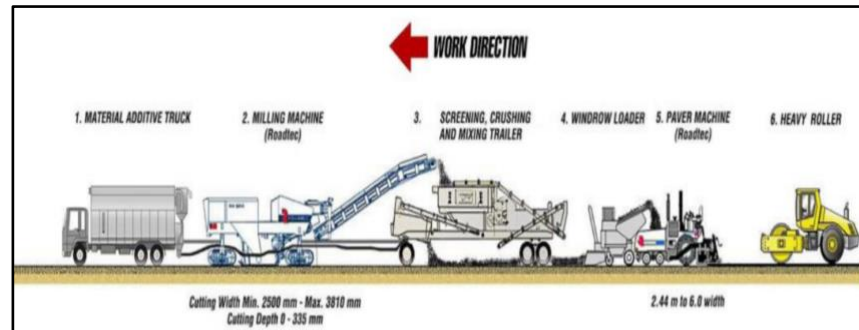


Figura N°10: Equipo utilizado para reciclado en frío “in situ”
Fuente: Adaptado de Fumadó (2015)

Restrepo y Stephens (2015) La evidente ventaja de este sistema es que cada uno de sus elementos puede usarse por separado. La fresadora puede fresar a elevados rendimientos y el remolque puede usarse para la fabricación de suelo-cemento en planta. Sin mencionar que la extendedora puede trabajar en trenes de colocación tradicional de mezcla asfáltica en caliente al igual que el equipo de compactación. (p. 45)

Para el caso de estudio el equipo utilizado estaba compuesto por:

- Recicladora CAT o similar
- Motoniveladora CAT 120K
- Carrotanque
- Vibro compactador VOLVO SD 110
- Compactador neumático de 12 ton.

2.2.3 Asfalto Espumado

2.2.3.1 Fundamentos del Asfalto Espumado

El asfalto espumado (también conocido como asfalto celular), se logra mediante un proceso, en el cual se inyecta una pequeña cantidad de agua fría (1 a 2% del peso del asfalto) y aire comprimido a una masa

de asfalto caliente ($160^{\circ}\text{C} - 180^{\circ}\text{C}$), dentro de una cámara de expansión (Figura x), generando espontáneamente espuma.

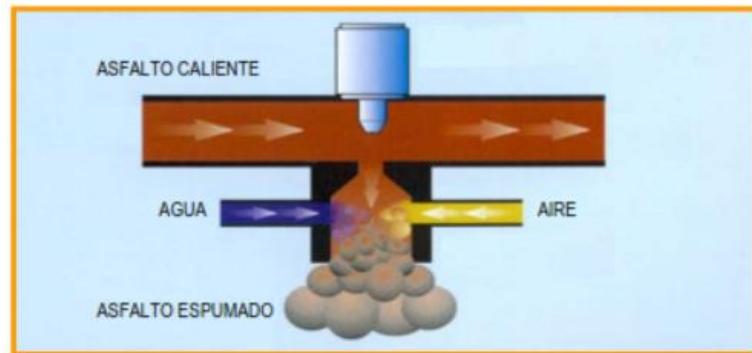


Figura N°11: Cámara de expansión
Fuente: Adaptado de Thenoux (1999)

El proceso de expansión se puede explicar de la siguiente manera: en el momento que las gotas de agua fría toman contacto con el asfalto caliente, se produce un intercambio de energía entre el asfalto y las gotas de agua, lo que eleva la temperatura del agua hasta los 100°C , esta transferencia energética genera en forma instantánea vapor y una expansión explosiva del asfalto. Las burbujas de vapor son forzadas a introducirse en el asfalto dentro de la cámara de expansión. El asfalto junto con el vapor de agua encapsulado es liberado desde la cámara a través de una válvula (dispositivo rociador) y el vapor encapsulado se expande formando burbujas de asfalto contenidas por la tensión superficial de éste hasta alcanzar un estado de equilibrio (Jenkins et.al.,1999).

Debido a la baja conductividad térmica del asfalto y del agua, las burbujas pueden mantener el equilibrio por pocos segundos (10-30 segundos). Este proceso ocurre para una gran cantidad de burbujas. A medida que la espuma se enfría a temperatura ambiente, el vapor en las burbujas se condensa causando el colapso y la desintegración de la espuma. La desintegración de la burbuja (o colapso de la espuma) produce miles de gotitas de asfalto las cuales al unirse recuperan su volumen inicial sin alterar significativamente las propiedades reológicas originales del asfalto (Jenkins et.al., 1999).

Para la producción de mezclas con asfalto espumado, el agregado debe ser incorporado mientras el asfalto se encuentre en estado de espuma. Al desintegrarse la burbuja en presencia del agregado, las gotitas de asfalto se aglutinan con las partículas más finas (especialmente con aquellas fracciones menores a 0.075 mm), produciendo una mezcla asfalto agregado fino, proceso que se denomina dispersión del asfalto. Esto resulta en una pasta de filler y asfalto que actúa como un mortero entre las partículas gruesas. El proceso de dispersión es considerado por muchos autores como fundamental para la obtención de las propiedades mecánicas de las mezclas con asfalto espumado.

La mezcla de materiales con asfalto espumado (en adelante AE) es una combinación de agregados, betún asfáltico, filler activo (cemento o cal), aire y agua, considerando esto, ciertos autores mencionan que el comportamiento de mezclas con AE es similar al de los materiales granulares, pero con una adición de una fuerza cohesiva y una mejora significativa en la susceptibilidad a la humedad, reduciéndola (Asphalt Academy, 2009). De manera a entender mejor este comportamiento, Fu (2009) estudió la microestructura interna según la composición espacial dada por fases individuales en la mezcla, y definió que la misma está formada por el esqueleto de los agregados gruesos; un “mastic” compuesto por las partículas finas, el asfalto y el filler activo; y finos no adheridos que rellenan los huecos del esqueleto formado por los gruesos.

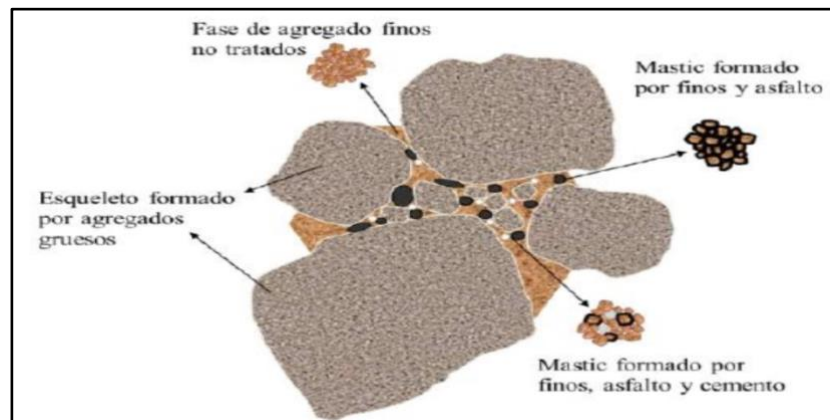


Figura N°12: Esquema conceptual de microestructura.
Fuente: Adaptado de Halles (2012)

Dicho de otra manera, los agregados son parcialmente recubiertos por “puntos de soldadura” o “puntos de asfalto” que forman el mastic (Jenkins, 2000). Las partículas finas del agregado son recubiertas parcialmente por el asfalto en su forma de espuma, que luego queda en una fase de asfalto residual, mientras que otra parte considerable la conforman los huecos en el esqueleto del agregado, los cuales pueden estar llenos de partículas minerales sin asfalto (Fu et al, 2008).

Investigaciones desarrolladas por Jenkins (2000), mencionan que esta unión “no continua” la hace diferente de otros materiales para pavimentos, donde el asfalto disperso genera un cambio en las propiedades de corte con un incremento del valor de cohesión, mientras que el cambio en el ángulo de fricción interno, el cambio debería ser pequeño.

Analizando el material como un todo, y debido a la naturaleza hidrofóbica del betún, las fases de “esqueleto agregado” y “partículas finas no adheridas” podrían tener problemas de contacto con la fase de masilla en el caso de presencia de humedad. Después de mezclar, los agregados están encerrados por una membrana de agua, que evitará que las gotas de betún y el agregado se peguen entre sí. Basado en el hecho de que la mezcla de AE necesita perder humedad para obtener resistencia, la unión física entre la fase de masilla y los agregados no se desarrollará hasta que la membrana de agua que cubre los agregados desaparezca.

La Figura 13 muestra el proceso de curado asociado con el betún espumado basado en el mecanismo propuesto por Fu et al (2010). En este proceso, cuando AE se inyecta en agregado húmedo, se adhiere parcialmente a las partículas finas para formar la masilla, visible en la mezcla suelta como pequeñas gotas (Figura 13 [a]). Las partículas agregadas en la mezcla suelta están recubiertas en su mayoría con una membrana de agua. Después de la compactación, las gotas de masilla asfáltica se presionan contra las partículas de agregado (Figura 13 [b]), pero debido a la presencia de la membrana de agua, no se unen

físicamente a los agregados hasta que la mayor parte de la humedad se haya evaporado (Figura 13 [c] y Figura 13 [d]). Durante el proceso de curado, la membrana de agua se evapora, permitiendo que las gotas de masilla bituminosa y las partículas de agregado se peguen entre sí. Sin embargo, una vez que se hayan formado los enlaces físicos entre ellos, solo se producirá un daño parcial a estos enlaces si se vuelve a introducir agua en la mezcla (Figura 13[e]).

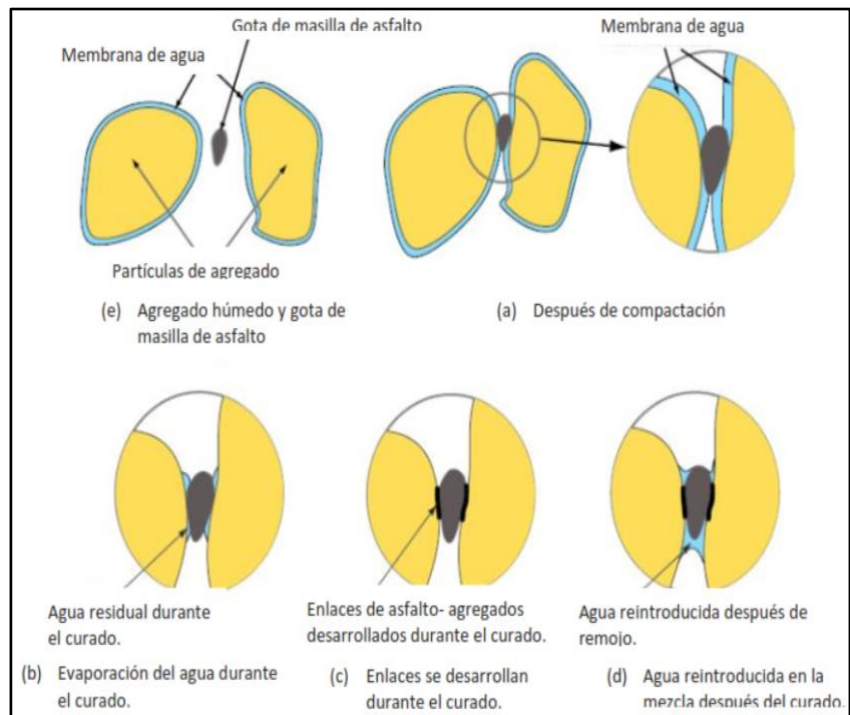


Figura N°13: Esquema conceptual del proceso de curado del asfalto espumado
Fuente: Adaptado de Fu (2010)

Martucci (2018) afirma que, a diferencia de las mezclas asfálticas en caliente, el material estabilizado con asfalto espumado no es negro a la vista. Esto se debe a que las partículas más gruesas del agregado no se cubren con asfalto. Cuando el asfalto espumado entra en contacto con el agregado, las burbujas de asfalto revientan en millones de pequeñas gotitas de asfalto que se adhieren a las partículas finas, específicamente la fracción menor a 0,075 mm. Las gotitas de asfalto pueden intercambiar calor sólo con la fracción de filler y todavía tener viscosidad suficientemente baja como para cubrir las partículas. La mezcla espumada resulta en un filler ligado con asfalto que actúa como mortero entre las partículas gruesas, por ende, hay un ligero

oscurecimiento del color del material después del tratamiento. La adición de cemento, cal o algún material fino similar (100% que pasa el tamiz de 0,075 mm) ayuda a dispersar el asfalto, particularmente donde el material reciclado es deficiente en finos (por ejemplo, menos del 5% pasando el tamiz 0,075 mm).

Estudios previos han demostrado que fillers activos (y en particular cemento) no solamente reemplazan al filler natural, sino que además proveen irregularidades en la superficie de las partículas debido a la acción puzolánica. Esto permite una mejor adherencia del asfalto. (p. 25)



Figura N°14: Probeta de Asfalto Espumado
Fuente: Adaptado de Ing. José Luis Martucci (2018)

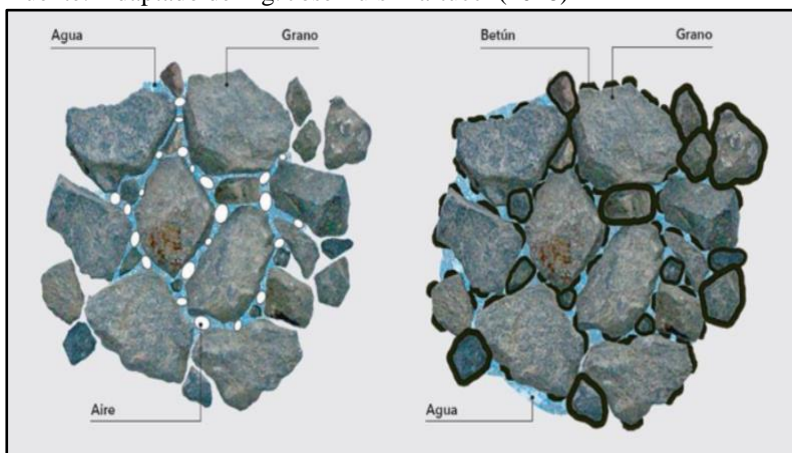


Figura N°15: Esquema del Asfalto Espumado
Fuente: Adaptado de Ing. José Luis Martucci (2018)

2.2.3.2 Propiedades físicas

a) Volumen de expansión

Martucci asegura que para calcular el volumen de expansión teórico de la espuma de asfalto en laboratorio, se requiere entender cómo se produce el intercambio energético dentro del sistema agua-asfalto-recipiente.

Se puede determinar el volumen de expansión, utilizando la ley universal de gases ($PxV = nxRxT$). Para entender mejor el proceso se presenta el siguiente ejemplo (Jenkins et al., 1999), que representa las condiciones de laboratorio: al descargar una masa de 500 gr de asfalto espumado en un recipiente metálico (de masa 1500 gr) con un 2,5 % de agua (% en peso del asfalto), se obtiene un volumen de 21,2 litros de vapor proveniente del agua inyectada la cual sufre un cambio de fase. Esto, entrega una razón de expansión (razón entre el máximo volumen alcanzado y el volumen sin espumar), de 42,4 para el asfalto, lo cual es 2,5 veces más alto que los valores medidos normalmente bajo condiciones de laboratorio. Las explicaciones para estas diferencias son:

- El vapor de agua no es encapsulado en su totalidad y parte de este se escapa durante el proceso de espumado del asfalto.
- No toda el agua es utilizada para generar espuma, es decir pequeñas cantidades de ésta son aisladas por el vapor dentro de las burbujas de asfalto.
- Otros factores dados por las condiciones de borde de la cámara de expansión y del recipiente.

Debido a que son diversos los factores que determinan la magnitud real de expansión, es que se requiere de varias pruebas de laboratorio para determinar el valor máximo de expansión práctico.

Para explicar la interacción física entre el vapor y el asfalto, se analiza una burbuja aislada de asfalto espumado.

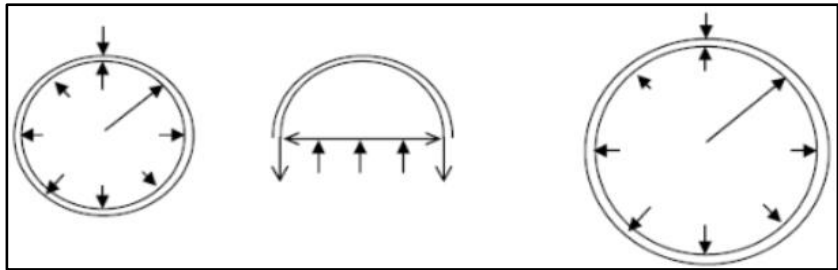


Figura N°16: Proceso de expansión de la burbuja del Asfalto Espumado
Fuente: Adaptado de Ing. José Luis Martucci (2018)

Usando la geometría de una esfera, se puede demostrar que los esfuerzos de tracción permanecen constantes a medida que la burbuja se expande (Jenkins, 1999). Sin embargo, existen una serie de factores físicos que limitan la expansión de las burbujas y por ende de la espuma. Heukelom en 1973, estableció una relación entre la elongación y el módulo de rigidez de los asfaltos con diferentes grados de penetración. Usando esta relación como un indicador de la elongación de la película de asfalto que forma las burbujas, se puede estimar la máxima elongación de la burbuja.

Del monograma de Heukelom y la relación establecida entre el Módulo de Rigidez y elongación, se obtiene una elongación igual a 100 veces el valor del perímetro de la circunferencia. Esto significa que las gotas de agua de 0,1 mm de radio y un perímetro de 0,628 mm, que son encapsuladas en el asfalto, se expandirán hasta 62,8 mm antes de la rotura, es decir una circunferencia de 10 mm de radio. Esto concuerda con las observaciones realizadas en laboratorio (burbujas de 10 a 15 mm). Basado en estos cálculos se determina un espesor crítico para la burbuja (espesor antes del quiebre) entre 100 a 150 Micras (Jenkins et al., 1999).

2.2.3.3 Propiedades Empíricas

Martucci (2018) asegura que las propiedades empíricas más importantes del asfalto espumado que se estudian en la actualidad son: Estabilidad, Razón de Expansión, Vida Media e Índice de Espumación.

a) Estabilidad de Asfalto Espumado

La estabilidad del asfalto espumado se determina por medio del estudio del tiempo que requiere la espuma para colapsar. Dichos estudios son realizados en laboratorio. El quiebre en pruebas de laboratorio ocurre cuando uno de los dos siguientes efectos ocurre primero:

- Reducción en la temperatura del vapor debido al contacto de la película de asfalto con el aire (o el recipiente), que se encuentra a menor temperatura. Las burbujas más grandes, aunque posean teóricamente la misma tensión superficial que sus contrapartes más pequeñas, tienen una mayor área superficial expuesta y por lo tanto experimentarán una mayor disminución de la temperatura lo que las hará colapsar primero (Jenkins et al., 1999).
- Superación del límite de elongación de la película de asfalto. Cuando la presión de vapor al interior de la burbuja es demasiado grande, la película de asfalto se expandirá más allá de su límite de elongación, resultando en su quiebre antes de lograr el equilibrio (Jenkins et al., 1999).

b) Razón de Expansión

Es una medida de viscosidad de la espuma e influye en que tan bien se dispersaría el asfalto en la mezcla. La Razón de Expansión está definida como la relación entre el máximo volumen logrado en el estado de espuma y el volumen del asfalto sin espumar.

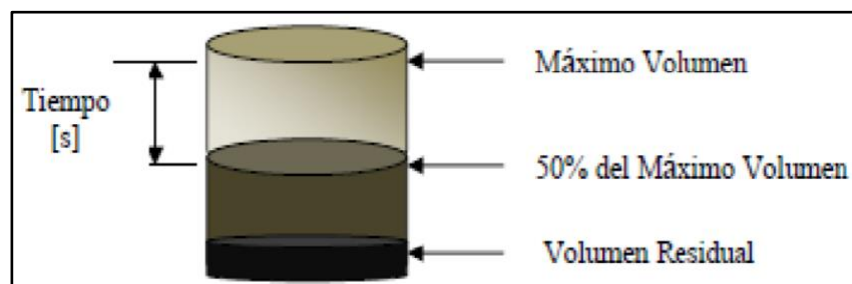


Figura N°17: Representación del aumento de volumen por la espumación del Asfalto

Fuente: Adaptado de Wirtgen (2012)

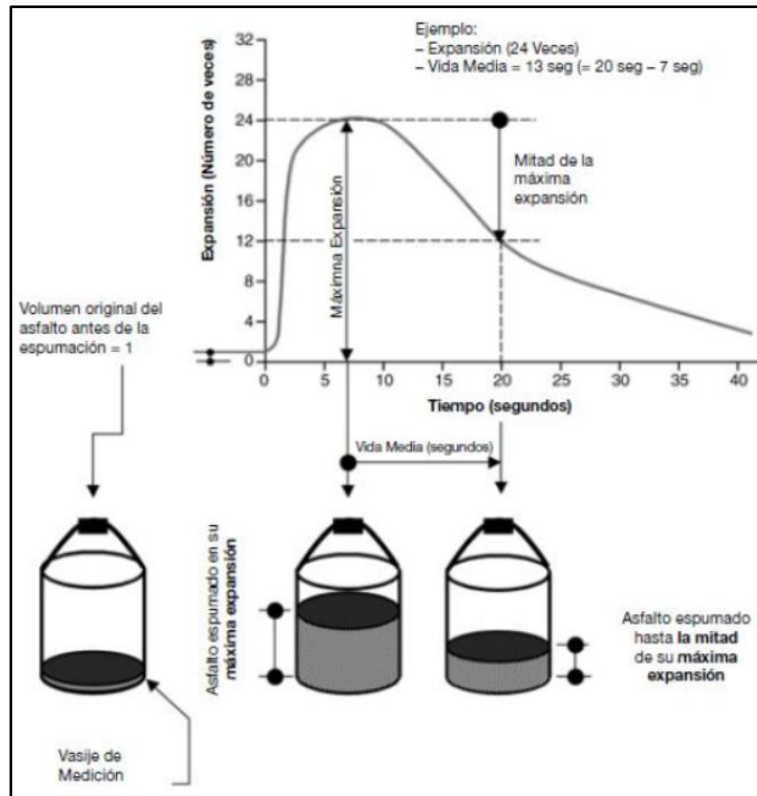


Figura N°18: Características del Asfalto Espumado
Fuente: Adaptado de Wirtgen (2012)

c) Vida Media

Es una medida de estabilidad de la espuma y provee un indicador de la tasa de colapso. La Vida Media es el tiempo tomado, en segundos, desde el estado espumado hasta llegar a la mitad del máximo volumen obtenido.

A mayores temperaturas de espumado y mayor cantidad de agua se incrementa la Razón de Expansión pero a su vez disminuye la Vida Media, sin embargo el mejor espumado es generalmente considerado como aquel que optimiza tanto la Razón de Expansión como la Vida Media.

Para llevar a cabo dicha optimización es necesario graficar ambas propiedades en un mismo gráfico (Figura 18), para distintas cantidades de agua y temperaturas. En general no existen especificaciones estándar para optimizar estas propiedades, pero es recomendable

aumentar levemente el valor óptimo de la Vida Media, a partir del punto de intersección, aún en desmedro de la Razón de Expansión.

