



**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

**TESIS**

**“GUÍA PARA LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS MEDIANTE EL USO  
DE ASFALTO ESPUMADO, EN EL TRAMO (KM 121+200 A 123+000) EN  
EL CENTRO POBLADO DE PUMAPUQUIO, DISTRITO DE  
CCAPACMARCA, PROVINCIA DE CHUMBIVILCAS, REGIÓN DE  
CUSCO 2018”**

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

**AUTOR:**

Bach. RAMOS ENCISO, Bryan

**ANDAHUAYLAS - PERÚ**

**2019**

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo está dedicado principalmente a Dios, por haberme dado la vida y permitir haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional. A mi padre Félix Enciso Rodas, por su apoyo incondicional, que, sin duda alguna en el proyecto de mi vida, me ha demostrado su amor, corrigiendo mis faltas y celebrando mis triunfos. A todos mis familiares por demostrarme siempre su cariño y apoyo, sin importar nuestras diferencias de opiniones.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por protegerme durante todo mi camino y darme fuerzas para superar obstáculos y dificultades a lo largo de toda mi vida. A mis padres por su confianza, consejos, apoyo y motivación constante que me brindaron en toda mi formación profesional. A la empresa CONALVIAS CONSTRUCCIONES SAS SUCURSAL PERU, por haberme facilitado la información necesaria para la ejecución de la presente investigación y a mis asesores por dedicar su tiempo y conocimientos en la elaboración del proyecto de investigación.

## RESUMEN