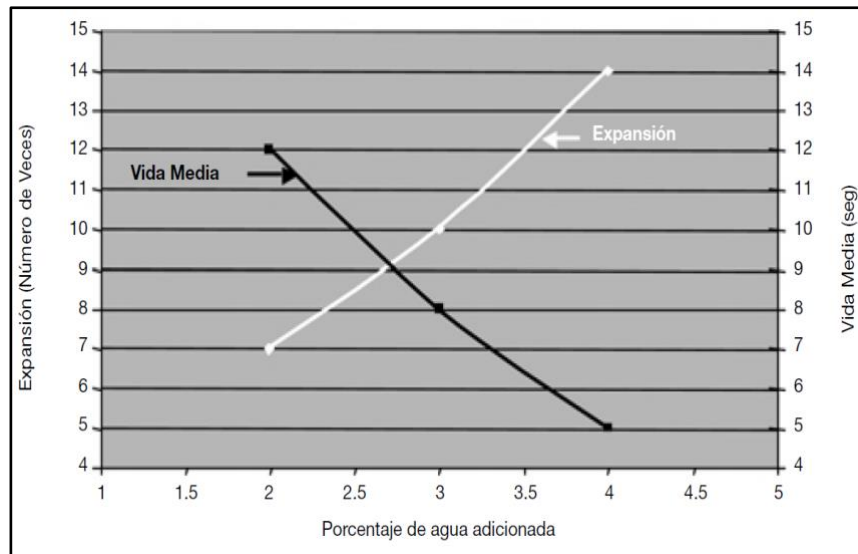


Figura N°19: Relación entre propiedades del Asfalto Espumado
Fuente: Adaptado de Wirtgen (2012)

Tabla N°2: Límites mínimos en las características del Asfalto Espumado

Características del Asfalto Espumado (Limite mínimos)		
Temperatura del Agregado	10°C a 15 °C	Mayor a 15 °C
Razon de Expansión [veces]	10	8
Vida Media [segundos]	8	6

Fuente: Adaptado de Wirtgen (2012)

Las características de espumado (Razón de Expansión y Vida Media) no son medidas exactas, sino más bien órdenes de magnitud. Por otro lado, mediante el empleo de aditivos activos se pueden obtener valores más elevados, tanto de la Razón de Expansión (superiores a 15) como de la Vida Media (superiores a 60 segundos) (Macarrone et al., 1994). Cuando las características de espumado son extremadamente pobres (una Razón de Expansión menor que 5 y una Vida Media bajo los 5 segundos), es difícil obtener una mezcla aceptable. Las

consideraciones deberían entonces estar orientadas a emplear un asfalto de un origen distinto o incluir un agente espumante. (p .36)

2.2.3.4 Índice de Espumación

En la actualidad, el asfalto espumado se caracteriza mediante sus propiedades empíricas (Razón de Expansión y Vida Media). Estudios actuales demuestran que estos dos parámetros y la manera en la cual ellos son generalmente determinados no son suficientes para una adecuada caracterización del asfalto espumado (Jenkins et al., 1999). Ninguno de estos dos parámetros permite establecer la habilidad de la burbuja para ser mezclada con el agregado mineral.

El colapso del AE o decaimiento de la espuma fue estudiado por Jenkins (2000), desarrollando el concepto de Índice de Espumación o Espumabilidad. Esta es una herramienta para optimizar la razón de aplicación tanto del agua de espumación y aditivos, dado por el asfalto y el sistema de espumación.

Se calcula a partir de la curva de decaimiento del cambio de volumen en el tiempo, considerando la viscosidad requerida para una adecuada mezcla, resultando así un indicador del tiempo disponible para el mezclado.

El profesor Kim Jenkins definió el Índice de Espumación como el área bajo la curva obtenida de graficar la razón de expansión versus el tiempo, sobre un valor mínimo de ER función de la viscosidad, concluyendo que a mejores Índices de Espumación mejores propiedades de espumado y mejor el producto estabilizado alcanzado.

Teniendo en cuenta que la viscosidad del asfalto para una adecuada mezcla tiene lugar a viscosidades entre 0,2 y 0,55 Pa.s (Shell Bitumen, 1990), la relación de expansión de la espuma, al menos, debería ser ER

= 4. Este valor se utiliza entonces como el valor mínimo para el cálculo del área bajo la curva (Índice de espumación), (Figura 20).

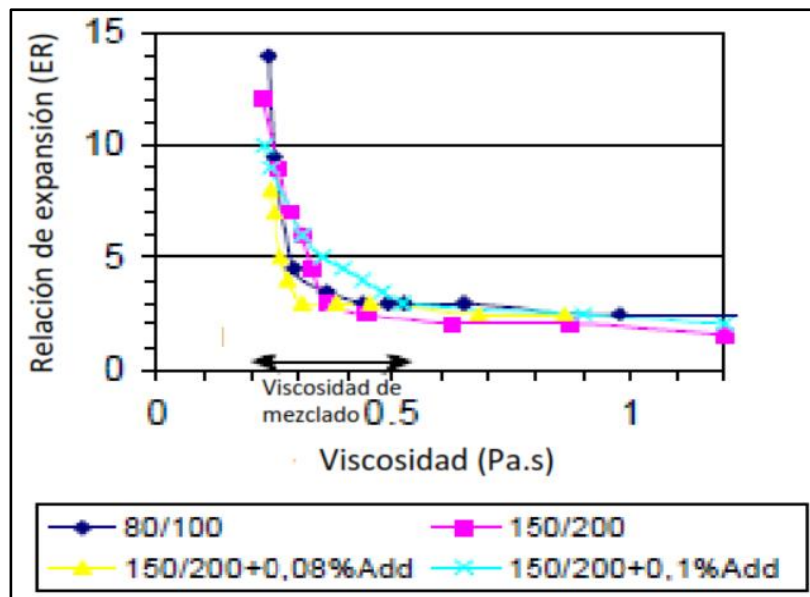


Figura N°20: Relación entre la viscosidad y la relación de expansión de espuma
Fuente: Adaptado de Wirtgen (2012)

Jenkins et al.(1999) señala que una importante característica en la generación de la espuma, obtenida en laboratorio, ha sido ignorada; como es la desintegración de la espuma durante la descarga, pero antes de que el volumen sea medido.

Esta es una de las debilidades de las técnicas utilizadas actualmente para la caracterización de asfalto espumado y que tiene una influencia particularmente significativa en los asfaltos con una baja Vida Media. En la mayoría de los casos, el asfalto ha estado decayendo durante un máximo de 5 segundos antes de que se mida la Razón de Expansión (ver el Grafico N°19), es decir, la Razón de expansión máxima medida ER_m , no es la máxima Razón de expansión ER_a de la espuma.

Además, Jenkins et al. (1999) explica esta diferencia utilizando la relación gradual de la curva de desintegración del asfalto espumado durante la descarga de la boquilla; la Razón de Expansión Máxima Real ER_a es una proporción requerida para obtener la máxima expansión

medida ER_m , esta relación encontrada en el laboratorio se puede volver a calcular. No es posible medir la Razón de Expansión Real, debido a la desintegración durante la descarga, pero es posible calcularla de nuevo.

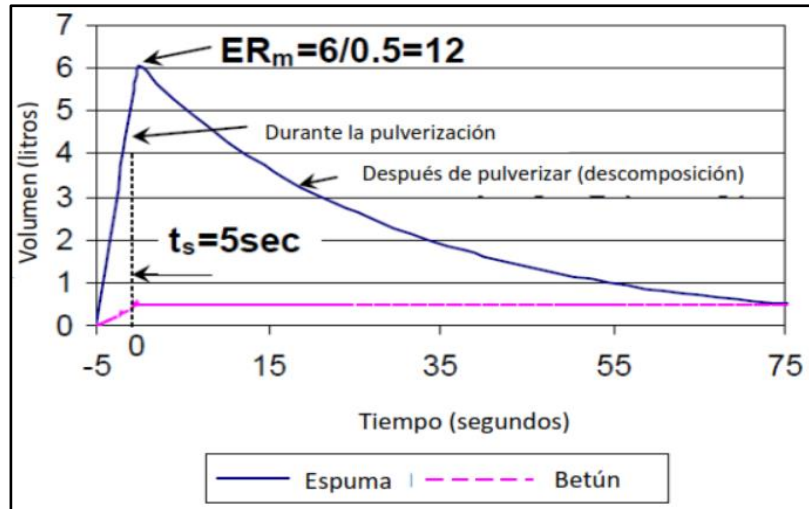


Figura N°21: Ciclo de vida del asfalto espumado
Fuente: Adaptado de Jenjuns et al. (1999)

En el siguiente gráfico se representa un análisis de sensibilidad del ERA Vs ER_m para diferentes vidas medias y tiempos de descarga. Dado por un t_s (tiempo de descarga del asfalto espumado) y $\tau_{1/2}$ (Vida Media) y el factor de corrección $c (= ER_m / ERA)$, este factor de corrección se puede utilizar para obtener la Razón de Expansión Real (ERA) a partir de la máxima Razón de Expansión Medida (ER_m).

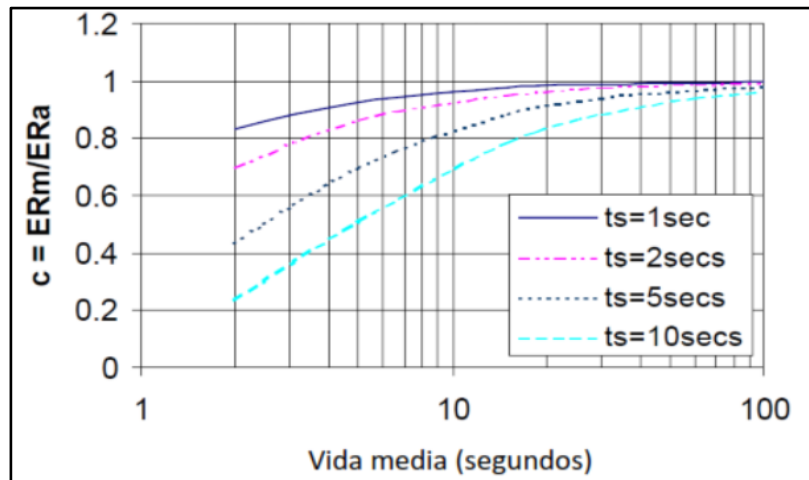


Figura N°22: Relación entre la razón de expansión real (ERA) y la razón de expansión máxima medida (ER_m) con la vida media
Fuente: Adaptado de Jenjuns et al. (1999)

El Índice de Espumación se define como el área bajo la curva de la Razón de Expansión y Tiempo de Colapso (Jenkins et al., 1999). La curva que se obtiene de esta gráfica (Figura x) corresponde a la curva de colapso, la cual es un indicador del tiempo disponible para el mezclado. El área A formada por la intersección de la curva, el eje de las ordenadas y la recta correspondiente a una razón de expansión 4.0 se conoce como Índice de Espumación.

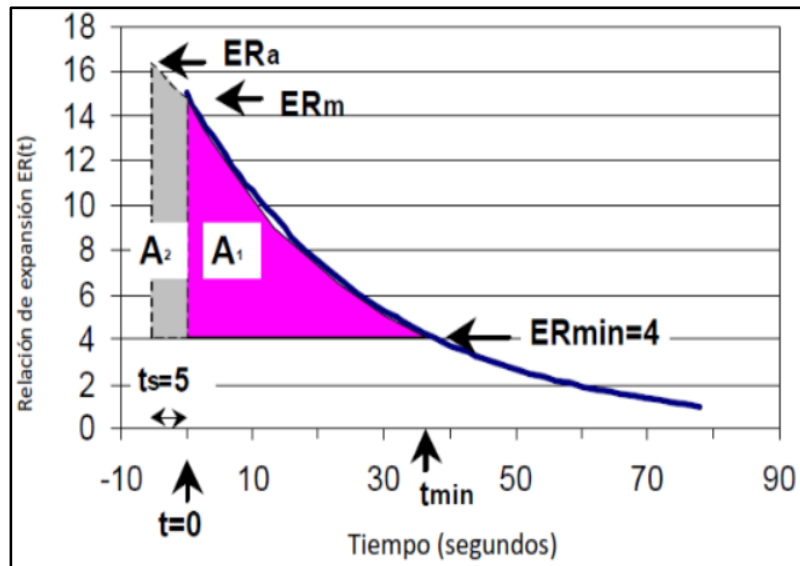


Figura N°23: Índice de espumación (IE=A1+A2) para la caracterización de la espumabilidad

Fuente: Adaptado de Jenjuns et al. (1999)

La integración de la ecuación de decaimiento en la zona del área A2, A1 y el cálculo geométrico, ofrece la siguiente expresión para el índice de espuma de espumación.

$$\text{Índice de Espumación (IE)} = \frac{-\tau_{1/2}}{\ln 2} * \left[4 - ER_m - 4 * \ln \left(\frac{4}{ER_m} \right) \right] + \left(\frac{1+c}{2c} \right) * ER_m * t_s$$

Donde:

$\tau_{1/2}$ = Vida Media de la espuma

ERm = Razón de expansión media

C = Razón entre razón de expansión medida y calculada

Ts = tiempo de descarga de asfalto espumado

Martucci (2018) en su investigación comparó el efecto del Índice de Espumación con la temperatura del material al tiempo de mezclado, concluyendo que a medida que la temperatura aumenta, un menor Índice de Espumación puede ser usado para alcanzar una estabilización efectiva.

La investigación desarrollada demostró que el Índice de Espumación y la temperatura del agregado (al momento de producirse la mezcla) son factores importantes en la dispersión obtenida. Para obtener una buena mezcla a temperaturas más bajas son necesarios Índices de Espumación más altos (y por lo tanto, mayor razón de expansión y vida media).

A pesar de que estas investigaciones son relevantes, es importante comparar las condiciones de laboratorio a las que realmente se presentan en terreno. La calidad de la espuma producida en la unidad de laboratorio es siempre inferior a la producida por la recicladora. Esto se debe principalmente a que las presiones de trabajo utilizadas en terreno son mayores, y a que la continuidad en la operación del tren reciclador permite trabajar a temperaturas más altas. Por lo tanto, existe una variación entre las mediciones de laboratorio y las de terreno, por lo que es importante verificar las propiedades de espumación en terreno.

Estas mediciones deberían ser comparadas con la temperatura del agregado (y no sólo la superficie del camino) y los resultados verificados con las recomendaciones de la Tabla 3. El trabajo con asfalto espumado no se debería realizar cuando la temperatura del agregado esté bajo los 10 °C. (p. 40)

Tabla N°3: Facilidad del AE para dispersarse (capacidad de mezclado)

Índice de espumación	Razón de Expansión (implícito)	Temperatura del agregado (°C)		
		< 15 °C	15 °C a 25 °C	> 25 °C
< 75	< 8	Muy mala	Mala	Moderada
75 a 150	8 a 12	Moderada	Buena	Buena
> 150	> 12	Buena	Muy buena	Muy buena

Fuente: Adaptado de Martucci (2018)

En la siguiente tabla se realiza una recopilación de valores relacionados con Expansión y vida media de distintas normas y publicaciones consultadas.

Tabla N°4: Valores mínimos para la vida media, en segundos, y la tasa de expansión, en relación volumen original, para AE.

Norma/Publicação	País	Taxa de expansão (vezes)	Meia-vida (s)	Observação
DEINFRA/SC ES-P-09B/12		10	6	
DER/PR ES-P 32/05		5	5	
DER/SP ET-DE-P00/033	Brasil	5	5	
DNIT 166/2013-ES		10	8	
DNIT 169/2014-ES		10	8	
TG2 (Asphalt Academy, 2009)	África do Sul	10	6	Temperatura dos agregados entre 10 °C e 25 °C
		8	6	Temperatura dos agregados acima de 25 °C
Wirtgen cold recycling manual (Wirtgen GmbH, 2004)	Alemanha	10	8	
AUSTROADS (2011a)	Austrália	20	10	
Caltrans (2012)	Estados Unidos	10	12	
TRL386 (Milton & Earland, 1999)	Inglaterra	10	10	
Browne (2012)	Nova Zelândia	10	6	

Fuente: Adaptado de Martucci (2018)

2.2.4 Diseño de Mezclas

2.2.4.1 Caracterización de los materiales

La característica del diseño de mezclas comprende:

- Densidad de la mezcla
- Vacíos de aire
- Vacíos en el agregado mineral
- Contenido de asfalto.

Cada una de estas características tiene mucha importancia en el comportamiento de la mezcla.

Thenoux y Jamet (1999) aseguran que la densidad de la mezcla es la relación entre el peso de la mezcla por unidad de volumen. Si bien es

cierto que esta característica no es utilizada en el diseño de la mezcla, se emplea para los controles de compactación. A la mezcla asfáltica compactada en el laboratorio se le asigna la densidad patrón y será ésta el punto de referencia en los controles.

Los Vacíos de aire o vacíos están conformados por el aire atrapado en la mezcla compactada. A menor porcentaje de vacíos de aire la mezcla será menos permeable. En el diseño de mezclas convencionales, los vacíos de aire están entre 3 a 5% en laboratorio, pero en campo se permite tener vacíos de aire no mayores al 8% permitiendo que la carpeta se compacte bajo tránsito.

La densidad de la mezcla está en función del contenido de vacíos, mezclas con menor porcentaje de vacíos serán más densas, y visceversa. Un alto porcentaje de vacíos de aire resulta en una mezcla porosa, que permite el paso del agua a través de su estructura, pero además puede causar deterioro debido a que hay mayor porcentaje de aire (como se mencionó en capítulos anteriores el aire oxida el asfalto). Bajos porcentajes de vacíos de aire son perjudiciales en la mezcla, debido a que cuando soporta las carga de tránsito la carpeta se comprime y el asfalto se acomoda en los vacíos atrapados, si el número de vacíos es pequeño, el asfalto no podrá acomodarse en el interior y tendrá que salir a la superficie, esto se conoce como exudación.

Los Vacíos en el agregado mineral (VMA) consideran los volúmenes ocupados por los vacíos de aire atrapados y el asfalto efectivo¹. El diseño considera un porcentaje mínimo de VMA dependiendo del tamaño del agregado. Si el porcentaje del VMA son bajos la película de asfalto será delgada y la mezcla será susceptible a oxidación. Con altos porcentajes de VMA la película de asfalto será mas gruesa y la mezcla será más durable.

Una graduación densa puede reducir el porcentaje de VMA, reduciendo la película de asfalto y, por consiguiente, reduciendo la durabilidad de la mezcla y dándole un aspecto seco.

El Contenido de asfalto es el porcentaje de asfalto que se incorpora en la mezcla. Parte del asfalto será absorbido por el agregado y el resto de asfalto formará una película que rodean las partículas. A los primeros se les denomina asfalto absorbido y al segundo asfalto efectivo.

El óptimo contenido de asfalto de la mezcla está en función de la granulometría y el porcentaje de absorción del material. Mezclas con alto porcentaje de filler (mayor superficie específica) requerirán mayor porcentaje asfalto, por ejemplo, las mezclas SMA tienen más porcentaje de asfalto que una mezcla convencional y superpave. Mezclas porosas (% filler menor de 2%) necesitan menor porcentaje de asfalto.

2.2.4.2 Diseño de Mezclas con Asfalto Espumado

Procedimiento de diseño

El procedimiento básico para el diseño de mezclas con asfalto espumado se resume en los siguientes pasos:

a) Optimización de las propiedades de la espuma

Esta etapa tiene como objetivo determinar la temperatura del asfalto y la cantidad de agua a inyectar que optimicen tanto la Razón de Expansión como la Vida Media. Para llevar a cabo las mediciones en laboratorio de las propiedades de la espuma, se emplea un equipo de producción de asfalto espumado, cuya principal característica es poseer una cámara de expansión, idéntica a la empleada en terreno para producir la espuma de asfalto.

b) Caracterización del agregado

Debido a la gran variedad de agregados que pueden ser mezclados con asfalto espumado (áridos chancados, arena arcillosa, RAP y otros materiales tales como escorias), estos deben ser caracterizados considerando dos propiedades: su distribución granulométrica y el Índice de Plasticidad. Una vez obtenida la curva granulométrica del agregado, es comparada con la clasificación mostrada en la Figura 3, desarrollada por Akeroyd y Hicks para Mobil Oil en 1988.

Si el material se encuentra en la Zona A de esta clasificación, es apropiado para ser empleado en carreteras con tráfico pesado. Los materiales de la Zona B son apropiados para tráfico liviano, pero su comportamiento puede ser mejorado mediante la adición de fracciones gruesas. Los materiales de la Zona C son deficientes en finos y no son apropiados para la estabilización a menos que su graduación sea mejorada mediante la adición de finos. El contenido de finos del agregado, es un parámetro fundamental debido a la influencia que tiene en el proceso de dispersión del asfalto y en general debe encontrarse sobre un 5% (Ruckel et al., 1982).

El Índice de Plasticidad es un indicador de la capacidad que tienen los finos para ser mezclados con la espuma de asfalto. Dependiendo de los valores que alcance este índice se recomienda el uso de pequeñas cantidades de cemento de acuerdo con la clasificación mostrada en la Tabla N°5.

Tabla N°5 Recomendaciones para la incorporación de cemento a la mezcla con Asfalto Espumado

Índice de Plasticidad	Cantidad de Cemento (% en peso del agregado)
IP < 10	1 %
10 < IP < 16	1.5 %
IP > 16	3 %

Fuente: Wirtgen GMBH (1998)

Thenoux y Jamet (1999) mencionan que el contenido de RAP que posea el agregado, también es un factor que influye tanto en las

propiedades estructurales de la mezcla como en el contenido óptimo de asfalto, por lo cual es necesario evaluar esta influencia en laboratorio.

c) Determinación del contenido óptimo de humedad de la mezcla

El contenido de humedad durante el proceso de mezclado y compactación es considerado por muchos investigadores como el criterio de diseño más importante en las mezclas con asfalto espumado debido a su efecto lubricante sobre las partículas finas durante la dispersión del asfalto. La relación Humedad - Densidad debe ser considerada en el diseño de la mezcla (Ruckel et. al., 1982). Una insuficiente cantidad de agua resultará en un agregado seco y polvoriento lo que provocará que la espuma al colapsar forme grumos de asfalto y no se mezcle adecuadamente con la fracción fina del agregado (Bowering, 1970). Un exceso de agua incrementará el tiempo de curado, reduciendo la resistencia de la mezcla (Ruckel et. al., 1982). Investigaciones realizadas por Mobil Oil, sugieren que el contenido óptimo de humedad, es aquel que maximiza la densidad de la mezcla (70% - 80% de la humedad óptima AASHTO de los agregados). Las mezclas con bajas densidades son consecuencia de bajos contenidos de humedad, lo que se traduce en una inadecuada dispersión del asfalto espumado (Bowering, 1970) Para el diseño se recomienda como contenido óptimo de humedad, el 75% de la humedad óptima de compactación obtenida mediante el ensayo Proctor Modificado.

d) Determinación del contenido óptimo de asfalto

Para determinar el contenido óptimo de asfalto, deben ser confeccionadas un mínimo de 5 mezclas con distintos contenidos asfálticos (1% – 3 % de asfalto), y evaluar el comportamiento de cada una de ellas en función de la Tracción Indirecta (o tracción por compresión diametral), determinada tanto en estado seco como saturado. El contenido óptimo de asfalto es aquel que maximiza la Tracción Indirecta saturada (CSIR Transportek, 1999). La Tracción Indirecta (en estado seco o saturado), se determina sobre probetas cilíndricas (100 mm de diámetro por 63.5 mm de espesor) compactadas

con 75 golpes del martillo Marshall. Antes de someter a las probetas al ensayo de Tracción Indirecta, estas son curadas durante 72 horas en un horno a 40° C. El estado saturado se logra sumergiendo las probetas en agua durante 24 horas a 25 °C.

e) Caracterización de las propiedades mecánicas de las mezclas

Las propiedades mecánicas más utilizadas para caracterizar las mezclas de asfalto espumado son: CBR, Tracción Indirecta, Módulo Resiliente, Compresión no Confinada, Estabilidad Marshall y Resistencia a la Fatiga. Las propiedades mecánicas son susceptibles a la humedad, sin embargo, existen ciertos aditivos como la cal o el cemento que reducen esta susceptibilidad (Castedo y Wood, 1983), al igual que elevados contenidos de asfalto, debido principalmente a la reducción de la permeabilidad. Las mezclas con asfalto espumado disminuyen el valor de sus propiedades mecánicas con el incremento en la temperatura, pero son menos susceptibles que las mezclas asfálticas en caliente. A temperaturas superiores a los 30 ° C, las mezclas con asfalto espumado poseen un Módulo Resiliente más alto que las mezclas asfálticas en calientes equivalentes (después de 21 días de curado a temperatura ambiente) (Bissada y Stetler, 1987). Una gran mayoría de las investigaciones y estudios emplean los parámetros: Tracción Indirecta, Módulo Resiliente y Resistencia a la Fatiga.

2.2.5 Diseño Estructural

Abad (2016) Menciona que para el diseño del pavimento de la vía AASHTO 1993 establece que la estructura de un pavimento debe satisfacer un determinado Número Estructural, el cual se calcula en función de los parámetros a desarrollar a continuación.

2.2.5.1 Método AASTHO 93 en el Diseño de Pavimentos Flexibles

Cancinos (2013) afirma que, este método considera el concepto de confiabilidad de diseño, que permite al proyectista diseñar un pavimento con un nivel adecuado de riesgo.

a) Optimización de las propiedades de la espuma

▪ Periodo de Diseño

El periodo de diseño a ser empleado en general es de 10 años para caminos de bajo volumen de tráfico, periodo de diseño por dos etapas de 10 años, y el periodo de diseño en una etapa de 20 años. Para conservaciones viales 5 años (caso de la carretera Conococha- Huaraz).

Tabla N°6: Periodos Típicos de Diseño

Condiciones de Carreteras	Periodo de Análisis
Vías urbanas con alto volumen	30-50
Vías rurales con alto volumen	20-50
Pavimentadas con bajo volumen	15-25
Superficie granular con bajo volumen	10-20

Fuente: Adaptado de AASHTO (1993)

▪ Tráfico (W18)

Para el cálculo del tráfico, el método actual contempla los ejes equivalentes sencillos de 18,000 lbs (8.2 ton) acumulados durante el periodo de diseño. La Ecuación N°3. 13 puede ser usada para calcular el parámetro del tráfico W 18.

Ecuación N°1

$$W_{18} = D_D \times D_L \times w_{18}$$

Donde:

- W18: Transito acumulado en el primer año, en ejes equivalentes sencillos de 8.2 ton, en el carril de diseño.
- DD: Factor de distribución direccional
- w18: Ejes equivalentes acumulados en ambas direcciones.
- DL: Factor de distribución por carril

El factor de distribución direccional DD generalmente es 0.5 (50%) para la mayoría de las carreteras; sin embargo, este puede variar de 0.3 a 0.7 dependiendo de la incidencia de tráfico en una dirección. Los

factores de distribución por carril, DL, recomendados por AASHTO se muestran en la Tabla N°7

Tabla N°7: Factor de distribución por carril DL

Nº carriles en una dirección	%ESAL en carril diseño
1	100
2	80-100
3	60-80
4	50-75

Fuente: Adaptado de AASHTO (1993)

- Estudio de tráfico (MTC-2018)

Para la determinación del Índice Medio Diaria Anual, producto del estudio de tráfico, es necesario contar con información primaria, que son los aforos vehiculares en la carretera en estudio, para luego efectuar trabajos de gabinete y llevar a cabo el análisis de los resultados obtenidos, por tanto como requisito mínimo para la elaboración del estudio se llevan a cabo las siguientes actividades:

- Recopilación de la información en campo (aforos vehiculares)
- Procesamiento de la información obtenida en campo
- Identificación de tramos homogéneos

Para la carretera Conococha - Huaraz, el estudio de tráfico, fue monitoreado en las estaciones de Conococha, Catac y Ticapampa, para determinar el IMDA. En cada estación se realizaron conteos de 7 días durante 24 horas. Los resultados obtenidos permitieron calcular el ESALs (ver la Tabla N°8), el cual se utilizó para realizar el diseño estructural de pavimento.

Tabla N°8: Número de ejes equivalentes de 8.2 ton

Tramo	Periodo de diseño (5 años)
Conococha - Cátac (km 491+760) - Pte Parco (km 536+176)	1.518 x 10 ⁶
Catac -Huaraz (km 536+176) - Pte Taclan (km 570+266)	2.303 x 10 ⁶

Fuente: Adaptado de Abad (2016)

- Factor de confiabilidad (R):

Con el parámetro de Confiabilidad, se trata de llegar a cierto grado de certeza en el método de diseño, para asegurar que las diversas alternativas de la sección estructural que se obtengan, duren como mínimo el periodo de diseño. De acuerdo a las características e importancia de la vía, por tratarse de una carretera longitudinal de la sierra, se recomienda, un nivel de confiabilidad de 90 %, que corresponde a arterias colectoras. El factor (R), muestra el grado de confianza al proceso de diseño que garantiza el rendimiento del pavimento proyectado.

Tabla N°9: Niveles sugeridos de confiabilidad

Clasificación Funcional	Nivel recomendado de confiabilidad	
	Urbano	Rural
Interestatal y otras vías	85-99,9	80-99,9
Arterias principales	80-99	75-95
Colectores	80-95	75-95
Local	50-80	50-80

Fuente: Adaptado de AASHTO (1993)

- Desviación estándar normal (Z_r)

La desviación estándar normal está en función de la confiabilidad del proyecto (R%). En la Tabla N°3. 15 se muestran los valores de desviación estándar correspondiente a diferentes niveles de confiabilidad.

Tabla N°10: Desviación standard del error combinado en la (Z_r)

Confiabilidad (R %)	Desviación Estándar Normal (Zr)
50	-0.000
60	-0.253
70	-0.524
75	-0.674
80	-0.841
85	-1.037
90	-1.282
91	-1.340
92	-1.405
93	-1.476
94	-1.555
95	-1.645
96	-1.751
97	-1.881
98	-2.054
99	-2.327
99.9	-3.090
99.99	-3.750

Fuente: Adaptado de AASHTO (1993)

- Desviación estándar (So):

Es un valor que toma en cuenta la variabilidad esperada de la predicción del tránsito y de los otros factores que afectan el comportamiento del pavimento, como por ejemplo, construcción, medio ambiente, incertidumbre del modelo. La Guía AASHTO recomienda adoptar para los pavimentos flexibles, valores de So comprendidos entre 0.40 y 0.50. En el manual de MTC (MTC-2014) se adopta para los diseños recomendados el valor de 0.45 (utilizado para el diseño de pavimento en la carretera Conococha- Huaraz).

- Módulo resiliencia (Mr):

El Modulo de Resiliencia es (Mr) es una medida de la rigidez del suelo de subrasante, el cual para su cálculo se empleará la ecuación, que correlaciona con el CBR, recomendada por el MEPDG (Mechanistic

Empirical Pavement Design Guide). En la Ecuación N°3. 14 se muestra la correlación entre CBR y Módulos de Resiliencia Mr.

Ecuación N°2

$$Mr \text{ (psi)} = 2555 \times \text{CBR}^{0.64}$$

- Pérdida de serviciabilidad:

La serviciabilidad representa el confort o comodidad de circulación que la vía ofrece al usuario, su valor está comprendido entre 5 (condición máxima ideal) y 0 para una condición de completo deterioro.

La pérdida de serviciabilidad es la diferencia entre la serviciabilidad inicial y la serviciabilidad final. La serviciabilidad inicial (P_0) es la condición que alcanza la vía inmediatamente después de ser construida y depende de la calidad de construcción, las condiciones topográficas y la estructuración del pavimento. El valor típico para una p_0 nuevo pavimento es de 4.5 a 3.8. Mientras que la serviciabilidad final (P_t) es la condición mínima que se espera alcanzar al concluir el periodo de diseño. Los valores recomendados de P_t son 3.0, 2.5 o 2.0 autopistas, caminos intermedios y caminos secundarios, respectivamente (Menéndez Acurio, 2013, pág. 79).

La guía MSHTO 93 usa la variación total del índice de serviciabilidad (ΔPSI) como criterio de diseño, que se define como:

Ecuación N°3

$$\Delta PSI = p_0 - p_t$$

Donde:

- P_0 : índice de serviciabilidad inicial
- P_t : índice de serviciabilidad final, que es el más bajo índice tolerable antes de la rehabilitación.

- Coeficiente de drenaje

Menéndez El coeficiente de drenaje es la relación que existe entre el módulo resiliente en una condición de humedad óptima con respecto al módulo para una cierta condición de humedad.

El valor 1.0 representa que las condiciones de drenaje son similares a las de la pista de prueba de AASHTO, mientras que valores por encima de 1.0 se trata de condiciones mejores que las obtenidas durante la puesta de pruebas (Menéndez Acurio, 2013, pág. 80).

Tabla N°11: Coeficiente de drenaje de bases y sub base granulares

Calidad del drenaje	Agua eliminada en	Humedades cercanas a la saturación			
		< 1%	1-5%	5 - 25%	>25%
excelente	2 horas	1.40 -1.35	1.35-1.30	1.30 -1.20	1.20
bueno	1 día	1.35 -1.25	1.25 -1.15	1.15-1.00	1.00
regular	1 semana	1.25-1.15	1.15-1.05	1.00-0.80	0.80
pobre	1 mes	1.15-1.05	1.05 0.80	0.80 -	0.60
muy pobre	no drena	1.05 - 0.95	0.95 - 0.75	0.75 -	0.40

Fuente: Adaptado de AASHTO (1993)

Tomando en cuenta las condiciones topográficas existentes, precipitaciones pluviales anuales medias y para un suelo de permeabilidad media en la carretera Conococha - Huaraz, se estimó para el diseño de la estructura del pavimento, que el pavimento estará expuesta a niveles cercanos a la saturación mayor al 25% (ver la Tabla N°3. 16), recomendándose los siguientes valores:

- Para la base reciclada $m_2 = 1.00$
- Para la base granular $m_3 = 1.10$
- Para la sub base granular $m_4 = 1.10$

b) Diseño de Espesor

- Cálculo del número (SN)

El método AASHTO 1993 utiliza el número estructural SN para cuantificar la resistencia estructural que el pavimento requiere para determinada capacidad de soporte del suelo, tráfico esperado y pérdida de serviciabilidad. Con cualquiera de las herramientas mencionadas

como la Ecuación N°3. 16, el Monograma de la Figura N°3. 5 y el Software Aashto.exe, de diseño empírica usada en AASHTO 93, se busca el número estructural requerido para el proyecto en estudio.

Ecuación N°4 Para calcular el número estructural requerido (SNr)

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_r S_0 + 9.36 * \log_{10}(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5} \right]}{0.40 + \frac{1.094}{(SN+1)^{5.19}}} + 2.32 * \log_{10}(M_r) - 8.07$$

Donde:

- W18 : Número Total de Ejes Equivalentes, para el período de diseño.
- ΔPSI: Po- pt: Pérdida de serviciabilidad prevista
- P0: Serviciabilidad inicial.
- Pt: Serviciabilidad final.
- Mr: Módulo de Resiliencia de la Subrasante
- So: Error estándar por efecto del tráfico y comportamiento
- Zr: Desviación Standard del error combinado en la predicción del tráfico y comportamiento estructural

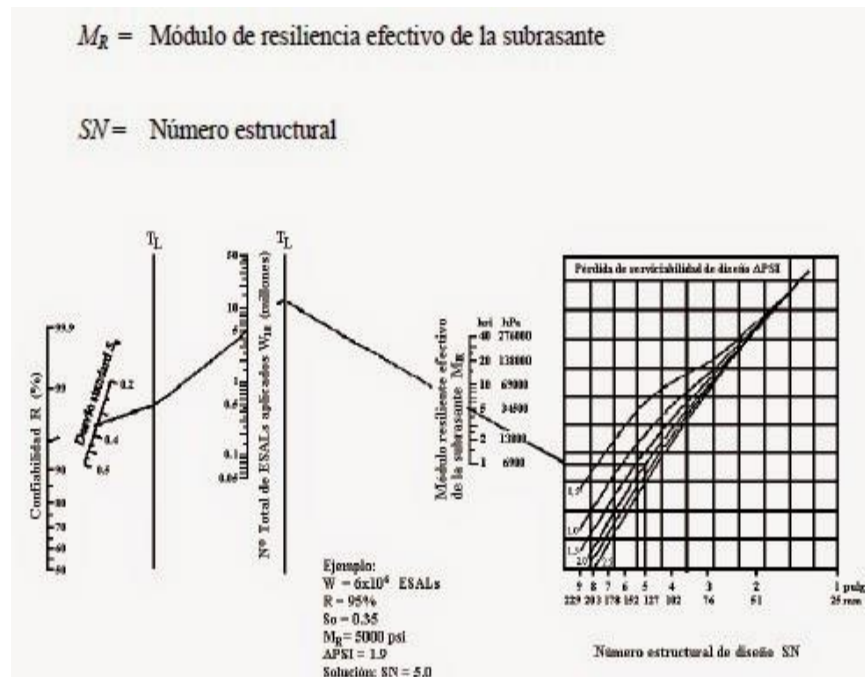


Figura N°24: Evolución AASHTO en el cálculo de SNr
 Fuente: Adaptado de AASHTO (1993)

Una vez que se ha definido el Número Estructural de diseño (SN) para una estructura de pavimento inicial, es necesario identificar un grupo de espesores de capas de pavimentos, que cuando son combinados proporcionaran la capacidad de carga correspondiente al SN de diseño. La Ecuación N°5 proporciona la base para convertir un SN en espesores reales de superficie, base y subbase.

Ecuación N°5

$$SN = a_1 d_1 + a_2 m_2 d_2 + a_3 m_3 d_3$$

Dónde:

- a_1, a_2, a_3 : Coeficientes estructurales de las capas: superficial, base y subbase, respectivamente.
- m_1, m_2 : Coeficientes de drenaje para las capas de base y subbase, respectivamente.
- d_1, d_2, d_3 : Espesores (en centímetros) de las capas: superficial, base y subbase, respectivamente.

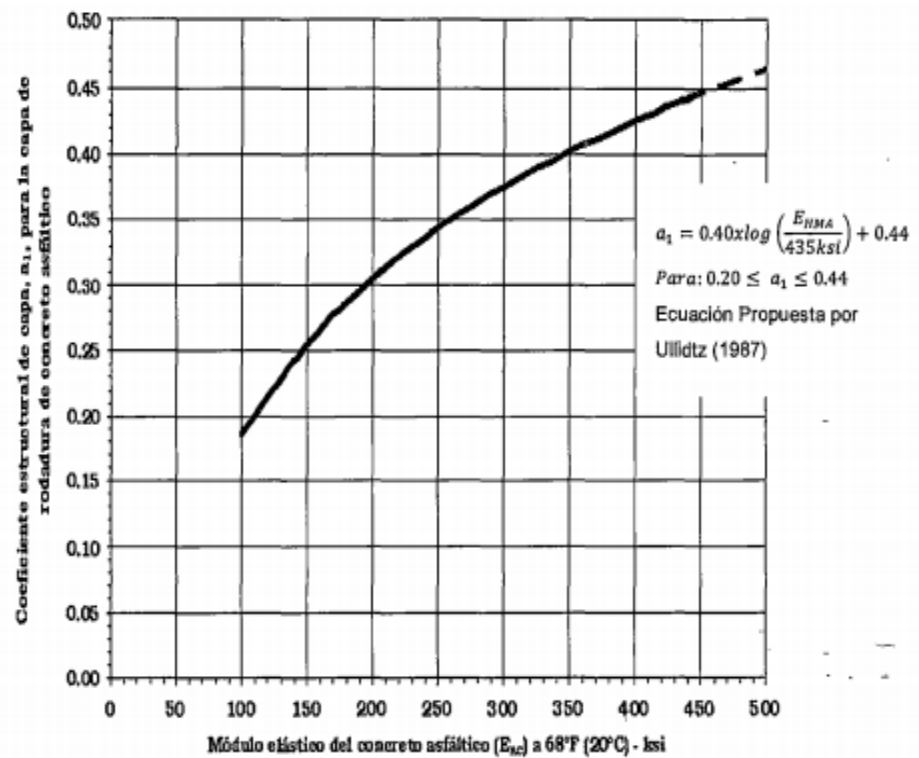
Según AASHTO 1993 la Ecuación N°5 no tiene una solución única, es decir hay muchas combinaciones de espesores de cada capa que dan una solución satisfactoria. El Ingeniero Proyectista, debe realizar un análisis de comportamiento de las alternativas de estructuras de pavimento seleccionadas, de tal manera que permita decidir por la alternativa que presente los mejores valores de niveles de servicio, funcionales y estructurales, menores a los admisibles, en relación al tránsito que debe soportar la calzada.

Conocido el Número Estructural requerido (SNr), deberá ser menor o igual al Número Estructural Total (SN) y que deberá satisfacer la estructura total del pavimento, el dimensionamiento, en general, se reduce a un problema de tipo aritmético, ya que, a_1, a_2, a_3, m_2 y m_3 , son valores conocidos, y, d_1, d_2, d_3 son valores asumidos de tal manera que, efectuadas las operaciones indicadas en la

Ecuación N°5, se deberá cumplir con la siguiente desigualdad.

$$SN_{req} \leq SN_{Final} = SN_{Propuesto}$$

Para la obtención de los coeficientes estructurales de capa deberán utilizarse las Figura N°25, Figura N°26 y Figura N°27, en donde se representan valores de correlaciones hasta de cinco diferentes pruebas de laboratorio: Módulo Elástico, Texas Triaxial, CBR y Estabilidad Marshall. Para obtener el Coeficiente Estructural de Materiales Estabilizados con Asfalto Espumado se utilizó la Figura N°25.



Fuente: (Vásquez Varela, 2014, pág. 40)

Figura N°25: Coeficiente estructural de capa para el concreto asfáltico
 Fuente: Adaptado de Vásquez (2014)

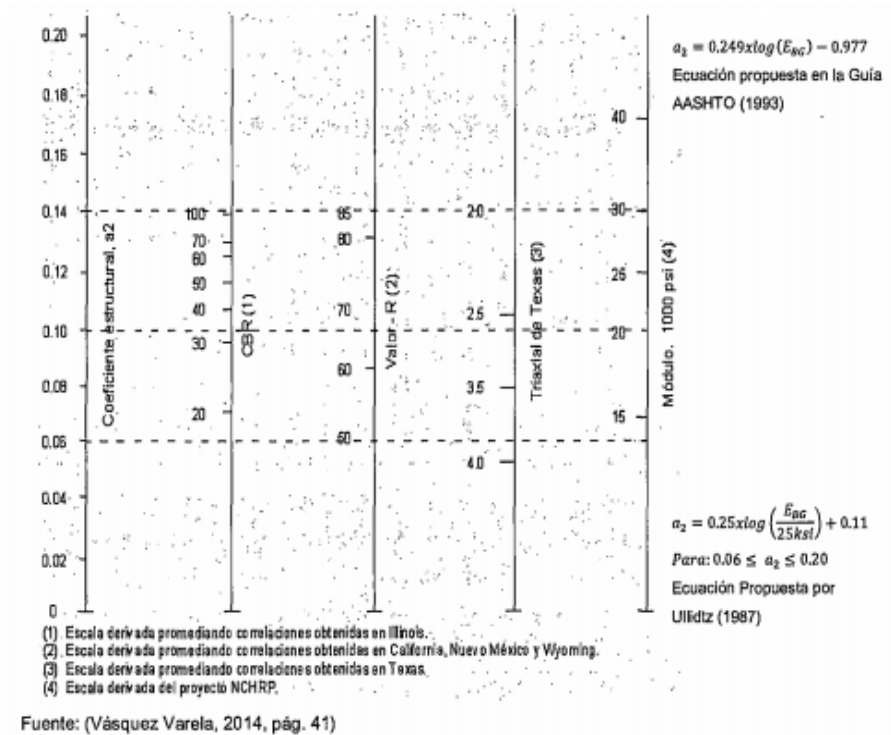


Figura N°26: Coeficiente estructural de capa para la base granular
Fuente: Adaptado de Vásquez (2014)

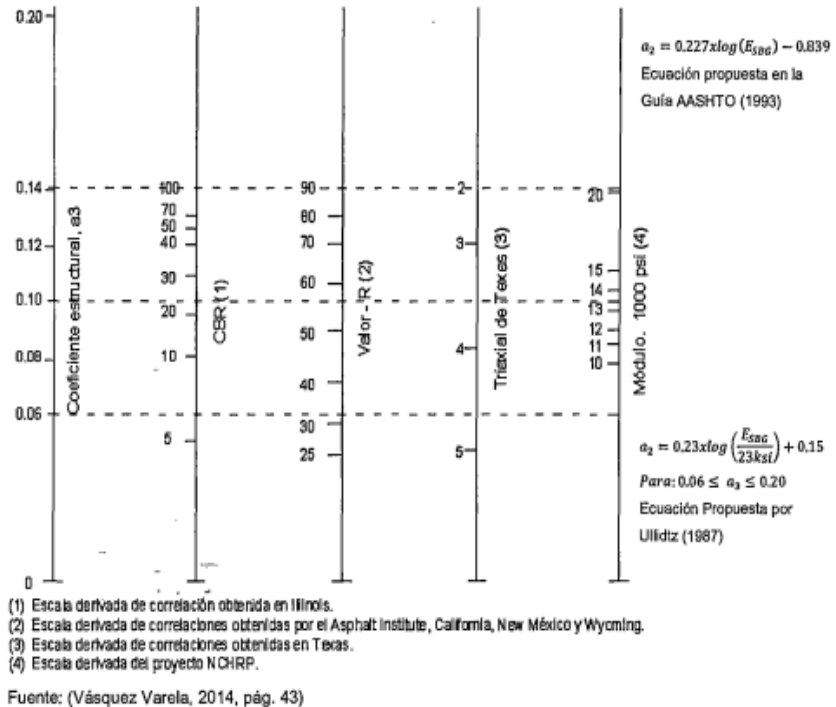


Figura N°27: Coeficiente estructural de capa para la subbase granular
Fuente: Adaptado de Vásquez (2014)

Tabla N°12: Coeficiente de drenaje de bases y sub base granulares

pro cm	0,051				0,063	0,083	0,103	0,120	0,140
pro inch	0,13				0,16	0,21	0,26	0,30	0,35
COEFICIENTES ESTRUCTURALES DESPUÉS DE LA ESTABILIZACION									
RANGOS REPRESENTATIVOS DE RIGIDEZ									
Rigidez Inicial Fase 1 (MPa)	500				750	1000	1500	2000	3000
Rigidez Permanente Fase 2 (MPa)	250				450	600	800	1000	1500
Resistencia a la tracción indirecta (kPa)	100				150	200	300	400	500
CARACTERÍSTICAS ESPERADAS DEL MATERIAL (DESPUÉS DE LA ESTABILIZACION)									
<p>Nota: 1. Para un tráfico de diseño mayor a 300.000 ESALs la resistencia a la tracción indirecta (TS) siempre debería obtenerse a partir de un diseño de mezclas en laboratorio. 2. Ver la tabla de abajo para una Razón de Tensiones adecuada (TSR)</p>									

Fuente: Adaptado de Wirtgen (2004)

- Aplicación del método de diseño AASHTO 1993

Se verifico el diseño estructural del pavimento realizado en la fase pre operativa al aplicar el reciclado de pavimentos con la tecnología de asfalto espumado (RPTAE) con los parámetros definidos en la sección 3.6.1 , para un periodo de 5 años, en donde se estableció que la alternativa de colocar la base granular estabilizada con asfalto espumado y mortero asfaltico (micropavimento), según los espesores propuestos resultan los más adecuados para cubrir las solicitudes de carga por tráfico, clima y geografía, que son característicos de la vía en estudio para ese periodo de diseño.

Tabla N°13: Coeficiente de drenaje de bases y sub base granulares

Técnica de RPTAE	
Capas	Coefficiente
Sub Base Granular	0.11
Base Estabilizado	0.26
Mortero Asfaltico	0.00

Fuente: Adaptado del Ministerio de Transportes y Comunicaciones – MTC (2010)

2.3 Estudios Previos de la Carretera a Estudiar

2.3.1 Ubicación:

La carretera Conococha - Huaraz se encuentra ubicada en el Departamento de Ancash, Provincias de Recuay y Huaraz. Esta vía tiene como punto de inicio en el km 491 + 760 (Ruta PE-3N) en el centro poblado de Conococha que empalma con el Km 122+285.95 (Ruta PE-16) de la carretera Pativilca - Conococha perteneciente a las Provincias de Barranca y Bolognesi; y finaliza en el Km 570+260 al final del Puente Tacllan de la Provincia de Huaraz.

2.3.2 Coordenadas y altitud:

Las ubicaciones georreferenciales y longitudes referenciales de los puntos notables del Corredor Vial han sido tomadas mediante un GPS (Instrumento de la DGCF) y un Odómetro (Instrumento de Provias Nacional), replanteados en campo, junto con la Jefatura Zonal, Supervisión y el Contratista Conservador (Consorcio Cosapi- Translei), en donde se han determinado los puntos geográficos ubicados del inicio y final del Corredor Vial correspondientes al Punto Conococha y a Inicio de Zona Urbana (ZU) de la Provincia de Huaraz (Pte.Tacllan), en la cual se determinaron las coordenadas geográficas de la vía (ver Tabla N°14).

Tabla N°14: Coordenadas de la carretera Conococha - Huaraz

Lugar	Ruta	Km	Longitud	Latitud	Altitud
Punto Conococha	PE-3N	491+760	-77.293325595	-10.121944311	4096.511
Inicio ZU-Huaraz (Pte.Tacllan)	PE-3N	570+266	-77.531781008	-9.540744375	3052.324

Fuente: Adaptado de DGCF (2014)

2.3.3 Condiciones climáticas:

La temperatura mínima promedio multianual presenta variaciones entre los 14 y 16 °C en la parte baja de la Cuenca, adyacente al mar.(Provincia de Santa). En la parte media, en el valle, la temperatura mínima anual oscila entre 4 y 14 °C, y en las partes ubicadas por encima de los 4,000 m.s.n.m, correspondiente a las nacientes del Río Santa (sector Sur) y las áreas glaciares, la temperatura mínima es menor a 4 °C. La precipitación total multianual presenta valores

desde 5 mm /año (parte baja de la cuenca; zona costa), hasta 1,400 mm/año (parte alta de la cuenca del Río Santa - Conocochoa) (SENAMHI).

2.3.4 Clasificación de la vía:

Según su funcionalidad, la carretera pertenece a la Ruta Nacional (PE-3N), específicamente a la carretera longitudinal de la sierra, está clasificada como una carretera que pertenece a la Red Vial Nacional (RNV).

De acuerdo a la demanda la carretera Conocochoa - Catac, corresponde a una clasificación de segundo Clase cuyo IMDA (2000 - 400 veh/día), en tanto que la carretera Catac - Huaraz tiene un IMDA (4000 - 2001) veh/día, que pertenece a una clasificación de primera clase. Los datos de IMDA fueron tomados del último relevamiento de información (ver Cuadro N°4. 9), en tanto que para la clasificación de orografía corresponde a tipo2 (ondulado).

2.4 Definición de términos básicos

2.4.1 Reciclado de Pavimentos

Se entiende por reciclado la reutilización de materiales que conforman (capas) un pavimento existente, mediante procesos especiales, con la finalidad de mejorar sus propiedades y reincorporarse en la estructura. El reciclado puede ejecutarse en frío o en caliente. En ambos casos puede hacerse en obra, o transportando el material a una planta donde es procesado, bien en caliente o en frío. Según el MOPC de República Dominicana (2016), los objetivos principales son:

- Garantizar seguridad al tránsito
- Dar comodidad a la circulación sobre el pavimento
- Preservar la integridad de la estructura del pavimento
- Preservar la integridad de la carpeta asfáltica

2.4.2 Asfalto Espumado

El asfalto espumado consiste en calentar asfalto a una temperatura entre 155 °C y 175 °C, donde se mezcla con una pequeña cantidad de agua atomizada en una cámara de expansión y aire a una presión aproximada de 5 bares (100 kPa).

Cuando las partículas de agua entran en contacto con el asfalto caliente, la energía calórica del asfalto se transfiere al agua. Tan pronto como el agua alcanza su punto de ebullición, esta cambia de estado y al hacerlo, crea una burbuja con una delgada película de asfalto llena con vapor de agua”. (Universidad de Costa Rica, 2020, p. 30).

2.4.3 Medio Ambiente

“Se entiende por medio ambiente un complejo entramado de relaciones entre factores físicos, biofísicos, sociales y culturales en el que ocurren las relaciones que conlleva la actividad humana y social. Los factores físicos se refieren a todo lo inerte presente en el planeta, los biofísicos abarcan todos los seres vivos, lo social se refiere a las estructuras organizativas de las especies, y lo cultural engloba finalmente todo lo hecho por el hombre.” (Muñoz et al., 2018, p.15)

CAPÍTULO IV: SISTEMA DE HIPÓTESIS

4.1 Hipótesis

4.1.1 Hipótesis general

El uso de la Técnica del reciclado con asfalto espumado tiene como principales ventajas el aporte técnico - ecológico, así como también de ser una buena opción al uso de las técnicas tradicionales.

4.1.2 Hipótesis específicas

- a) Una de las mayores ventajas al usar la Técnica del Asfalto Espumado es que produce un material viscoelástico que posee una flexibilidad mejorada y resistencia a la deformación.
- b) La adecuada incorporación de material como cemento o asfalto en esta técnica nos permitirá obtener un pavimento flexible que podrá soportar las cargas ejercidas por el transporte pesado.
- c) Usando la técnica del reciclado con asfalto espumado podemos reducir el impacto ambiental en la construcción de pavimentos.

4.2 Variable

4.2.1 Definición conceptual de las variables

Variable Dependiente:

- Técnica del reciclado con asfalto espumado

Variable Independiente:

- Rehabilitación del pavimento

4.2.2 Operacionalización de las variables

Se observa la operacionalización de las variables ya mencionadas en el ítem 4.2.2 en la tabla N.º 15:

Tabla N°15: Operacionalización de Variables

VARIABLE	DEFINICION	DEFINICION OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ESCALA DE MEDICION	UNIDAD DE MEDIDA	ESCALA	INSTRUMENTO
INDEPENDIENTE	Se logra mediante un proceso, en el cual se inyecta una pequeña cantidad de agua fría y aire comprimido a una masa de asfalto en caliente dentro de una cámara de expansión generando espontáneamente espuma.	Son los materiales de pavimento retirados o reprocesados que contienen asfalto o agregados. Estos materiales se generan cuando se extrae la carpeta asfáltica para la reconstrucción.	Factores del reciclado de asfalto espumado	<ul style="list-style-type: none"> - Temperatura del asfalto - Dosis de agua inyectada - Presión del asfalto en cámara de expansión - Viscosidad del asfalto 	Temperatura Agua inyectada Presión	C%BAR	cuantitativa continua	Formato de laboratorio
Técnica del reciclado con asfalto espumado								
DEPENDIENTE	Es el proceso por medio del cual la estructura del pavimento, es restaurada a su condición original de soporte.	Técnica de rehabilitación de carreteras, que consiste en la reutilización de los materiales procedentes de las capas del pavimento que ya han estado en servicio, pero que mezclados homogéneamente con un nuevo ligando y ciertos aditivos, tienen el potencial de ser reutilizados.	Caracterización de las propiedades del asfalto espumado	<ul style="list-style-type: none"> -Razón del expansión (Ex) -Vida media (t/2) 	Razón numérica Tiempo	numérico segundos (s)	adimensional cuantitativa continua	Formato de laboratorio
Rehabilitación del pavimento								

Fuente: Elaboración Propia

CAPÍTULO V: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACION

5.1 Enfoque

Enfoque Cuantitativo, Hernández et al. (2014) tiene como concepto que son procedimientos que tienen una secuencia y necesitan ser probados. Toda etapa es esencial para el siguiente, es decir ningún paso puede saltarse. Se necesita un estricto orden, sin embargo, algunas etapas pueden redefinirse. Primero se delimita una idea, luego se establecen objetivos y preguntas de investigación. Posteriormente se realiza el marco teórico, luego se proponen hipótesis y se delimitan las variables de la investigación, posteriormente se plantea el diseño para probarlas, se piden variables en un contexto determinado. Finalmente se analizan los resultados usando métodos estadísticos y se logra conclusiones con respecto a las hipótesis planteadas.

5.2 Tipo, método y diseño de la investigación

5.2.1 Tipo

La investigación es un conjunto de procesos sistemáticos, críticos y empíricos que se aplican al estudio de un fenómeno o problema. “La investigación básica, que es la que realiza conocimientos y teorías” (Hernández et al., 2014).

El presente estudio es una investigación básica, debido a que se busca conocer las ventajas técnicas, ambientales y económicas que puede traer consigo la aplicación de la Técnica del Reciclado con Asfalto Espumado en relación de los fundamentos teórico, técnicos y métodos de la aplicación de la misma en el Perú.

5.2.2 Método de investigación

Hernández et al. (2014) define que: La finalidad del investigador radica en la descripción, fenómeno, situaciones, contextos y sucesos. Los estudios descriptivos tienen como finalidad recopilar información ya sea independiente o conjunta de los conceptos o variables de la investigación (p. 92).

Se realizará una investigación descriptiva dado que se realizará el estudio y análisis de los fundamentos teóricos, técnicos y métodos de la aplicación de la técnica de reciclado de asfalto espumado.

5.2.3 Diseño de la investigación

Según Hernández et al (2014), un diseño no experimental no hace variar las variables independientes de manera intencional para observar las consecuencias que tenga sobre otra variable (p. 152).

“Lo que hacemos en la investigación no experimental es observar fenómenos tal como se dan en su contexto natural, para analizarlos” (The SAGE Glossary of the Social and Behavioral Sciences, 2009, citada en Hernández et al., 2014).

Bajo este contexto, la presente investigación es un diseño no experimental.

5.3 Población de estudio

El presente trabajo de investigación presenta como población de estudio y tamaño de la muestra a los estudios y trabajos de investigación realizados anteriormente de diferentes universidades nacionales e internacionales, además de artículos, libros y fuentes bibliográficas que cuentan con respaldo institucional. Todas estas relacionadas a la aplicación de la técnica del reciclado con asfalto espumado.

La población estuvo constituida por pavimentos con carpeta de asfalto en mal estado con la finalidad de rehabilitarlas usando la técnica del reciclado de asfalto espumado. De los que se han recopilado 8 tesis a nivel nacional, 5 tesis a nivel internacional y 3 documentos internacionales; Los cuales nos brindarán la información necesaria para la elaboración de este trabajo de investigación.

5.4 Diseño muestral

La muestra se consideró a los pavimentos flexibles expuesto a tráfico medio con transporte pesado en la zona de Conococha – Huaraz, se tomó en cuenta las carreteras en un estado de deterioro y con la finalidad de reciclar el pavimento con asfalto espumado.

5.5 Relación entre variables

La relación entre variables es de causa efecto ya que el análisis de la rehabilitación de pavimento depende de la técnica del reciclado de asfalto espumado

5.6 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

5.6.1 Tipos de técnicas e instrumentos

Análisis Documental: La información fue recaudada por diversas fuentes bibliográficas tales como tesis, documentos, artículos especializados, libros y páginas web

5.6.2 Criterios de validez y confiabilidad de los instrumentos

El análisis de la información bibliográfica seleccionada se recopiló de fuentes reconocidas y con respaldo institucional.

5.7 Procedimiento de la recolección de datos

La información adquirida se muestra en una matriz bibliográfica que sirvió para organizar y clasificar (autor, país, base de datos) adecuadamente lo revisado.

5.8 Técnicas para el procesamiento y el análisis de datos

La técnica de procesamiento y análisis de datos de la investigación bibliográfica se basa en recopilar, clasificar y procesar información en una matriz bibliográfica; empleando especificaciones técnicas, caracterizaciones y resultados obtenidos con anterioridad.

CAPÍTULO VI: PRESENTACION Y ANALISIS DE RESULTADOS

DE LA INVESTIGACION

5.1 Análisis de Resultados de la Investigación

Hacemos referencia a una carretera pavimentada con asfalto convencional que inicia desde Conococha a Catac en el departamento de Ancash con un trecho aproximado de 49 kilómetros a una altura de 4,000 msnm, con un clima de 16 °C a 4 °C dependiendo de la estación y una precipitación total multianual desde 5 mm /año (parte baja de la cuenca; zona costa), hasta 1,4 mm/año.

5.1.1 Determinación del Índice de Condición de Pavimento

El Índice de Condición del Pavimento (por su sigla en inglés Pavement Condition Index - PCI), nos facilita la evaluación de pavimentos flexibles y rígidos, el cual, se desarrolla para obtener el índice de integridad del pavimento y la condición operacional de la superficie, que permita determinar las necesidades de mantenimiento y reparación en función a la condición real del pavimento. El PCI es un índice numérico que varía desde cero (0), para un pavimento fallado, hasta cien (100) para un pavimento en perfectas condiciones, se clasifica según como se muestra en la Tabla N°16

Tabla N°16: Rangos de calificación del PCI

Rango de clasificaciones de PCI	
100	Bueno
85	Satisfactorio
70	Mala
55	Pobre
40	Muy Pobre
25	Serio
10	Fallido
0	

Fuente: Norma ASTM D6433-18

- Del Km. 115+250 al Km. 116+300
- Del Km. 119+800 al Km. 120+000

El espacio muestral hallado equivale al 7 % de la superficie total.



Figura N°28: Levantamiento de fallas 1 en la carpeta de rodadura
Fuente: Adaptado de Thenoux (2010)



Figura N°29: Levantamiento de fallas 2 en la carpeta de rodadura
Fuente: Adaptado de Thenoux (2010)

5.1.1.2 Calculo del PCI de las unidades de muestreo para inspección

Rodríguez (2009) consideró:

- a) Sumar la cantidad total de cada tipo de falla para cada nivel de severidad, y registrar esta información en la columna “Total de Severidades”. Las unidades para las cantidades deben ser en metro cuadrado, metro lineal, o número de ocurrencia, dependiendo del tipo de falla.
- b) Dividir la cantidad total de cada tipo de falla en cada nivel de severidad (columna total de severidades) entre el área total de la unidad de muestra y multiplicar el resultado por 100 para obtener la densidad porcentual.
- c) Determinar el máximo valor deducido corregido (CDV), mediante los siguientes pasos:
- Si ninguno o solamente un valor deducido individual es mayor que dos. El valor total es usado en lugar del máximo CDV para determinar el PCI; de otro modo, el máximo CDV debe ser determinado usando los siguientes pasos.
 - Crear una lista de valores deducidos individuales en orden descendente.
 - Determinar el número de deducciones permisibles, “m”, de la Figura N°30., o empleando la Ecuación N°6:

$$m = 1 + \left(\frac{9}{98}\right) 100 - HDV \leq 10$$

Donde:

m = número máximo admisible de valores deducidos incluyendo fracciones (debe ser menor o igual a diez).

HDV = el mayor valor deducido individual para la unidad de muestra.

- El número de valores deducidos individuales es reducido al máximo admisible de valores deducidos “m”, incluyendo su parte fraccionaria. Si contamos con un número de valores deducidos menor a “m”, todos los valores deducidos deben ser usados.

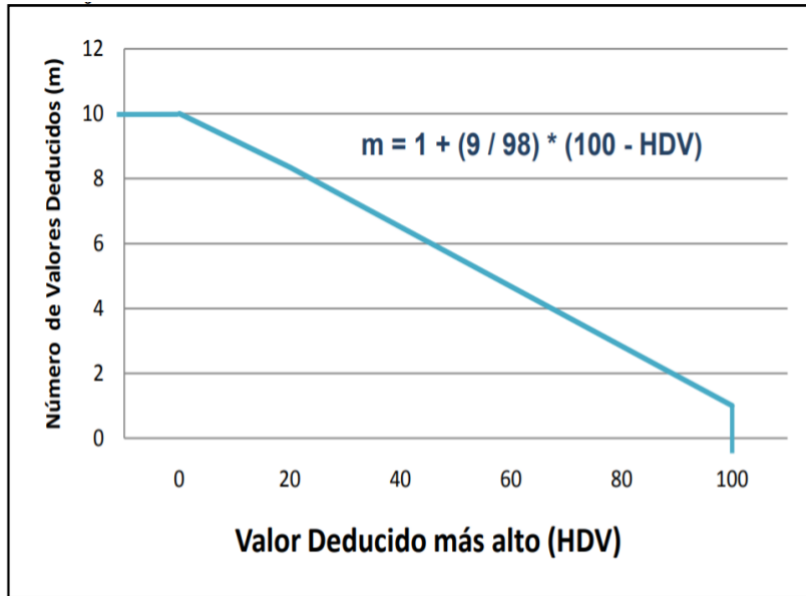


Figura N°30: Ajuste del número de valores deducidos “m”

Fuente: Procedimiento estándar para la inspección del índice de condición del pavimento en caminos y estacionamientos ASTM D6433-03

5.1.1.3 Clasificación de la Condición del Pavimento

En la Figura 31, 32, 33, 34, 35 mostrados a continuación, el valor del PCI a lo largo de toda la vía entre las progresivas 0+000 y 111+500 es en promedio 69, dicho valor clasifica al pavimento como Muy Bueno.

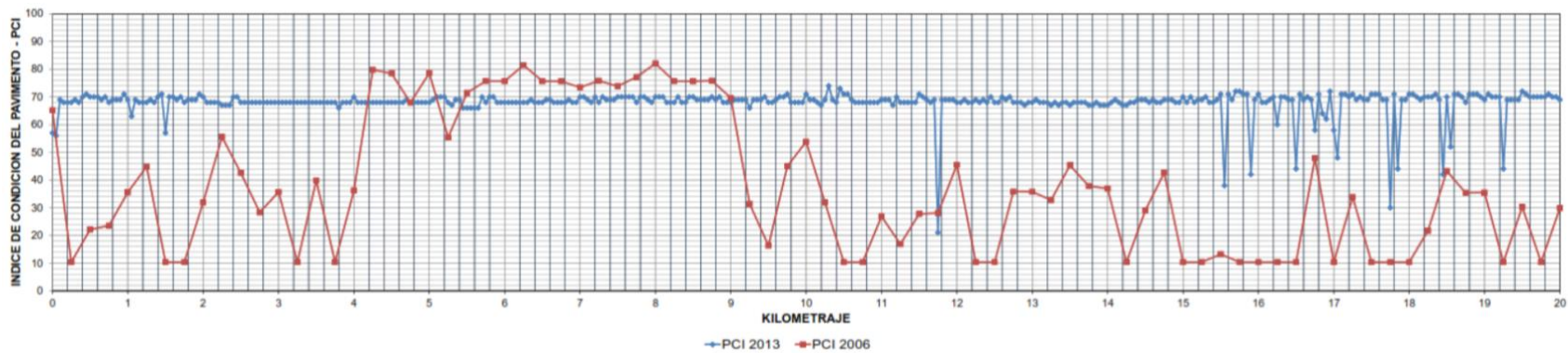


Figura N°31: Gráfico 0+000 – 20+000 (Carretera Conococha - Yanacancha)
 Fuente: Adaptado de EPCM Consulting S.A.C. (2013)

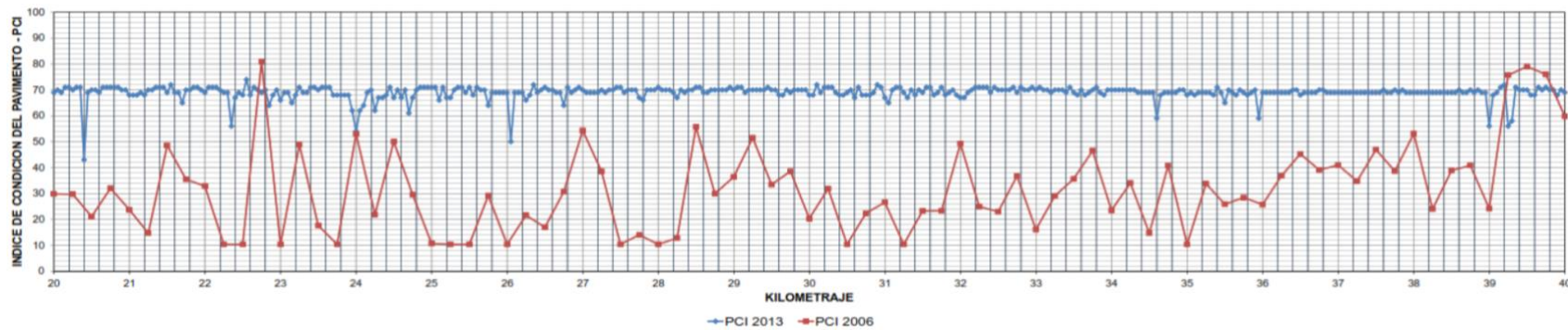


Figura N°32: Gráfico 20+000-40+000 (Carretera Conococha - Yanacancha)
 Fuente: Adaptado de EPCM Consulting S.A.C. (2013)

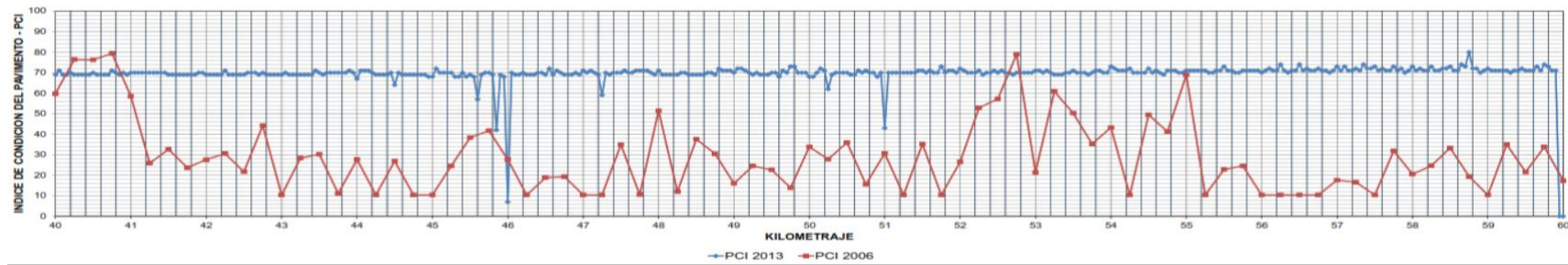


Figura N°33: Gráfico 40+000-60+000 (Carretera Conococha - Yanacancha)
 Fuente: Adaptado de EPCM Consulting S.A.C. (2013)

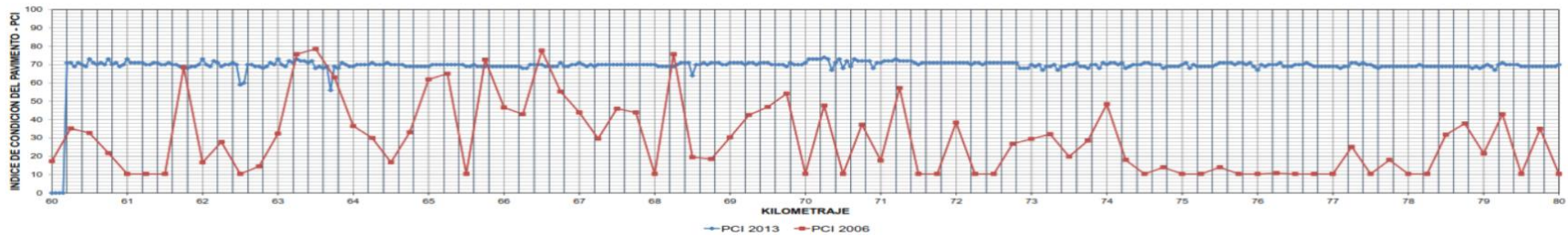


Figura N°34: Gráfico 60+000-80+000 (Carretera Conococha - Yanacancha)
 Fuente: Adaptado de EPCM Consulting S.A.C. (2013)

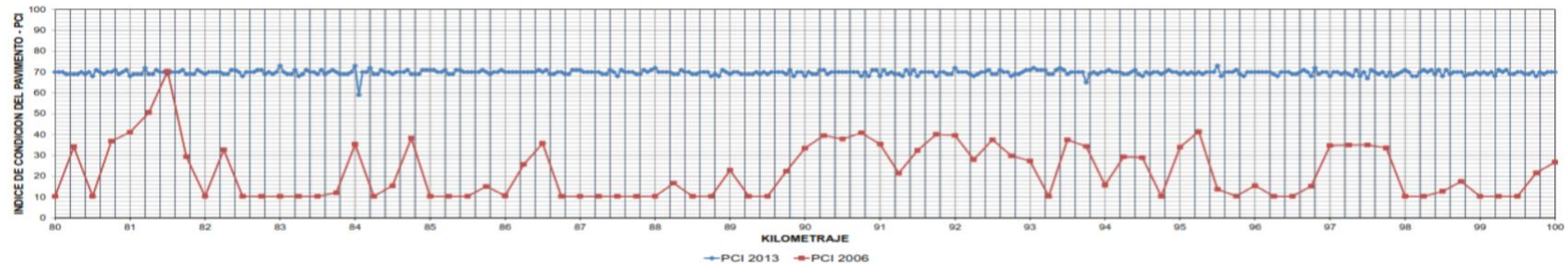


Figura N°35: Gráfico 80+000-100+000 (Carretera Conococha - Yanacancha)
 Fuente: Adaptado de EPCM Consulting S.A.C. (2013)

En la siguiente Figura N°35, podemos ver que a partir del Km 111+500 el valor de PCI baja considerablemente llegando a un valor promedio de 34, el cual clasifica al pavimento como “Pobre”; esto es causa de que en ese sector el clima es más severo, ya que se encuentra a una altura aproximada de 4700 m.s.n.m., teniendo épocas de caída de granizo, y a la congestión de vehículos mineros de gran peso, que aplican una carga puntual siendo esta la más perjudicial para el pavimento, dicho sector es la entrada para el campamento minero.

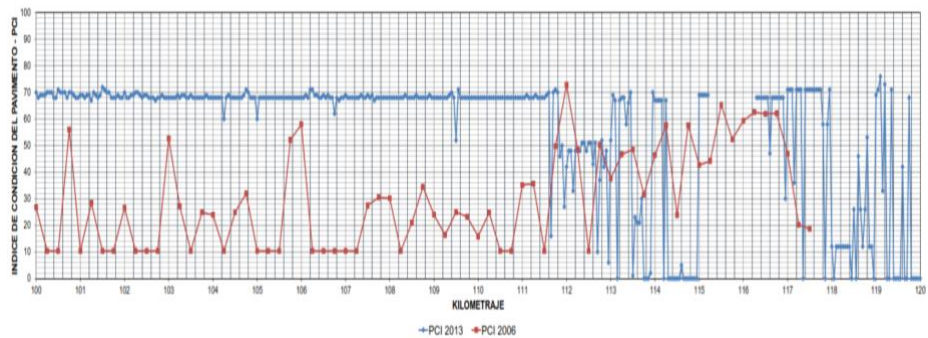


Figura N°36: Gráfico 100+000-120+000 (Carretera Conococha - Yanacancha)
Fuente: Adaptado de EPCM Consulting S.A.C. (2013)

Se concluye que el pavimento tuvo un buen comportamiento para estar sometido a carga pesada y un clima adverso, ya que la zona llega hasta los 4700 m.s.n.m., en promedio el valor del PCI de toda la carretera sería de 67 superando el valor mínimo establecido de 55.

5.1.2 Ventajas Técnicas de la Aplicación

5.1.2.1 Diseño de Mezclas

El proceso de diseño se inició con el estudio de los componentes del paquete estructural existente en la carretera, mediante la prospección de calicatas en la plataforma para la identificación y caracterización de los materiales disponibles para el reciclado, los cuales serán parte primordial de los diseños de mezcla con asfalto espumado. La metodología se basó en la extracción (en tres bolillos) de muestras de cada capa de material, desde la superficie de rodadura y la base granular (involucrados en el reciclado) hasta la subrasante, con

espaciamiento de 0.5 km para calicatas superficiales y de 1.0 km para calicatas profundas, a lo largo de todo el tramo de la vía.

Producto de los respectivos ensayos de laboratorio ejecutados en dichas muestras, se determinó que el 94.0 % de los suelos de la capa subyacente a la rodadura existente pertenecen al tipo A-1-a (0) y el 6.0 % corresponde a materiales del tipo A-2-4 (0); es decir, que no solo se cuenta con materiales de buena calidad, sino que además, existe la adecuada homogeneidad para elaborar los diseños de mezcla con asfalto espumado.

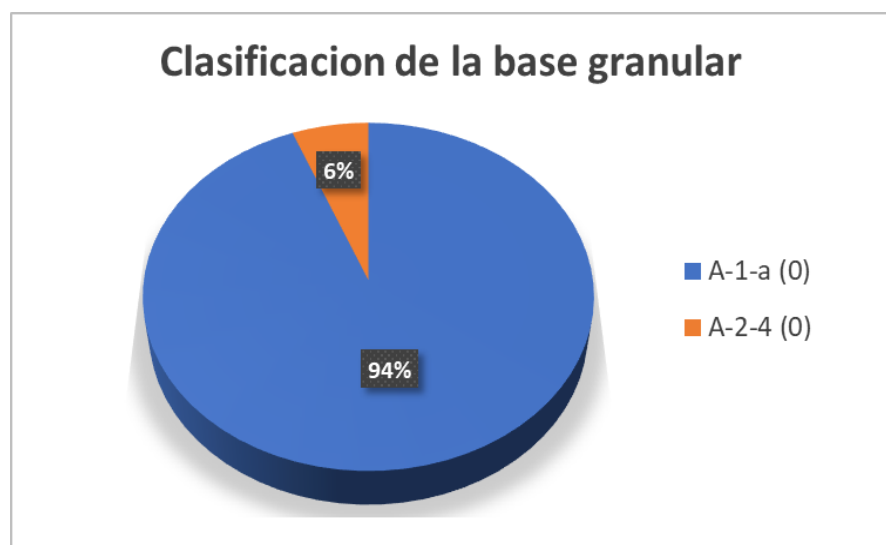


Figura N°37: Clasificación de la base granular
Fuente: Adaptado de MTC. (2010)

En base al conocimiento de la calidad de los materiales a reciclar (determinado en la fase de exploración), y mediante el análisis del peso unitario de sus componentes y la relación del espesor de cada uno respecto al espesor total del paquete de reciclado (0.175 m. y 0.20 m de acuerdo a cada zona determinada en el diseño estructural) se determinó, como se muestra en las Tabla N°3. 3 y Tabla N°3. 4, los porcentajes de aporte para las mezclas a ser recreadas en laboratorio WBL10S para los diseños de mezcla con asfalto espumado.

Las proporciones determinadas fueron: 43.34 % de material de superficie de rodadura y de 56.66 % de material de base granular existentes para los sectores con espesores de diseño de 0.175 m.

Asimismo, en los sectores que según ha sido determinado en el dimensionamiento de capas, recibirán un aporte de 0.03 m. de material de base, las proporciones son de 14.90 % de aporte granular, 35.44 % y 49.66 % de material de rodadura y base existente, respectivamente.

Tabla N°18: Proporciones de aporte de materiales para diseños de mezcla e=0.175

Material Componente	Peso Unitario	Espesor a Reciclar	Aporte en Mezcla
Rodadura Existente	2.284	0.075	43.34 %
Base Granular Existente	2.240	0.10	56.66%

Fuente: Adaptado de MTC (2010)

Tabla N°19: Proporciones de aporte de materiales para diseños de mezcla e=0.20

Material Componente	Peso Unitario	Espesor a Reciclar	Aporte en Mezcla
Aporte de Base Granular	2.240	0.03	14.90%
Rodadura Existente	2.284	0.07	35.44 %
Base Granular Existente	2.240	0.10	49.66 %

Fuente: Adaptado de MTC (2010)

Además, se utilizó el cemento asfáltico PEN 85/100 para espumar, descartándose asfaltos blandos por su mayor susceptibilidad al envejecimiento prematuro y asfaltos duros pues producen espuma de mala calidad, generando una dispersión pobre y es compatible con los agregados pétreos, el cual cumplió con los requisitos de calidad establecidos en las

Especificaciones Técnicas Generales (EG- 2000) (ver Anexo N°3.1). También se realizó el análisis granulométrico según el huso granulométrico desarrollado en Sudáfrica - TG2 para la (Zona A), siendo adecuado para tratamientos con materiales de amplia variabilidad en su gradación (ver la Grafica N°5.3), su aplicación en el tramo Conococha - Huaraz es factible y verificable en base a la estadística de los resultados de calicatas superficiales y profundas del estudio geotécnico de los suelos realizados en la etapa pre operativa del proyecto. Para representar fielmente la granulometría de los agregados se realizaron muestreos de los tramos de prueba que

fueron fresados con la recicladora Wirtgen WR 2500-S (ver la Figura No 2.28), sin la incorporación de agentes estabilizadores. En el Anexo N°3.2 se visualiza los resultados de las propiedades físicas determinados en laboratorio para la base reciclada.

El ensayo de Proctor Modificado de la mezcla de diseño considerado para el ejemplo de la presente tesis es de reciclado de 100% de RAP, se obtuvo una humedad óptima de 4.9% y CDMS de 2.151 gr/cm³ (ver Anexo N°3.3). Para lograr el valor de la cantidad de agua a agregar en la compactación se debe descontar la humedad natural del material en terreno.

De acuerdo al estudio de suelos y pavimentos, el cual indica que los materiales a reciclar en su conjunto presentan un índice de plasticidad característico IP=3.36, que corresponde a incorporar 1.0% de Cemento Portland tipo 1 (ver la Tábla N°2.12), el cual se esparció sobre la superficie a reciclar por un periodo de al menos 2 horas antes de iniciar el proceso de reciclado.

a) Diseño de la espuma óptima

En esta etapa son determinadas la temperatura del asfalto y la cantidad de agua de inyección que optimizan la razón de expansión y la vida media.

Para la obtención de valores correctos de cantidad de asfalto y agua inyectada se debe calibrar el equipo según las especificaciones del equipo de laboratorio de espumado, después de obtenidos los parámetros del equipo se procede a poner en marcha el equipo de espumado (ver Figura N°3. 1) y lograr los flujos correctos de agua inyectada para cada variación de porcentaje aplicada a un flujo constante de asfalto. El ajuste de flujómetro se efectúa en forma manual.

Para este ajuste de flujo de agua se obtiene primero el flujo de asfalto mediante la Ecuación N°3. 11, posteriormente se aplica la Ecuación N°3. 12 para obtener valores de ajuste.

Ecuación N°7. Flujo de Asfalto

$$Q_{Asfalto}(g/s) = \text{Medicion real de } \frac{\text{Peso}}{\text{Tiempo}}$$

Ecuación N°8. Flujo de Agua

$$Q_{Agua}(lt/hr) = \frac{Q_{Asf}(g/s) \times \%_{agua} \times 3,600}{1000}$$

Para este proyecto en particular emplearemos el valor de $t_s = 5$ segundos (tiempo de descarga del asfalto) porque la cantidad de asfalto a utilizar por cada ensayo es de 555g, 563g y 562g, a un flujo de asfalto de 111 g/s, 112.6g/s y 112.4g/s calculado utilizando la Ecuación N°6. A continuación se muestra el proceso teórico de la calibración del agua inyectada, en la Tabla N°20, utilizando para ello la Ecuación N°7 y Ecuación N°8.

Tabla N°20: Flujo de agua inyectada

Flujos de agua estandarizados relativos al flujo de asfalto y porcentaje de agua inyectada									
Flujo asfalto (g/s)	% Agua Inyectada								
	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
111	4.00	5.99	7.99	9.99	11.99	13.99	15.98	17.98	19.98
112.6	4.05	6.08	8.11	10.13	12.16	14.19	16.21	18.24	20.27
112.4	4.05	6.07	8.09	10.12	12.14	14.16	16.19	18.21	20.23

Fuente: Bach. Hilario Eli Abad Quito

La tabla anteriormente expuesta muestra los valores recomendados por el fabricante para cada flujo de asfalto, según la calibración del equipo, el flujo de asfalto es de 112 (g/s), por lo cual se interpolan los valores y así lograr los flujos de agua inyectada correspondientes a cada porcentaje de agua, que son los que se ven en la siguiente tabla.

Tabla N°21: Flujo de agua inyectada (lt/h) para el equipo calibrado

Flujo calibrado de agua para un determinado flujo de asfalto.				
Flujo asfalto (g/s)	% Agua inyectada			
	1.0	2.0	3.0	4.0
112	4.03	8.06	12.10	16.13

Fuente: Elaboración Propia

Ya calibrado el equipo y sus flujos se procede a realizar el diseño óptimo de espuma de asfalto. En seguida se exponen los resultados del diseño óptimo. Cabe señalar que la búsqueda de los valores de espuma óptima se hizo variar la temperatura (160-180°C) de asfalto con diversos contenidos de agua (1.5 - 3.0 %) a fin de encontrar el mejor índice de espumación. En la Figura N°39, se observa las gráficas de diseño para determinación de espumabilidad para temperaturas de T=160°C, T=170°C y T=180°C.

A continuación, en la Tabla N°22 se presentan los resultados de Razón de Expansión y Vida Media obtenidos en el laboratorio WBL10S para este proyecto.

Tabla N°22: Resumen de ensayos de espumación, razón de expansión y vida media

Contenido de Agua (%)	T=160°C		T=170°C		T=180°C	
	Expansión	Vida Media	Expansión	Vida Media	Expansión	Vida Media
1.5	7.7	12.6	9.7	8.0	11.7	6.8
2.0	11.7	9.4	13.3	7.0	14.7	6.3
2.5	16.0	6.0	16.7	5.7	17.3	5.3
3.0	19.7	4.5	21.0	4.0	23.3	4.0

Fuente: Bach. Hilario Eli Abad Quito

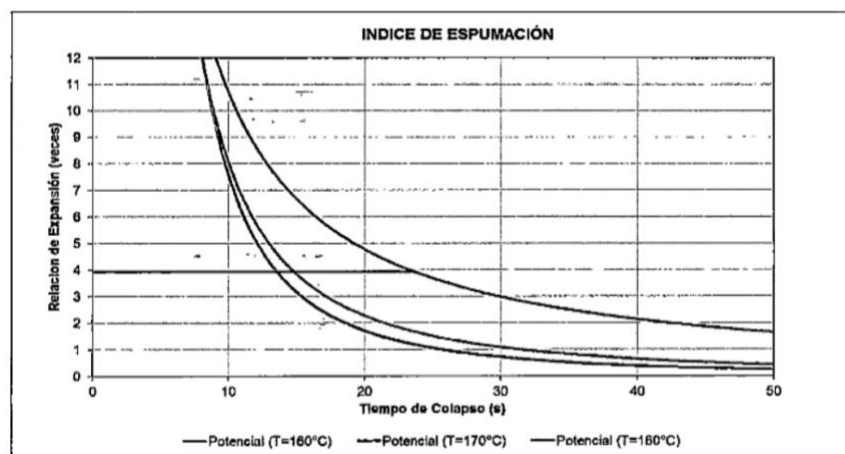


Figura N°38: Determinación de índice de espumación

Fuente: Bach. Hilario Eli Abad Quito

Como se puede apreciar en la Figura N°38 la mayor área delimitada por la curva de colapso, el eje de ordenadas y la mínima expansión aceptable (4.0 veces), es obtenida a 160 °C, es decir el índice de espumación mayor corresponde a dicha temperatura. De misma manera se corrobora utilizando la Ecuación N°2.10, en donde $IE = 110.70$ está en el rango 75 a 150, esto quiere decir que la calidad de la espuma es de moderada a buena y la dispersión de la espuma en el agregado ha de moverse entre los rangos de moderada a buena, dependiendo de la temperatura.

En la Figura N°39 se muestra la determinación del óptimo contenido de agua de espumación a 2.00% para la mejor espuma obtenida a 160° C, a presiones de 4.5 bares en aire y 5 bares para agua.

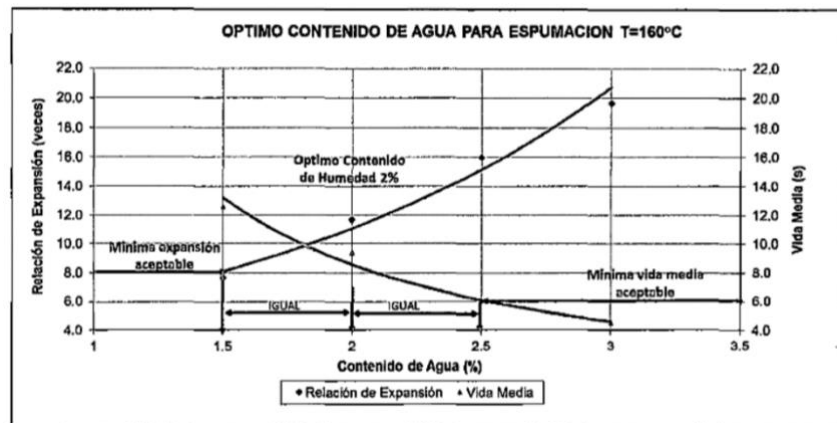


Figura N°39: Determinación del óptimo contenido de agua de espumación para $T=160^{\circ}\text{C}$
Fuente: Elaboración Propia

Finalmente, en la Tabla N°23 tenemos los resultados de las condiciones idóneas de espumación. Las cuales han sido usados en el procedimiento del Diseño de Mezclas

Condiciones Óptimas de Espumación	
Proveedor de asfalto	PETRO PERU
Asfalto	PEN 85/100
Temperatura	160° C
% Agua de espumación	2.00 %
Razón de Expansión Promedio	11.7 > 8 min.
Vida Media Promedio	9.4 > 6 min.
Índice de espumación	110.70 (75<IE<150)

Tabla N°23: Resumen de condiciones óptimas de espumación para la carretera Conococha - Huaraz
Fuente: Adaptado de MTC (2010)

b) Preparación de Mezcla

A continuación, se intenta encontrar la cantidad que maximiza la resistencia a la Tracción Indirecta tanto seca como saturada, de una probeta tipo Marshall fabricada con material reciclado y asfalto espumado. Para conseguir este propósito se sigue el procedimiento de diseño descrito en la sección 3.3. Para ello se utilizó los siguientes datos descritos en los párrafos anteriores.

- P_{Cemento} : Porcentaje de cemento portland a incorporar = 1.0 %
- M_{Nat} : Masa seca al aire con humedad natural = 10,100 gr
- H_{Nat} : Humedad natural del material = 1.0 %
- H_{Proctor} : Contenido de Humedad optimo = 4.9 %

Luego se procede a calcular el peso seco del material y de cemento utilizando la

Ecuación N°3. 1, después se mezcló en seco los agregados con el cemento portland por un minuto en una mezcladora tipo Pugmill, a 60 r.p.m.

$$M_{\text{seca}} = \frac{M_{\text{Nat}}}{\left(1 + \frac{H_{\text{Nat}}}{100}\right)} = \frac{10,100}{\left(1 + \frac{1}{100}\right)} = 10,000 \text{ gr}$$

$$M_{\text{Cemento}} = \left(\frac{P_{\text{Cemento}}}{100}\right) \times (M_{\text{seca}}) = \left(\frac{1}{100}\right) \times 10,000 = 100 \text{ gr}$$

$$M_{\text{seca}} + M_{\text{Cemento}} = 10,000 + 100 = 10,100 \text{ gr}$$

Con el dato obtenido de la ecuación anterior, se calcula el contenido de humedad para la compactación. Después se verifico el agua para mezclar con los agregados y el cemento portland por 2 minutos, a 110 r.p.m. luego se dejó reposar por un periodo de 2 minutos.

$$\begin{aligned} M_{\text{agua}} &= 0.75 \times \left(\frac{H_{\text{Proctor}} - H_{\text{Nat}}}{100}\right) \times (M_{\text{seca}} + M_{\text{Cemento}}) \\ &= 0.75 \times \left(\frac{4.9 - 1}{100}\right) \times 10100 = 292.5 \text{ gr} \end{aligned}$$

Ya obtenidos los datos necesarios para el acondicionamiento del material se obtiene el tiempo de asfalto (tiempo de flujo de asfalto) para variaciones a cada 0.5% desde 1.0% hasta 2.5% hasta determinar el porcentaje adecuado de asfalto, como ejemplo práctico empezamos analizando para 1% de asfalto.

- P_{Asf} : Contenido de asfalto a inyectarse = 1.0 %
- $F_{perdida}$: Valor asociado a la perdida en recipiente y mezclador = 10 % (Boquilla de inyección)
- Cte.: Constante asociado al flujo masico de calibración de equipo = 112 g/s

$$T_{Asfalto} = \frac{\frac{P_{Asf}}{100} \times ((M_{Seco} + M_{Cemento}) \times (1 + \frac{F_{perdida}}{100}))}{Cte.}$$

$$= \frac{\frac{1}{100} \times (10100 \times (1 + \frac{10}{100}))}{112} = 0.99 \text{ seg}$$

El mismo procedimiento se sigue para los demás porcentajes de asfalto 1.5%, 2%, y 2.5%. En la Tabla N°3. 8 se muestra el resumen de tiempo de inyección para los demás porcentajes de asfalto.

Tabla N°24: Tiempo de flujo de asfalto (s)

%Asfalto	M _{Seca} + M _{Cemento}	T _{Asfalto} incl. % Desperdicios
1.0	101.0	0.99
1.5	151.5	1.49
2.0	202.0	1.98
2.5	252.5	2.48

Fuente: Adaptado de MTC (2010)

En una tabla resumen se muestran los datos suficientes y necesarios para lograr realizar la mezcla de RAP con asfalto espumado y fabricar las probetas Marshall.

Tabla N°25: Resumen de datos necesarios para el diseño

Pavimento Asfáltico Recuperado (RAP)	
Masa seca de RAP	10,100 gr
Masa de agua a agregar.	292.5 gr.
Flujo másico fijo de asfalto.	112 gr./s
Flujo óptimo de agua para espumado	8.01 lt./h

Fuente: Adaptado de MTC (2010)

Los últimos valores de la Tabla N°3. 9 son los parámetros que han de ir fijos en el laboratorio móvil WLB10S (parámetros de calibración), para cada uno de los seis lotes escogidos de 10,100 gr.

c) Curado de la mezcla

Con los datos de la Tabla N°3. 8 y Tabla N°3. 9 se fabrican las probetas Marshall para RAP y asfalto espumado (ver Anexo N°3.5). Luego de 24h de su fabricación se desmoldan las seis probetas, realizados por cada % de asfalto inyectado (1 - 2.5%), para medir sus espesores y su volumen por desplazamiento en agua, para luego ser curados en horno por 72 horas a 40°C. Después tres de las probetas son retiradas del horno, para ser ensayados a Tracción Indirecta en seco y las tres restantes para sumergir en baño maría a 25°C para el curado en húmedo por 24 h más. En resumen, los resultados obtenidos se presentan en la Tabla N°3.10.

Tabla N°26: Resumen de resistencia a la tracción indirecta obtenidos de los diseños de mezcla

Contenido (%) de Asfalto Espumado	Densidad (gr/cm ³)	Resistencia Tracción Indirecta		Resistencia Conservada (%)
		Condición Seca (min 200 Kpa)	Condición Húmeda (min 100 Kpa)	
1,00	2.261	338	319	94
1,50	2.243	350	292	83
2,00	2.228	375	297	79
2,50	2.518	408	337	83

Fuente: Adaptado de MTC (2010)

Como se puede apreciar, los resultados de la resistencia a la tracción indirecta (ensayo al que fueron sometidos los seis testigos moldeados de cada mezcla), sobrepasan los requerimientos mínimos exigidos de

200 Kpa en condición seca y 100 Kpa en condición húmeda (tres probetas para cada condición).

Asimismo, los resultados obtenidos en resistencia conservada (TSR) promedio deben ser el 70 % mínimo de resistencia conservada, para reciclados en zonas sobre los 3,000 m.s.n.m, asegurando así un óptimo comportamiento ante las gradientes terminas y precipitaciones severas que imperan esta zona (Fernández, 2010).

El criterio de optimización de inyección de asfalto espumado utilizado para el presente diseño de mezclas, está basado en garantizar el soporte estructural del pavimento, de los coeficientes. estructurales recomendado por Wirtgen y del diseño del pavimento para la carretera en estudio, es necesario asegurar el coeficiente estructural de 0.26/pulg, para un ITS de 300 Kpa (ver el Grafico N°3. 6), por lo que el contenido de inyección de asfalto se establece en 1.5%.

Por lo tanto el tipo de cemento asfaltico adecuado, por altitud y temperatura es PEN 85/100. El porcentaje de agua de espumacion 2.0% a 160°C. La mezcla Ideal para implementar en pista es 1.00% de cemento Portland Tipo 1, con 1.50% de asfalto espumado el aporte de material de base asegura mayores resistencias a la tracción indirecta, por el incremento del coeficiente de fricción.

Thenoux (2010) afirma que para asegurar un proceso constructivo de alto rendimiento y exitoso se requiere cumplir los 3 pasos previos: 1) Organización, 2) Capacitación, 3) Planificación, para cada uno de los equipos involucrados en la técnica de reciclado con el asfalto espumado ver la Figura N°28

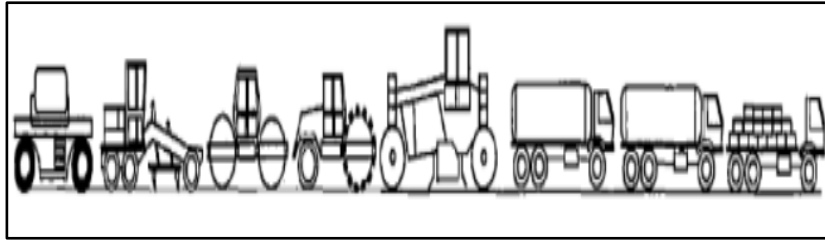


Figura N°40: Planificación del proceso constructivo
Fuente: Elaboración propia

El reciclado de pavimentos es un método constructivo relativamente simple, sin embargo, y como en todas las operaciones de alto rendimiento, el trabajo debe ser correctamente administrado y planificado para que se pueda alcanzar y sacar provecho a los altos rendimientos que puede lograr las maquinarias empleadas. El proceso constructivo en el mantenimiento periódico del corredor vial Conococha - Huaraz estuvo definido por una serie de esquemas de trabajo las cuales se detallan en las siguientes líneas.

- Se implementó en primer lugar la logística que empezó en la capacitación del personal de campo y oficinas, realizando también programación de recursos, equipos, programación de despachos de materiales como cemento y Asfalto, a las cuadrillas de topografía de las zonas de trabajo.
- Inicialmente en campo se efectuó los trabajos de topografía en la vía existente con el fin de determinar zonas posibles de relleno (máximo 3 cm), ya que al existir huecos o deformaciones, eran necesario que estos sean previamente nivelados, ya que de otra manera, la recicladora calcaría el estado de la vía dejando a su paso nuevamente las deformaciones.
- Posteriormente, se efectuaron trabajos de demarcación de los carriles y sobrecanchos con el fin de poder distribuir el Cemento Portland tipo 1, el Asfalto y el Agua, además con la finalidad de que no vayan a quedar sectores con excesos o defectos de alguno de los materiales que pueden llegar a causar acolchonamientos, rigideces indeseadas o excesivos consumos de materiales, para esto la topografía marco los anchos en la vía haciendo coincidir con los anchos de la Recicladora y los sectores de traslapo para que en ellos

no exista duplicidad de colocación de materiales y luego poder iniciar los trabajos de Reciclado, los cuales consisten en enganchar por medio de tiros fijos (Mangueras de flujo) a la Recicladora, al Camión Cisterna con Asfalto y al Camión Cisterna con Agua.

En la Figura N° 41 se muestra un croquis representativo del trabajo que se realizó en el mantenimiento periódico del corredor vial, tomando en cuenta el ancho de la vía y el ancho del tambor fresador de la recicladora. El ancho de la vía existente y el anchó del tambor de la recicladora utilizado en el mantenimiento periódico de la vía en estudio son de 7.20 m y 2.5 m respectivamente.

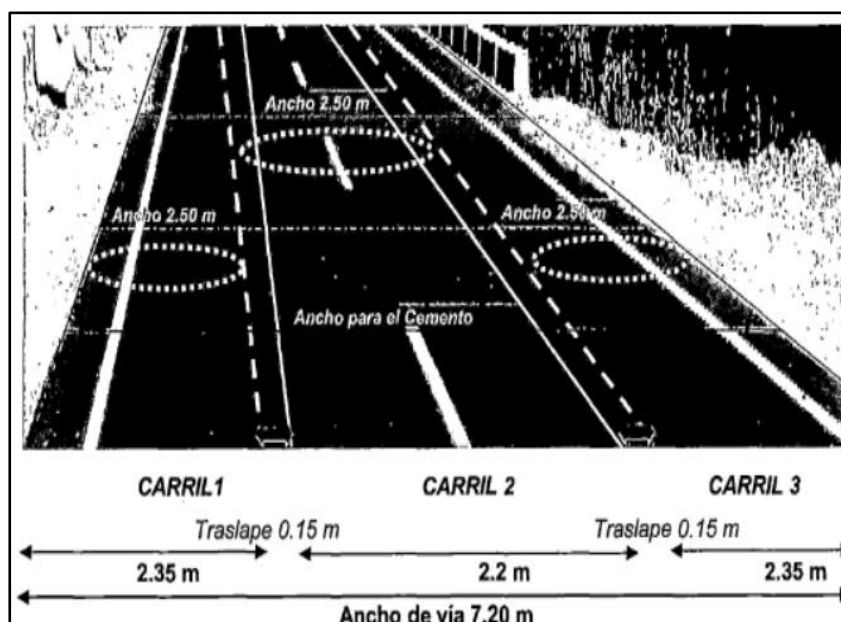


Figura N°41: Delimitación de cortes y traslapos en carpeta asfálticas
Fuente: Adaptado de Thenoux (2010)

El reciclado de pavimento con asfalto espumado se realizó en tres fajas con traslapos de 0.15 m a 0.20 m en zonas tangentes; y de 0.35 m a 0.50 m en las zonas de curva, donde por el sobrecorte de la vía, fueron necesarias cuatro e incluso hasta cinco pasadas (curvas de volteo y en curvas contra curvas). El material adicionado sobre la calzada, para la base granular en tramos críticos (caso el tramo Conococha - Catac), fueron determinados a partir de la evaluación estructural y funcional de la vía en la etapa pre operativa, en la superficie del pavimento se

depositaron uniformemente respetando el espesor de diseño establecido para el pavimento, el material disgregado se extendió con la Motoniveladora y compactado con el Rodillo Neumático tal como se observa en la Figura N°30.



Figura N°42: (1) Colocación, (2) Esparcido (3) Compactación y (4) Perfilado final de material adicionado para la base granular
Fuente: Adaptado de Thenoux (2010)

En base al enunciado del párrafo. anterior se elaboró la Tabla N°7, que permitió el desarrollo del plan de producción diaria para el mantenimiento de la vía.

Tabla N°27: Valores para cálculo de ratios de gasto por metro lineal de carretera

Descripción	Medidas	Unidad
Profundidad	0.20	m
Asfalto	1.5	%
Agua para espumación	2.0	%
Agua para la compactación	2.925	%
Cemento	1.0	%
Densidad del material (RAP)	2243	Kg/m ³
Ancho del tambor	2.5	m
Peso específico de Agua	1000	Kg/m ³
Peso específico de Asfalto	1000	Kg/m ³

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2010)

Por ejemplo con estos datos se determinó los ratios de gasto por metro lineal de carretera, para los elementos a emplear en el proceso constructivo de la carretera Conococha - Huaraz.

$$\begin{aligned} \text{Asfalto} &= 2243 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \times 2.5\text{m} \times 0.20 \text{ m} \times 1.5\% = 16.82 \frac{\text{Kg}}{\text{m}} \langle \rangle 16.82 \text{ Lit}/\text{m} = 4.44 \text{ Gal}/\text{m} \\ \text{Agua espumación} &= 2243 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \times 2.5\text{m} \times 0.20 \text{ m} \times 2.0\% = 22.43 \frac{\text{Kg}}{\text{m}} \langle \rangle 22.43 \text{ Lit}/\text{m} = 5.93 \text{ Gal}/\text{m} \\ \text{Cemento} &= 2243 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \times 2.5\text{m} \times 0.20 \text{ m} \times 1.0\% = 11.215 \frac{\text{Kg}}{\text{m}} \\ \text{Longitud de Espaciamiento} &= 42.5\text{Kg}/11.215 \frac{\text{Kg}}{\text{m}} = 3.79 \text{ m} \end{aligned}$$

En base a la ponderación de los parámetros anteriores, se establecieron las áreas (ver Tabla N°8) correspondientes para una bolsa de cemento 42.5kg; y en base a ello, el espaciamiento longitudinal para asegurar el adecuado esparcimiento de cemento de acuerdo a las proporciones establecidas en el diseño de mezclas ver sección 3.5.

Tabla N°28: Área esparcida y espaciamiento longitudinal

Espeor de Reciclado	Área de Esparcido/bolsa	Espaciamiento Longitudinal
0,20 m.	9.48 m ²	3.79 m.
0.175 m.	10.83 m ²	4.33 m.
0.170 m	11.15 m ²	4.46 m

Fuente: Elaboración Propia

A continuación del procedimiento mencionado líneas arriba, se procedió a ejecutar el reciclado del pavimento, utilizando de forma lineal el Tren Reciclador, dejando un producto que sólo requirió una superficie de protección (mortero asfáltico). Para este proyecto el Tren Reciclador estuvo compuesto por los siguientes equipos: 01 Cisterna de Asfalto de 6,000 Gln, 01 Camión Cisterna de Agua de 9,000 Gln, 01 Camión Cisterna de Agua de 4,000 Gln, 01 Maquina Recicladora y Compresora Neumática, tal como se observa en la Figura N°xx



Figura N°43: Equipos para aplicación de la tecnología
Fuente: Adaptado de Galvis (2012)

La Recicladora Wirtgen 2500-S (ver la Figura N°2.28), posee un tambor con puntas semejantes a los de una fresadora (ver la Figura N°4.7) y estas van pulverizando las capas de asfalto y base granular, luego los va mezclando con el cemento colocado sobre la superficie, se va inyectando el asfalto y el agua para el espumado, y el agua de compactación mediante una serie de boquillas distribuidas (ver la Figura N°32) sobre y a lo ancho del tambor de la recicladora.



Figura N°44: Picas, tablero de presión y distribución de boquillas en la recicladora
Fuente: Elaboración Propia

Inmediatamente después de que haya pasado el Tren Reciclador, se realizó el control de los espesores cada 50 m en dos bolillos (Der-izq) de manera alternada en las tres fajas de corte durante todo el proceso de reciclado, según las profundidades correspondientes al diseño por

sectores homogéneos. Los sectores homogéneos tienen diferentes profundidades, para el tramo Conococha Catac consta de seis sectores, en el cual el sector 4.1 no ha sido reciclado debido a que el aporte estructural del pavimento satisface los requerimientos de diseño y presenta buena serviciabilidad. El tramo Catac - Huaraz está dividido en siete tramos homogéneos con espesores diferentes, donde el reciclado se ha realizado en todos los 34 kms.

Luego viene la compactación primaria para la franja que se está ejecutando que consta de un Rodillo liso. Estas franjas de trabajo son del ancho de la recicladora 2.5 m y una longitud mínimo de 250 m (puede variar de acuerdo a la geometría de carretera). Al llegar al final de la primera franja, la Recicladora, junto con la Cisterna de Asfalto y de Agua, retroceden para iniciar con la franja del centro y así repetir el proceso hasta completar toda la calzada. Seguido de la compactación primaria.

El Tren de Perfilado y Compactado (ver la Figura N°4. 10) que se encarga de perfilar y compactar la mezcla de reciclada con asfalto espumado, hasta lograr una densidad adecuada (mínima de 98.0 %) y humedad óptima para que su desempeño estructural sea el esperado. Para este proyecto el Tren de Perfilado y Compactado estuvo compuesto por: 01 Motoniveladora, 01 Rodillo liso de 10 ton, 01 Rodillo liso de 12 ton, 01 Rodillo Neumático de 15 ton y 01 Camión Cisterna de Agua de 4,000 Gln.



Figura N°45: Compactación primaria
Fuente: Adaptado de Thenoux (2010)

Adicionalmente para darle terminación a la capa reciclada se debe realizar un riego de agua en aproximadamente (0.5 % - 1 %), esto va a depender del contenido de humedad natural y de las condiciones climáticas de la zona. Se va a sellar con el rodillo neumático, con el fin de densificar un poco más el material y que las densidades suban al 100%. Para el caso de la vía estudiada no se realizó lo anterior mencionado, puesto que después de la compactación secundaria se pasó a realizar el control de lisuras (rugosidades) para asegurar una superficie de alta calidad y baja rugosidad culminado con las pruebas de densidad de campo (cono de arena).

- Periodo de ejecución y avance promedio diario en una jornada normal de trabajo

El avance diario depende directamente de la metodología de trabajo empleado en obra, tal como se describió en el párrafo anterior. En la Tabla N°9 y Tabla N° 10, se detalla el porcentaje del avance mensual de los trabajos realizados en la conservación periódica de la carretera Conococha Huaraz desde junio de 2010 hasta noviembre del 2010, resultando el periodo efectivo de ejecución del proyecto de seis meses, como una consecuencia del proceso constructivo de alto rendimiento.

Tabla N°29: Avance porcentual de reciclado para el tramo Conococha- Catac

Partida ejecutada	Avance mensual (44.416 km)			
	Junio 2010			
	Prog. Inicio	Prog. Final	Long. (m)	Avance (%)
Reciclado con Asfalto Espumado	491+760	498+360	6600.00	14.86%
Imprimación de Base Reciclada	491+760	498+350	6590.00	14.84%
Partida Ejecutada	Julio 2010			
	Prog. Inicio	Prog. Final	Long. (M)	Avance (%)
	Reciclado con Asfalto Espumado	498+360	509+000	10640.00
Imprimación de Base Reciclada	498+350	503+990	5640.00	12.70%
Partida Ejecutada	Agosto 2010			
	Prog. Inicio	Prog. Final	Long. (M)	Avance (%)
	Reciclado con Asfalto Espumado	509+000	523+000	14000.00
Imprimación de Base Reciclada	503+990	518+000	14010.00	31.54%
Partida Ejecutada	Setiembre 2010			
	Prog. Inicio	Prog. Final	Long. (M)	Avance (%)
	Reciclado con Asfalto Espumado	523+000	536+176	13176.00
Imprimación de Base Reciclada	518+000	536+176	18176.00	40.92%

Fuente: Adaptado de Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2010)

Tabla N°30: Avance porcentual de reciclado para el tramo Catac- Huaraz

Partida Ejecutada	Avance Mensual (34.090 Km)			
	Octubre 2010			
	Prog. Inicio	Prog. Final	Long. (m)	Avance (%)
Reciclado con Asfalto Espumado	536+176	557+400	21224.00	62.26%
Imprimación de Base Reciclada	536+176	552+400	16224.00	47.59%
Partida Ejecutada	Noviembre 2010			
	Prog. Inicio	Prog. Final	Long. (m)	Avance (%)
	Reciclado con Asfalto Espumado	557+400	570+266	12866.00
Imprimación de Base Reciclada	552+400	570+266	17866.00	52.41%

Fuente:Adaptado de Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2010)

De la Tabla N°29 y Tabla N°30, se concluye que el avance en una jornada normal de trabajo, con esta configuración de equipos mencionado en la sección de equipos, se encuentra entre 300m (mínimo) y 1100 m (máximo) por día normal de trabajo, es decir, un avance promedio de 760 m, siempre y cuando se tengan espesores de capas asfálticas existentes entre 5 y 10 cm (carretera Conococha-Huaraz fue de 5 y 7.5 cm), ya que al aumentar el espesor del asfalto disminuye la velocidad del reciclado.

- Tiempo de apertura al tráfico

Una de las ventajas del reciclado con asfalto espumado es que el tiempo de apertura al tráfico es menor a comparación de la técnica convencional, debido a que permanece trabajable por mayores periodos de tiempo y además porque es usado en condiciones climáticas adversas (climas lluviosas) (Thenoux y Jamet, 1999).

Vildoso y Espinoza (2014) señalan que el material reciclado in-situ con asfalto espumado, es -un proceso muy rápido donde el equipo reciclador, casi de manera simultánea, corta el pavimento antiguo, incorpora los agentes estabilizadores elegidos según diseño de mezclas y vuelve a dejarlo tendido para su conformación y compactación posterior; además, por contener cemento, los tiempos de trabajabilidad son limitados antes de la fragua (máximo 2 horas después de estabilizado). Entonces, el reciclado puede y debe ser ejecutado de

manera eficiente y sincronizada para conseguir óptimos resultados (en costo, tiempo y calidad), por lo que se convierte en un proceso sumamente ágil.

Durante el proceso de reciclado la vía estuvo abierta todo el tiempo que duró el reciclado, ya que al ser una carretera de 7.20 m en promedio de ancho, había suficiente espacio para que trabajen los equipos de reciclado y de compactación. Los vehículos circularon simultáneamente y sin interferencias por la vía, debido a las señalizaciones colocadas a lo largo del tramo reciclado (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2010). Además, si después de terminado la compactación y autorizado por la supervisión, para dar apertura al tráfico inmediatamente, se debe reducir la velocidad a 30km/h.

Las capas recicladas requieren un período de curado para su maduración, antes de que se autorice su cobertura con la micro superficie. Este periodo depende de las condiciones climáticas del proyecto (gradiente térmico y la lluvia). Durante dicho lapso, se aplicará los riegos de protección, para prevenir el deterioro de la capa reciclada por la acción de las aguas superficiales y del tránsito automotor. dichos riegos se realizaron utilizando el asfalto diluido MC-30, después al final se recubrió la capa con el mortero asfáltico (micropavimento).

- Característica estructural y funcional del pavimento terminado

Los resultados obtenidos de la resistencia a la tracción indirecta (ITS) después de terminado el reciclado con asfalto espumado en el mantenimiento periódico del año 2010, para la carretera en estudio (ver Tabla N°30), arrojaron como promedio general una resistencia en condición seca de 355.204 kpa; y de 255.699 kpa en condición húmeda, superando los requerimientos de las especificaciones técnicas (200.0 kpa y 100.0 kpa respectivamente).

Tabla N°31: Estadística de tracción indirecta en base reciclada tramo Conococha Huaraz

Sector (km 491+760 – km 570+226)		Densidad (gr/cm3)	ITS (Seco)	ITS (Húmedo)	TSR (%)
Estadísticas Tracción Indirecta	Valor Promedio	2.225	355.204	255.699	71.992
	Desviación Estándar	0.08	79.67	70.23	12.31
	Valor Mínimo	1.842	210.80	127.30	47.80
	Valor Máximo	2.892	587.367	562.367	110.740
	Valor Especifico	-	200.00	100.00	50.00

Fuente:Adaptado de Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2010)

Cabe señalar además que debido a la diversificación de suelos, superficie de rodadura, es decir la composición del paquete de reciclado (asfalto y base granular), las resistencias pueden presentar cierta variabilidad, pero siempre dentro de los parámetros establecidos.

5.1.2.2 Diseño Estructural

El resumen del diseño estructural para la técnica del reciclado se detalla en la Tabla N°31 y Tabla N°32, en ella se observa los datos y resultados obtenidos de los espesores de la Base Estabilizada con Asfalto.

Tabla N°32: Resumen 1 de diseño estructural para RPTAE, tramo Conococha- Catac

DISEÑO ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO METODOLOGIA AASHTO 1993								
TRAMO: CONOCOCHA - CATAc								
UBICACIÓN: ANCASH - PERU								
ALTERNATIVA: RECICLADO CON ASFALTO ESPUMADO								
VARIABLES ANALIZADAS		ALTERNATIVA DE DISEÑO CON ASFALTO ESPUMADO						
		SECTOR 1	SECTOR 2	SECTOR 3	SECTOR 4	SECTOR 4.1	SECTOR 5	SECTOR 6
		491+760.00 496+980.00	496+980.00 505+980.00	505+980.00 512+300.00	512+300.00 529+580.00	512+770.00 514+820.00	529+580.00 534+970.00	534+970.00 536+176.00
Longitud de analisis	(m)	5220	9000	6320	15230	2050	5390	1206
Periodo de analisis	(años)	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Nivel de Confiabilidad para el periodo de analisis	R (%)	90.00%	90.00%	90.00%	90.00%	90.00%	90.00%	90.00%
Desviación Estandar normal	Zr	-1.282	-1.282	-1.282	-1.282	-1.282	-1.282	-1.282
Variabilidad	SO	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
EAL para la 1ª Etapa	W18	1.52E+06	1.52E+06	1.52E+06	1.52E+06	1.52E+06	1.52E+06	1.52E+06
Modulo Resiliente de la Subrasante (Mr)	(psi)	8.181	9.839	7.932	8.799	9.615	6.513	11.727
Serviciabilidad inicial	PO	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
Serviciabilidad final	Pt	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Perdida de serviciabilidad	ΔPSI	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Numero Estructural Requerido	(SNr)	3.49	3.26	3.52	3.40	3.29	3.78	3.06
Solucion de la Formula	Log ₁₀ (W18)	6.18	6.18	6.18	6.18	6.18	6.18	6.18
Solucion de la Formula AASHTO		6.18	6.18	6.18	6.18	6.18	6.18	6.18
Comprobacion		OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
ESTRUCTURA EXISTENTE								
Coefficientes de Reduccion Estructurales								
Coefficiente de reduccion superficie de rodadura		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Coefficiente de reduccion Base Granular	CBR (80%)	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
Coefficiente de reduccion Sub Base Granular	CBR (30%)	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
Coefficiente de Drenaje								
Coefficiente de Drenaje Base Granular		1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
Coefficiente de Drenaje Sub Base Granular		1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
Espesores Existente del Pavimento								
Superficie de Rodadura	(cm)	7.50	7.50	7.50	7.50	7.50	7.50	2.00
Base Granular	(cm)	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
Sub Base Granular	(cm)	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	25.00	20.00
Espesor total del Pavimento Existente	(cm)	47.50	47.50	47.50	47.50	47.50	52.50	42.00
Espesores a retirar/recidar								
Adicion de Material Granular	(cm)	3.00	3.00	3.00	3.00	0.00	3.00	3.00
Superficie de Rodadura	(cm)	7.50	7.50	7.50	7.50	0.00	7.50	2.00
Base Granular	(cm)	9.50	9.50	9.50	7.00	0.00	9.50	12.50
Sub Base Granular	(cm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Espesor total del Pavimento a retirar	(cm)	20.00	20.00	20.00	17.50	0.00	20.00	17.50
Espesores Efectivos Remanentes								
Superficie de Rodadura	(cm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Base Granular	(cm)	10.50	10.50	10.50	13.00	20.00	10.50	7.50
Sub Base Granular	(cm)	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
Espesor total efectivo del Pavimento Existente	(cm)	30.50	30.50	30.50	33.00	40.00	30.50	27.50
SN eff Remanente (existente)		1.54	1.54	1.54	1.68	2.17	1.78	1.38
ESTRUCTURA PROPUESTA								
Coefficientes Estructurales								
Reciclado con Asfalto Espumado + Cemento		0.26	0.26	0.26	0.26	0.4	0.26	0.26
Coefficientes de Drenaje								
Coefficientes de Drenaje Base Reciclado		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Espesores Propuestos								
Micropavimento Tipo III	(cm)	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20
Conservar la Carpeta Asfáltica Existente	(cm)					7.50		
Reciclado con Asfalto Espumado + Cemento	(cm)	20.00	20.00	20.00	17.50	0.00	20.00	17.50
SN calculado (a colocar)		2.05	2.05	2.05	1.79	1.18	2.05	1.79
SN final (Total)		3.59	3.59	3.59	3.48	3.35	3.83	3.17
Comprobacion		OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
ESPESOR TOTAL A COLOCAR		20.00	20.00	20.00	17.50	0.00	20.00	17.50

Fuente: Adaptado de Contreras (2014)

Tabla N°33: Resumen 2 de diseño estructural para RPTAE, tramo Conococha- Catac

DISEÑO ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO METODOLOGIA AASHTO 1993								
TRAMO: CATAc - HUARAZ								
UBICACIÓN: ANCASH - PERU								
ALTERNATIVA: RECICLADO CON ASFALTO ESPUMADO								
VARIABLES ANALIZADAS		ALTERNATIVA DE DISEÑO CON ASFALTO ESPUMADO						
		SECTOR 1	SECTOR 2	SECTOR 3	SECTOR 4	SECTOR 4.1	SECTOR 5	SECTOR 6
		536+176.00	537+050.00	538+550.00	546+550.00	560+150.00	564+000.00	567+700.00
		537+050.00	538+550.00	546+550.00	560+150.00	564+000.00	567+700.00	570+266.00
Longitud de analisis	(m)	874	1500	8000	13600	3850	3700	2566
Periodo de analisis	(años)	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Nivel de Confiabilidad para el periodo de analisis	R (%)	90.00%	90.00%	90.00%	90.00%	90.00%	90.00%	90.00%
Desviacion Estandar normal	Zr	-1.282	-1.282	-1.282	-1.282	-1.282	-1.282	-1.282
Variabilidad	S0	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
EAL para la 1ª Etapa	W18	2.30E+06	2.30E+06	2.30E+06	2.30E+06	2.30E+06	2.30E+06	2.30E+06
CBR de Diseño a Nivel de la Subrasante	(%)	23.00	17.32	17.70	20.84	22.94	21.50	56.70
Modulo Resiliente de la Subrasante (Mr)	(psi)	13805.15	19150.38	19422.44	13378.52	13793.85	13513.4	17708.41
Serviciabilidad inicial	PO	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
Serviciabilidad final	Pt	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Perdida de serviciabilidad	ΔPSI	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Numero Estructural Requerido	(SNr)	3.09	2.74	2.72	3.12	3.09	3.11	2.62
Solucion de la Formula	Log10 (W18)	6.36	6.36	6.36	6.36	6.36	6.36	6.36
Solucion de la Formula AASHTO		6.36	6.36	6.36	6.36	6.36	6.36	6.36
Comprobacion		OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
ESTRUCTURA EXISTENTE								
Coefficientes de Reduccion Estructurales								
Coefficiente de reduccion superficie de rodadura		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Coefficiente de reduccion Base Granular	CBR (80%)	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
Coefficiente de reduccion Sub Base Granular	CBR (30%)	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
Coefficiente de Drenaje								
Coefficiente de Drenaje Base Granular		1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
Coefficiente de Drenaje Sub Base Granular		1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
Espesores Existente del Pavimento								
Superficie de Rodadura	(cm)	3.00	3.00	4.00	3.00	5.00	5.00	4.00
Base Granular	(cm)	20.00	15.00	15.00	20.00	20.00	20.00	20.00
Sub Base Granular	(cm)	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
Espesor total del Pavimento Existente	(cm)	43.00	38.00	39.00	43.00	45.00	45.00	44.00
Espesores a retirar/reciclar								
Adicion de Material Granular	(cm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Superficie de Rodadura	(cm)	3.00	3.00	4.00	3.00	5.00	5.00	4.00
Base Granular	(cm)	17.00	14.00	13.00	17.00	12.00	12.00	13.00
Sub Base Granular	(cm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Espesor total del Pavimento a retirar	(cm)	20.00	17.00	17.00	20.00	17.00	17.00	17.00
Espesores Efectivos Remanentes								
Superficie de Rodadura	(cm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Base Granular	(cm)	3.00	1.00	2.00	3.00	8.00	8.00	7.00
Sub Base Granular	(cm)	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
Espesor total efectivo del Pavimento Existente	(cm)	23.00	21.00	22.00	23.00	28.00	28.00	27.00
SN eff Remanente (existente)		1.122	1.009	1.065	1.122	1.403	1.403	1.347
ESTRUCTURA PROPUESTA								
Coefficientes Estructurales								
Reciclado con Asfalto Espumado + Cemento		0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26
Coefficientes de Drenaje								
Coefficientes de Drenaje Base Reciclado		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Espesores Propuestos								
Micropavimento Tipo III	(cm)	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20
Reciclado con Asfalto Espumado + Cemento	(cm)	20.00	17.00	17.00	20.00	17.00	17.00	17.00
SN calculado (a colocar)		2.05	1.74	1.74	2.05	1.74	1.74	1.74
SN final (Total)		3.17	2.75	2.81	3.17	3.14	3.14	3.09
Comprobacion		OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
ESPESOR TOTALA COLOCAR		20.00	17.00	17.00	20.00	17.00	17.00	17.00

Fuente: Adaptado de Contreras (2014)

5.1.3 Ventajas Ecológicas de la Aplicación

5.1.3.1 Explotación de Canteras

Una de las principales ventajas del reciclado de pavimento con tecnología del asfalto espumado (RPTAE), es la amabilidad con el medio ambiente; al tratarse de un proceso de reciclado se aprovecha el pavimento antiguo disminuyendo notablemente la necesidad de adquirir nuevo material granular y de generar botaderos para el material eliminado. A continuación en la Tabla N°4 y Tabla N°34 se presentan los resultados obtenidos de la experiencia desarrollado en el mantenimiento periódico de la carretera Conococha - Huaraz al aplicar RPTAE, en comparación con un sistema convencional de rehabilitación de pavimentos asfálticos.

Tabla N°34: Cantidad de material para base granular a utilizar

Descripción	Técnica Convencional	RPTAE	Ahorro
	(m3)	(m3)	(m3)
Material Granular para Base	167,194.80	10,981.27	156,213.53

Fuente: Elaboración Propia

El reciclado hace que se reutilicen todos los materiales del pavimento existente, es por ello que no se explotó canteras de material para base granular, no requeridas para las actividades que comprende el RPTAE. Sin embargo, para este proyecto se identificaron sectores que presentaban déficit estructural especialmente en el tramo Conococha-Catac, el cual consistió en sitios con alto grado de deflectometría y pérdida de la carpeta asfáltica y finos que requería trabajos de refuerzo estructural con material granular.

Se accedió a la colocación de material granular de 0.03 m de espesor en algunos tramos puntuales de vía. De esta manera se completo el aporte estructural requerido, para ello debiendo explotar cantera, pero en cantidad mucho menor que una técnica convencional. La cantidad total de material a eliminar en caso de usar la técnica convencional se observa en la Tabla N°35.

Tabla N°35: Cantidad de material a eliminar

Descripción	Técnica Convencional	RPTAE
	(m3)	(m3)
Material Eliminado	188,094.15	0.00

Fuente: Elaboración Propia

5.1.3.2 Generación de Residuos Solidos

Este punto considera la cantidad de material residual generado por las actividades concernientes a la rehabilitación de la carretera, el cual será transportado y acondicionado en los depósitos de material excedente (DME), comúnmente conocidos como botaderos.

a) Reciclado in-situ empleando asfalto espumado

Para el proceso de reciclado in-situ empleando asfalto espumado se tiene la siguiente cantidad de residuos sólidos generados:

Tabla N°36: Generación de residuos sólidos del reciclado in-situ con asfalto espumado

Generación de residuos sólidos	
Procedencia	Reciclado con asfalto espumado
Accesos	611.91
Planta chancadora y zarandas	894.41
Bacheo de bermas	121.38
Total (m3)	1,627.70

Fuente: Adaptado de Contreras (2014)

b) Sobrecapa asfáltica

Para el proceso de recapeo asfáltico se tiene la siguiente cantidad de residuos sólidos generados:

Tabla N°37: Generación de residuos sólidos del recapeo asfáltico

Generación de residuos sólidos	
Procedencia	Sobrecapa asfáltica
Accesos	787.41
Planta de asfalto, chancadora y zarandas	1,349.54
Bacheo superficial y profundo	524.26
Total (m3)	2,661.22

Fuente: Adaptado de Contreras (2014)

Una vez cuantificada la cantidad de residuos sólidos generados por los distintos tipos de rehabilitación, se procede a comparar dichos valores en el siguiente cuadro:

Tabla N°38: Comparación de la cantidad de residuos sólidos generales

Procedencia	Generación de residuos sólidos	
	Reciclado con asfalto espumado	Sobrecapa asfáltica
Accesos	611.91	787.41
Plantas (asfalto/chancado/zarandas)	894.41	1,349.54
Bacheo (bermas/superficial/profundo)	121.38	524.26
Total de material removido (m3)	1,627.70	2,661.22

Fuente: Adaptado de Contreras (2014)

Según se puede apreciar en la Tabla 54, la generación de residuos sólidos es menor en el reciclado in-situ, en comparación con el método convencional de rehabilitación.

Para la ejecución de la sobrecapa asfáltica, la generación de residuos sólidos es 1.63 veces mayor, ya que genera 1,033.52 m3 adicionales de residuo.

Este resultado se da porque la metodología del reciclado in-situ tiene como sustento tomar el material deteriorado y reutilizarlo, lo cual minimiza la generación de residuos sólidos. Por otra parte, si bien es cierto que la diferencia en la cantidad de residuos sólidos generados por la sobrecapa asfáltica no es tan distante de la cantidad generada por el reciclado in-situ, queda claro que su filosofía no está orientada a la minimización de residuos; definitivamente, en tramos de mayor longitud, la diferencia sería más manifiesta.

Al igual que en la temática ecológica analizada, hay una importante ventaja económica debido a que para una menor generación de residuos sólidos, será menor la cantidad de botaderos a ejecutar y menor la cantidad de transporte de material excedente, disminuyendo así la cantidad de horas máquina y el consumo de combustible para ambas actividades.

5.1.3.3 Consumo de Agua

El agua fue extraída del río Santa, una fuente de abastecimiento perenne. A partir de la toma de muestras, se pudo verificar que no contiene elementos nocivos y que es apta para la ejecución de las distintas actividades a realizarse en obra; los resultados son los siguientes:

Tabla N°39: Propiedades químicas del agua del Río Santa

Propiedades químicas del río Santa			
Parámetro	Unidad	Cantidad	Tolerancia
Sólidos totales en suspensión	ppm	1	5,000 máx.
Materia orgánica	ppm	1	3.00 máx.
Alcalinidad total	ppm	1	1,000 máx.
Sulfatos	ppm	25	1,000 máx.
pH		8.01	5.5 – 8.0

Fuente: Adaptado de Contreras (2014)

A continuación, se presenta la información correspondiente a la cantidad total de agua empleada para todas las actividades implicadas en la rehabilitación de la carretera.

- Reciclado in-situ empleando asfalto espumado

Para el proceso de reciclado in-situ empleando asfalto espumado se tiene el siguiente consumo de agua:

Tabla N°40: Cantidad de agua empleada en el reciclado in-situ con asfalto espumado

Consumo de agua	
Actividad	Reciclado con asfalto espumado
Accesos	79.08
Reciclado de pavimento	507.95
Recuperación ambiental	19.35
Herbáceas para cobertura vegetal	58.04
Total (m3)	664.41

Fuente: Adaptado de Contreras (2014)

- Sobrecapa asfáltica

Para el proceso de recapeo asfáltico se tiene el siguiente consumo de agua:

Tabla N°41: Cantidad de agua empleada en la sobrecapa asfáltica

Consumo de agua	
Actividad	Sobrecapa asfáltica
Accesos	101.76
Bacheo profundo	84.35
Recuperación ambiental	28.41
Herbáceas para cobertura vegetal	85.24
Total (m3)	299.76

Fuente: Adaptado de Contreras (2014)

Una vez cuantificado el consumo total de agua para cada método de rehabilitación, se procede a comparar dichos valores mediante el siguiente cuadro:

Tabla N°42: Comparación del consumo de agua para cada método de rehabilitación

Insumo	Consumo de agua	
	Reciclado con asfalto espumado	Sobrecapa asfáltica
Agua (m3)	664.41	299.76

Fuente: Adaptado de Contreras (2014)

Según se puede apreciar en la Tabla 58, el consumo de agua para la sobrecapa asfáltica representa menos de la mitad (45.12%) del consumo de agua para el reciclado in-situ. Esto se da debido a que en el segundo método no se contempla la presencia de material granular que requiera de agua para compactación, cosa que si ocurre en el reciclado.

Por otro lado, si se hubiese tomado en cuenta métodos convencionales como la construcción de capas suplementarias o la reconstrucción parcial con mezcla asfáltica, que sí contemplan dentro de su estructura la presencia de capas granulares, indudablemente el consumo de agua que demandarían sería ostensiblemente mayor que la demanda de agua para el reciclado. Esto se daría debido a que la demanda de agua para

conformación es mayor que la cantidad de agua que el reciclado demanda para el proceso de espumación.

5.1.3.4 Consumo de Combustible

Este punto considera la cantidad de combustible consumido por los equipos para poder ejecutar las actividades concernientes a la rehabilitación de la carretera.

El procedimiento consistió en calcular la cantidad total de horas máquina de cada uno de los equipos y multiplicarlas por el consumo promedio de combustible por cada hora máquina trabajada.

A continuación, se presenta un cuadro con los consumos promedio de combustible de los equipos usados en las técnicas de rehabilitación estudiadas:

Tabla N°43: Consumo promedio de combustible por hora máquina

Tabla 59. Consumo promedio de combustible por hora máquina.

Consumo promedio de combustible Equipo	Petróleo Gln / hm
Barredora mecánica 10-20 hp	1.5
Calentador de aceite 48-s	1.8
Camión baranda 3 tn	3.2
Camión cisterna 4x2 (agua) 122 hp 2000 gln	3.3
Camión cisterna 4x2 (asfalto)	3.5
Camión imprimador 210 hp 2,000 gln	4.0
Camión plataforma 6x4 300 hp 19 ton	4.0
Camioneta pick-up 4x2 84 hp	2.8
Cargador frontal s/lantas 125 - 155 hp 3 yd3.	5.6
Chancadora primaria - secundaria 5 fajas 75 hp 46-70 ton/h	2.6
Chancadora terciaria 85-100 ton/h	1.8
Compactador vibr. tipo plancha 7 hp	0.6
Compresora neumática 250-330 pcm, 87 hp	2.6
Cortadora de asfalto	0.6
Grúa mecánica 127 hp 18 Ton 9m	3.7
Grupo electrógeno 116 hp 75 kw	3.0
Grupo electrógeno 230 hp 150 kw	6.2
Martillo neumático de 25 - 29 kg	2.6

Consumo promedio de combustible Equipo	Petróleo Gln / hm
Micropavimentadora autopropulsada	4.9
Motobomba 7-10 hp 3-4"	0.4
Motoniveladora de 125 hp	4.2
Pavimentadora sobre oruga 69 hp	5.3
Planta asfalto en caliente 60-115 tn/h	8.6
Recicladora Wirtgen wr2500 s	9.7
Rodillo liso vibr autop 101-135 hp 10-12 t	4.0
Rodillo neumático autop 81-100hp 5.5-20t	3.2
Ruteador 25 hp	0.7
Secador de áridos 2-me 70 hp 60-115 ton/h	5.9
Sellador 125 hp	1.8
Semi trayler 6x4 330 hp - 40 ton	4.2
Tractor de orugas de 140-160 hp	6.4
Volquete 6x4 330 HP 15 m3	4.4
Zaranda vibratoria 4"x6"x14" me 15 hp	5.2

Fuente: Adaptado de Contreras (2014)

Seguidamente se presenta la cantidad de horas máquina y el consumo de combustible para cada una de las técnicas de rehabilitación estudiadas.

- Reciclado in-situ empleando asfalto espumado

Para el proceso de reciclado in-situ empleando asfalto espumado se tienen los siguientes consumos de horas máquina y de combustible:

Tabla N°44: Cantidad de horas máquina y combustible en el reciclado espumado in-situ

Reciclado con asfalto espumado			
Equipo	Cantidad de horas máquina	Consumo promedio (gln/hm)	Combustible utilizado (gln)
Barredora mecánica 10-20 hp	259.98	1.50	389.97
Camión baranda 3 tn	230.27	3.20	736.87
Camión cisterna 4x2 (agua) 122 hp 2000 gln	360.34	3.30	1,189.12
Camión cisterna 4x2 (asfalto)	242.22	3.50	847.78
Camión imprimador 210 hp 2,000 gln	136.47	4.00	545.87
Camión plataforma 6x4 300 hp 19 ton	144.71	3.96	573.06
Camioneta pick-up 4x2 84 hp	152.00	2.80	425.60
Cargador frontal s/lantas 125 - 155 hp 3 yd3.	355.63	5.60	1,991.50
Chancadora primaria - secundaria 5 fajas 75 hp 46-70 ton/h	44.09	2.60	114.64
Chancadora terciaria 85-100 ton/h	28.97	1.80	52.15
Compresora neumática 250-330 pcm, 87 hp	414.49	2.60	1,077.66
Cortadora de asfalto	49.80	0.60	29.88
Martillo neumático de 25 - 29 kg	49.80	2.60	129.47
Micropavimentadora autopropulsada	130.51	4.90	639.51
Motobomba 7-10 hp 3-4"	118.12	0.40	47.25
Motoniveladora de 125 hp	113.08	4.20	474.93
Recicladora Wirtgen wr2500 s	104.71	9.72	1,017.79
Rodillo liso vibr autop 101-135 hp 10-12 t	295.89	4.00	1,183.57
Rodillo neumático autop 81-100hp 5.5-20t	104.71	3.20	335.08
Semi trayler 6x4 330 hp - 40 ton	90.00	4.18	376.20
Tractor de orugas de 140-160 hp	58.79	6.40	376.23
Volquete 6x4 330 HP 15 m3	437.08	4.40	1,923.16
Zaranda vibratoria 4"x6"x14" me 15 hp	33.80	5.20	175.78
Total	3,955.45		14,653.06

Fuente: Adaptado de Contreras (2014)

- Sobrecapa asfáltica

Para el proceso de recapeo asfáltico se tienen los siguientes consumos de horas máquina y de combustible:

Tabla N°45: Cantidad de horas máquina y combustible empleado en la sobrecapa asfáltica

Sobrecapa asfáltica			
Equipo	Cantidad de horas máquina	Consumo promedio (gln/hm)	Combustible utilizado (gln)
Barredora mecánica 10-20 hp	129.47	1.50	194.20
Calentador de aceite 48-s	93.59	1.80	168.46
Camión baranda 3 tn	286.32	3.20	916.24
Camión cisterna 4x2 (agua) 122 hp 2000 gln	60.29	3.30	198.96
Camión cisterna 4x2 (asfalto)	130.57	3.50	457.00
Camión imprimador 210 hp 2,000 gln	136.47	4.00	545.87
Camión plataforma 6x4 300 hp 19 ton	50.00	3.96	198.00
Camioneta pick-up 4x2 84 hp	296.00	2.80	828.80
Cargador frontal s/lantas 125 - 155 hp 3 yd3.	549.68	5.60	3,078.22
Chancadora primaria - secundaria 5 fajas 75 hp 46-70 ton/h	129.10	2.60	335.66
Chancadora terciaria 85-100 ton/h	84.84	1.80	152.71
Compactador vibr. tipo plancha 7 hp	203.49	0.60	122.09
Compresora neumática 250-330 pcm, 87 hp	789.85	2.60	2,053.62
Cortadora de asfalto	196.09	0.60	117.66
Grúa mecánica 127 hp 18 Ton 9m	120.00	3.70	444.00
Grupo electrógeno 116 hp 75 kw	120.00	3.00	360.00
Grupo electrógeno 230 hp 150 kw	93.59	6.20	580.27
Martillo neumático de 25 - 29 kg	406.98	2.60	1,058.14
Motobomba 7-10 hp 3-4"	53.29	0.40	21.32
Motoniveladora de 125 hp	10.77	4.20	45.23
Pavimentadora sobre oruga 69 hp	92.65	5.30	491.02
Planta asfalto en caliente 60-115 tn/h	93.59	8.60	804.89
Rodillo liso vibr autop 101-135 hp 10-12 t	556.65	4.00	2,226.59
Rodillo neumático autop 81-100hp 5.5-20t	92.65	3.20	296.47
Ruteador 25 hp	97.23	0.67	64.82
Secador de áridos 2-me 70 hp 60-115 ton/h	93.59	5.90	552.19
Sellador 125 hp	160.76	1.80	289.37
Semi trayler 6x4 330 hp - 40 ton	90.00	4.18	376.20
Tractor de orugas de 140-160 hp	89.50	6.40	572.78
Volquete 6x4 330 HP 15 m3	1,069.39	4.40	4,705.30
Zaranda vibratoria 4"x6"x14" me 15 hp	98.98	5.20	514.68
Total	6,475.37		22,770.76

Fuente: Adaptado de Contreras (2014)

Una vez cuantificados el consumo de horas máquina y el consumo de combustible, se procede a comparar los resultados obtenidos de las técnicas de rehabilitación analizadas en el siguiente cuadro resumen:

Tabla N°46: Consumo de horas máquina y de combustible

Consumo de horas máquina y de combustible		
Recurso	Reciclado con asfalto espumado	Sobrecapa asfáltica
Horas máquina (hm)	3,955.45	6,475.37
Petróleo (gln)	14,653.06	22,770.76

Fuente: Adaptado de Contreras (2014)

Tabla N°47: Exceso en el consumo de recursos del recapeo sobre el reciclado in-situ

Exceso en el consumo de recursos del recapeo sobre el reciclado in-situ		
Recurso	Cantidad	Porcentual
Horas máquina (hm)	2,519.92	63.71%
Consumo de petróleo (gln)	8,117.70	55.40%

Fuente: Adaptado de Contreras (2014)

Según se puede apreciar en la Tabla N°46 y en la Tabla N°47, la cantidad de horas máquina empleadas para la sobrecapa es 63.71% veces mayor que la cantidad empleada para el reciclado in-situ. Esto obedece principalmente a la mayor cantidad de equipos necesarios para ejecutar las actividades de rehabilitación mediante los métodos convencionales.

Ciertamente, la mayor cantidad de horas máquinas trabajadas por los equipos se traduce en un mayor consumo de combustible; consecuentemente, la sobrecapa asfáltica demanda de un mayor consumo de combustible que en este caso es 55.40% veces mayor que el consumo para el reciclado in-situ.

Un rol importante en el ahorro de combustible lo juegan las actividades involucradas en el transporte de materiales, teniendo en cuenta que los consumos en galones destinados a esta operación son de 3,914.67 y 7,783.52 para el reciclado y el recapeo respectivamente. Ello quiere

decir que el transporte de materiales tiene un grado de incidencia del 26.7% y 34.2% sobre el consumo total de combustible para ambas técnicas de rehabilitación. Este último dato enaltece al reciclado y a su orientación de ahorro energético mediante la optimización de recursos.

Tabla N°48: Incidencia del transporte en el consumo de combustible

Incidencia del transporte en el consumo de combustible	Reciclado con asfalto espumado	Sobrecapa asfáltica
Transporte (gln)	3,914.67	7,783.52
Consumo total de petróleo (gln)	14,653.06	22,770.76
Incidencia	26.7%	34.2%

Fuente: Adaptado de Contreras (2014)

Por otro lado, teniendo en cuenta el costo del petróleo en obra es de S/. 12.88 (sin IGV) y que según la Tabla N°47, el exceso de combustible empleado para la sobrecapa asfáltica fue de 8,117.70 galones, el sobrecosto económico obtenido es de S/. 104,566.95. Es decir, además del beneficio ecológico, un menor consumo de combustible se traduce en un significativo ahorro económico.

La trascendencia de disminuir el consumo de combustible, además de minimizar el uso de un recurso no renovable y cada día más costoso, está directamente ligada a otro aspecto ecológico muy importante, la emisión de gases de efecto invernadero.

5.1.4 Ventajas Económicas de la Aplicación

5.1.4.1 Insumos de Mano de Obra

Para probar la hipótesis basada en fundamentos teóricos, que indican que la aplicación de la Técnica del Asfalto Espumado en cuanto a costos de consumo de insumos es menor al de la Técnica Convencional, a continuación, se presentan unos cuadros de análisis de

los insumos de mano de obra, materiales y maquinaria utilizados, en particular para la carretera en estudio.

- Reciclado del Pavimento con Asfalto Espumado

La determinación del costo de consumo de insumos, para el caso insumo Mano de Obra de la partida BASE RECICLADA (RAP) E=150mm, resulta justificado a partir del Análisis de Precios Unitarios (A.P.U.) (Precios año 2009), cuyo Cuadro se basa en la documentación proporcionada por William Mauricio Galvis Castillo, quien fue parte del proyecto de mantenimiento por niveles de servicio de la carretera en estudio como Gerente Vial de la empresa CONALVÍAS S.A Sucursal Perú.

BASE RECICLADA (RAP) E=150 mm

Tabla N°49: Cuadro A.P.U. Base Reciclada (RAP) E=150mm

RENDIMIENTO :		6,600.00	m2/DIA	COSTO UNITARIO DIRECTO POR m2		S/. 0.12
RECURSO	UNIDAD	CUADRILLA	CANTIDAD	PRECIO	PARCIAL	
OPERARIO JEFE DE GRUPO	hh	1.0000	0.0012	S/. 14.98	S/. 0.02	
OPERARIO	hh	1.0000	0.0012	S/. 14.98	S/. 0.02	
OFICIAL	hh	1.0000	0.0012	S/. 11.90	S/. 0.01	
PEON	hh	6.0000	0.0073	S/. 9.66	S/. 0.07	
					S/. 0.12	

Fuente:Adaptado de Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2010)

Tabla N°50: Cuadro Consumo de Insumos y Costo Total Mano de Obra - Técnica RPAE

CONSUMO HORA HOMBRE (HH) Y COSTO TOTAL					
RECURSO	METRADO m2	HH/m2	HH TOTAL	PRECIO/m2	COSTO
OPERARIO JEFE DE GRUPO	1,315,842.00	0.0012	1579	S/. 0.02	S/. 26,316.84
OPERARIO	1,315,842.00	0.0012	1579	S/. 0.02	S/. 26,316.84
OFICIAL	1,315,842.00	0.0012	1579	S/. 0.01	S/. 13,158.42
PEON	1,315,842.00	0.0073	9606	S/. 0.07	S/. 92,108.94
			14343		S/. 157,901.04
HH TOTAL		14343			
COSTO TOTAL		S/. 157,901.04			

Fuente:Adaptado de Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2010)

5.1.4.2 Insumo de Materiales de Obra

De acuerdo al Informe de Reciclado con Asfalto Espumado presentado por el William Mauricio Galvis Castillo, Ingeniero Gerente Vial de la obra, se registró el siguiente consumo de insumos de materiales de primer orden por jornada de trabajo (Ver Tabla N°50).

Tabla N°51: Insumos de materiales de obra para reciclado con asfalto espumado

Asfalto PEN 85/100	17 000 galones
Cemento Portland	550 bolsas
Agua para espumado	16 000 galones
Agua para compactado	
Combustible Diesel	750 galones

Fuente: Adaptado de Galvis Castillo (2012)

Cabe mencionar que los 750 galones de combustible diésel incluyen todos los equipos, tanto el tren de reciclado como el tren de compactado; el cual consistió en el siguiente detalle. La recicladora usaba 250 galones de combustible, la motoniveladora usó casi 80 galones diarios, cada uno de los rodillos usó 50 galones diarios, el rodillo neumático usó 60 galones por día, el punto de calentamiento usó más de 200 galones diarios, las cisternas de transporte de asfalto a la obra usaron alrededor de 80 galones diarios, en total eran aproximadamente 750 galones diarios de combustible.

5.2 Contratación de Hipótesis

5.2.1 Contratación de hipótesis específicas

a) Hipótesis específica 1

Una de las mayores ventajas al usar la Técnica del Asfalto Espumado es que produce un material viscoelástico que posee una flexibilidad mejorada y resistencia a la deformación.

Esta Hipótesis se corrobora ya que para hacer un diseño con la Técnica del Asfalto Espumado se hacen una serie de pruebas en el laboratorio WBL10S las cuales hacen simulaciones para obtener el mejor material con la flexibilidad y resistencia mejorada.

b) Hipótesis específica 2

La adecuada incorporación de material como cemento o asfalto en esta técnica nos permitirá obtener un pavimento flexible que podrá soportar cargas ejercidas por transporte pesado.

No se corrobora esta hipótesis ya que el cemento Portland Tipo 1 asegura mayores resistencias a la tracción indirecta por el coeficiente de fricción, una adición de una fuerza cohesiva y una mejora significativa en la susceptibilidad a la humedad, pero no se asegura que presente mayor resistencia a cargas ejercidas por transporte pesado.

c) Hipótesis específica 3

Usando la técnica del reciclado con asfalto espumado podemos reducir el impacto ambiental en la construcción de pavimentos.

Esta hipótesis se corrobora ya que al ser una técnica de reciclado in situ se usa el 100% de materiales y esto disminuye la explotación de canteras para el uso de agregados.

5.2.2 Contrastación de hipótesis general

Hipótesis general: El uso de la Técnica del reciclado con asfalto espumado tiene como principales ventajas el aporte técnico – ecológico, así como también de ser una buena opción al uso de las técnicas tradicionales.

Para probar esta hipótesis basada en fundamentos teóricos, que indican que la aplicación de la Técnica de Asfalto Espumado, en el aspecto técnico es más eficiente ya que la colocación de una carpeta de asfalto y una base granular

nueva generan mas tiempo en ejecucion de obra y por ende generarian trafico en los dos carriles de la carretera.

En cuanto las ventajas ecológicas se demostraron que, al ser un reciclado de materiales, no hubo desperdicio alguno y el uso de agregados nuevos fue el mínimo.

CONCLUSIONES

1. Al aplicar la técnica del reciclado con asfalto espumado para la rehabilitación de la carretera Conococha – Huaraz se obtuvo una carpeta la cual tiene mayor aporte estructural, proporcionando una capa de base estabilizada con propiedades físicas y mecánicas que aseguran un pavimento más duradero en el tiempo.
2. En la sobrecapa asfáltica hay una mayor incertidumbre respecto a la tasa de deterioro del pavimento pues, a pesar de la eficacia de las actividades bacheo superficial y profundo, no se puede aseverar que se hayan eliminado aquellos problemas estructurales que dieron origen al deterioro del pavimento existente.
3. Mediante la metodología del reciclado in-situ, el tránsito de vehículos se ve menos afectado que mediante la rehabilitación por métodos convencionales, debido a que el tren de reciclaje puede trabajar en un solo carril permitiendo la circulación por el otro; además de ello, se puede aperturar temporalmente el tránsito de vehículos inmediatamente después del proceso de compactación, minimizando el impacto social.

Conclusiones de carácter técnico

1. El asfalto espumado le otorga flexibilidad a la nueva base, de manera que es menos propensa al agrietamiento por contracción que las mezclas asfálticas en caliente; es decir, es menos sensible a los cambios de temperatura.
2. Una vez producida la compactación de la capa base reciclada y estabilizada, el contenido de vacíos es mayor en comparación con las mezclas asfálticas en caliente, ayudando a mejorar la sensibilidad al agrietamiento por temperatura; sin embargo, se genera la imperiosa necesidad de una superficie protectora que ayude a prevenir el ingreso de agua al interior de dichos vacíos.
3. A diferencia de las mezclas asfálticas convencionales, la base reciclada y estabilizada con asfalto espumado es menos propensa al ahuellamiento ya que tiene un comportamiento tensional similar al de un material chancado.

Conclusiones de carácter ecológico

1. No se presentó material excedente de la aplicación de la técnica del Reciclado con Asfalto Espumado, el cual no generó residuos contaminantes al medio ambiente ni uso de botaderos.
2. La emisión de polvo fue mucho menor aplicando la técnica del RPAE, ya que la recicladora Wirtgen, que se usó, realizó el mezclado en su cámara interna o bóveda de mezcla, lo cual generó un proceso menos nocivo
3. La técnica RPTAE no necesita obtener material granular nuevo para la base, ya que reutiliza el material existente en la vía (pavimento viejo) y que cumpla ciertos requisitos de calidad.
4. El RPTAE se realiza en in-situ, por lo que no requiere el uso de plantas externas, suprime los costos de transporte de material, eliminación de material excedente y considerando menor tiempo de ejecución.
5. El reciclaje es una responsabilidad ética, y la industria de la construcción no debería ser ajena a esa responsabilidad. Los materiales que conforman los pavimentos existentes son reciclables, y el hecho de que el pavimento se encuentre deteriorado, no significa que los materiales que lo componen también lo estén.

RECOMENDACIONES

1. De acuerdo con lo visto y estudiado en la presente investigación, se debe hacer un mantenimiento oportuno y adecuado a la vía con el fin de evitar su mayor deterioro y con ello prolongar la vida útil del pavimento.
2. El tipo de mantenimiento que se debe aplicar al pavimento depende del grado de deterioro que presenta la vía y saber reconocer fallas que pueden tener un origen más allá de la capa superficial. Por ello, se recomienda realizar estudios a profundidad al pavimento a fin de dar la correcta solución a la falla.
3. Es recomendable tomar en cuenta el Reciclado con Asfalto Espumado in situ ya que es una técnica sostenible, cuyo principio está basado en las tres erres (Reducir, Reciclar y Reutilizar) para hacer frente al déficit, que presenta el país, en tener carreteras en buen estado.
4. Es recomendable verificar el material disgregado después de que haya pasado la maquina ·recicla dora por la carretera, ya que deberá cumplir con la gradación establecida. Las partículas de gran tamaño perjudican el proceso de compactación, ocasionando en el futuro un fisuramiento temprano por el número de repeticiones de carga, reduciendo la vida funcional del pavimento, ya que este se determinará en términos del número de veces que puede ser cargado hasta que falle.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abad Quito, H. (2016). *Análisis comparativo del reciclado con asfalto espumado y la técnica convencional en la conservación periódica de la carretera conochoa Huaraz 2010-2011*. Obtenido de <http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/1449>
- Aviles, L. (2015). *Reciclaje de mezclas bituminosas en caliente*. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/6270/7/06.pdf>
- Bissada, N., & Stetler, K. (1987). *Significance of the width of keratinized gingiva on the periodontal status of teeth with submarginal restorations*. *Journal of periodontology*. Obtenido de <https://aap.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1902/jop.1987.58.10.696>
- Cajal, A. (2018). *Fundamento Teórico de una Investigación o Proyecto*. Obtenido de Lifeder: <https://bit.ly/2XqeoGh>
- Cancinos Sazo, G. A. (2013). *RECICLADO EN FRÍO IN SITU EN LA REHABILITACIÓN DE PAVIMENTOS FLEXIBLES CON ASFALTO ESPUMADO Y RECOMENDACIÓN DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE CONSTRUCCIÓN PARA GUATEMALA*. Obtenido de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/id/eprint/5044>
- Cancinos Sazo, G. A. (2013). *Reciclado en frio in situ en la rehabilitacion de pavimentos flexiblescon asfalto espumado y recomendación de especificaciones tecnicas deconstruccion para Guatemala*. Obtenido de <https://repositorio.usac.edu.gt>
- Castedo , F., & Wood, L. (1983). *Stabilization with foamed asphalt of aggregates commonly used in low-volume roads*. Obtenido de <https://trid.trb.org/view/194728>
- Ccoyllo Huamán, J. E. (2019). *Método de asfalto espumado para mejorar los factores de diseño de mezclas asfálticas para pavimentos flexibles - Lima*. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12848/1378>
- Contreras Ortega, R. (2014). *Comparación técnico-económica y ecológica del reciclado in-situ, empleando asfalto espumado, con métodos convencionales de mantenimiento periódico de pavimentos flexiblesComparación técnico-económica y ecológica del reciclado in-situ, empleando asfalto es*. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10757/322174>

- Contreras Ortega, R. (2014). *Comparacion tecnico-economico y ecologica del reciclado in situ, empleando asfalto espumado, con metodos convencionales de mantenimiento periodico de pavimentos flexibles*. Obtenido de <https://repositorioacademico.upc.edu.pe>
- Del Val, M. (1998). *Guía para el dimensionamiento de firmes reciclados in situ en frío*.
- Fernández A., R. (2010). *Elementos de la Teoría del Tráfico Vehicular*. Lima - Perú: Fondo Editorial PUCP. Obtenido de <https://bit.ly/337IDVm>
- Fernández Machado, J. M. (2010). *Estudio Definitivo y Ejecución de la carretera Conococha - Yanacancha reciclado con Asfalto Espumado*. Obtenido de <https://repositorio.urp.edu.pe/handle/urp/139>
- Fumadó, J. (2015). *Reciclado en frio in situ. Visión americana de la técnica*. Obtenido de www.concretoline.com/pdf/07construcciones/art_tec/temac01.pdf
- Gonzales Remond, M. H. (2017). *Propuesta para la Mejora de los Pavimentos Asfálticos Utilizando el Metodo del Asfalto Espumado*. Obtenido de <http://tesis.ucsm.edu.pe/repositorio/handle/UCSM/6769>
- Grupo IEA. (2019). *Construcciones Especializadas en Aluminios*. Obtenido de <https://bit.ly/3fnUh1x>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación*. México, D.F: McGraw-Hill. Recuperado el 03 de 08 de 2020
- Higuera, C. (2010). *Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos de carreteras*.
- Jenkins, J. M., & Astington, J. W. (1999). *A longitudinal study of the relation between language and theory-of-mind development. Developmental psychology*. Obtenido de <https://psycnet.apa.org/record/1999-15302-013>
- Krämer, G., Ruckel, A., Henkel, B., & Erbel, R. (1982). *Mitral valve aneurysm revealed by cross-sectional echocardiography in a patient with mitral valve prolapse. International journal of cardiology*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/016752738490010X>
- Limo Pastuso, R. F., & Neira Yopez, C. J. (2020). *ANÁLISIS DEL USO DEL RECICLADO CON ASFALTO ESPUMADO*. Obtenido de <https://bit.ly/38r21yY>
- Martucci, J. L. (2018). *Reciclado de pavimentos in situ utilizando la técnica de asfalto espumado*. Obtenido de <https://bit.ly/3jqDoc2>

- MOP. (2013). *Ministerial de Obras Públicas* (Vol. 4). Santiago, Chile: Planos de obras tipo, Manual de Carreteras.
- MOPC. (2015). *Mantenimiento de carreteras*. Obtenido de <https://bit.ly/3jzSc8p>
- MTC. (2013). *Manual de carreteras: Especificaciones técnicas Generales para construcción*. Obtenido de <https://bit.ly/3eevaiJ>
- MTC. (2014). *Manual de carreteras: Diseño geométrico DG-2014*. Lima. Obtenido de <https://bit.ly/31zQNVN>
- Muñoz, E., Contreras, A., & Molero, M. (2018). *Ingeniería del Medio Ambiente*. Obtenido de <https://bit.ly/39Ofstx>
- Padilla Rodríguez, A. (2014). *MEZCLAS ASFÁLTICAS*. Obtenido de <https://bit.ly/3DtxoqX>
- Paniagua Rodríguez, R. F. (2013). *ESTUDIO EXPERIMENTAL SOBRE MÉTODOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO EN MEZCLAS DE PAVIMENTOS RECICLADOS CON ASFALTO ESPUMADO*. Obtenido de <https://repositorio.uc.cl/>
- Quispe Mamani, J. C. (2018). *Curvas Idf Para La Estación Meteorológica De Viacha, Departamento De La Paz*. Obtenido de <https://bit.ly/3hkAmlS>
- Real Academia Española. (2019). *Precipitación*. En Diccionario de la Lengua Española (edición de tricentenario). Obtenido de <https://www.rae.es/>
- Restrepo Sierra, H. A., & Stephens Zapata, S. A. (2015). *ESTUDIO DE LAS VENTAJAS ECONÓMICAS DEL RECICLAJE EN FRÍO IN SITU DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS*. Obtenido de <https://core.ac.uk/>
- Robles Diaz Valdivia, R. A. (2009). *GUÍA PARA DISEÑAR LA REHABILITACIÓN DE UNA RUTA MEDIANTE EL USO DE ASFALTO ESPUMADO; RECICLANDO EL PAVIMENTO ASFÁLTICO EXISTENTE*. Obtenido de <http://cybertesis.uach.cl/>
- Rodríguez Velásquez, E. D. (2009). *Cálculo del índice de condición del pavimento flexible en la Av. Luis Montero, distrito de Castilla*. Obtenido de <https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/1350>
- Rondón Quintana , H. A., & Alberto Reyes,, F. (2015). *Pavimentos: materiales, construcción y diseño*. Obtenido de <https://bit.ly/3Dzodp4>
- Tacza Herrera , E. B., & Rodriguez Paez, B. O. (2018). *Evaluación de fallas mediante el método PCI y planteamiento de alternativas de intervención para mejorar la condición operacional del pavimento flexible en el carril segregado del corredor*

- Javier Prado. Obtenido de <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/624556>
- Thenoux Z. , G., & Jamet A., A. (1999). *Tecnología delasfalto espumado y diseño de mezcla*. Obtenido de www2.udec.cl
- Ulloa Calderón, A., Múnera Miranda, J. C., & Ramírez Villalobos, W. (2018). *Diseño de materiales granulares estabilizados con asfalto espumado*. Obtenido de <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/1714>
- Universidad de Costa Rica. (2020). *Asfalto Espumado*. Obtenido de <https://www.ucr.ac.cr/>
- Vásquez Varela, L. (2014). *Pavement Condition Index (PCI)*. Obtenido de <https://bit.ly/3AfA4qg>
- Vélez Moreno, F. (2016). *Acciones de mejora al proceso de reciclaje en frío de pavimentos con asfalto espumado en Colombia*. Obtenido de <https://bit.ly/3gLEehM>
- Vildoso Flores, J., & Espinoza Juro, P. (2014). *Estudio de la técnica del reciclado con asfalto espumado en las carreteras La Oroya – Chicrín – Huánuco – Tingo María – Dv. Tocache y Conococha – Yanacancha*. Obtenido de <http://repositorio.urp.edu.pe/handle/URP/2173>

ANEXOS

Anexo 1: Matriz de Consistencia

Anexo 2: Operacionalización de variable

Anexo 1: Matriz de Consistencia

ANALISIS DE LA TECNICA DEL RECICLADO CON ASFALTO ESPUMADO PARA LA REHABILITACION DE LA CARRETERA CONOCOCHA – HUARAZ					
Titulo	OBJETIVO GENERAL	HIPOTESIS GENERAL	VARIABLE INDEPENDIENTE	INDICADORES	METODOLOGIA
¿Cómo se podría hacer la rehabilitación de las carreteras de Conococha-Huaraz usando la técnica del reciclado con asfalto espumado?	La rehabilitación de las carreteras Conococha – Huaraz usando la técnica del reciclado con asfalto espumado.	El uso de la Técnica del reciclado con asfalto espumado tiene como principales ventajas el aporte técnico - económico y ecológico, así como también de ser una buena opción al uso de las técnicas tradicionales.	Técnica del reciclado con asfalto espumado	- Temperatura del asfalto - Dosis de agua inyectada - Presión del asfalto en cámara de expansión - Viscosidad del asfalto	* METODO DE INVESTIGACION METODO: Deductivo Orientación: Aplicada Enfoque: Cuantitativo Recolección DE datos: Retroactiva
PROBLEMA ESPECIFICO 1	OBJETIVO ESPECIFICO 1	HIPOTESIS ESPECIFICOS 1	VARIABLE DEPENDIENTE		* TIPO DE INVESTIGACION Descriptiva - Relacional - Explicativo
¿Cuál es el aporte estructural del uso de la técnica del reciclado con asfalto espumado en las carreteras de Conococha-Huaraz?	Analizar las condiciones de la carpeta asfáltica antes y después del reciclado con asfalto espumado	Uno de los mayores beneficios al usar la Técnica del Asfalto Espumado es que produce un material viscoelástico que posee una flexibilidad mejorada y resistencia a la deformación			* NIVEL DE INVESTIGACION Descriptivo
PROBLEMA ESPECIFICO 2	OBJETIVO ESPECIFICO 2	HIPOTESIS ESPECIFICOS 2			* DISEÑO DE INVESTIGACION No experimental Retrospectivos Longitudinales
¿En qué medida la técnica del Reciclado con asfalto espumado puede mejorar la capacidad del pavimento a las cargas proyectadas que ejerce el alto tránsito pesado de Conococha-Huaraz?	Proponer un estudio previo antes del aplicación de la técnica del reciclado con asfalto espumado para el mejoramiento de pavimento	La adecuada incorporación de material como cemento o asfalto en esta técnica nos permitiría obtener un pavimento rígido que podría soportar las cargas ejercidas por el transporte pesado	Rehabilitación del pavimento	-Razón del expansión (Ex) -Vida media (t _l /2)	* POBLACION Carpeta asfáltica en frío * MUESTRA No paramétrica, para la zona DE Conococha - Huaraz * TECNICA
PROBLEMA ESPECIFICO 3	OBJETIVO ESPECIFICO 3	HIPOTESIS ESPECIFICOS 3			Recolección DE datos ya que el investigador obtendrá la data DE diversas tesis hechas en las zonas DE Conococha - Huaraz
¿Cuáles son las ventajas económicas tras el uso del reciclado de asfalto espumado?	Justificar los gastos necesarios para el uso del reciclado de pavimento espumado	Usando la técnica del reciclado con asfalto espumado podemos economizar gastos en la construcción de pavimentos			* INSTRUMENTOS Registro de resultados hechos en Laboratorio y campo

Fuente: Elaboración Propia

Anexo 2: Operacionalización de Variables

VARIABLE	DEFINICION	DEFINICION OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ESCALA DE MEDICION	UNIDAD DE MEDIDA	ESCALA	INSTRUMENTO
INDEPENDIENTE	Se logra mediante un proceso, en el cual se inyecta una pequeña cantidad de agua fría y aire comprimido a una masa de asfalto en caliente dentro de una cámara de expansión generando espontáneamente espuma.	Son los materiales de pavimento retirados o reprocesados que contienen asfalto o agregados. Estos materiales se generan cuando se extrae la carpeta asfáltica para la reconstrucción.	Factores del reciclado de asfalto espumado	<ul style="list-style-type: none"> - Temperatura del asfalto - Dosis de agua inyectada - Presión del asfalto en cámara de expansión - Viscosidad del asfalto 	Temperatura Agua inyectada Presión	C°%BAR	cuantitativa continua	Formato de laboratorio
Técnica del reciclado con asfalto espumado								
DEPENDIENTE	Es el proceso por medio del cual la estructura del pavimento, es restaurada a su condición original de soporte.	Técnica de rehabilitación de carreteras, que consiste en la reutilización de los materiales procedentes de las capas del pavimento que ya han estado en servicio, pero que mezclados homogéneamente con un nuevo ligando y ciertos aditivos, tienen el potencial de ser reutilizados.	Caracterización de las propiedades del asfalto espumado	<ul style="list-style-type: none"> -Razón del expansión (Ex) -Vida media (tl/2) 	Razón numérica	numérico	adimensional	Formato de laboratorio
Rehabilitación del pavimento					Tiempo	segundos (s)	cuantitativa continua	

Fuente: Elaboración Propia

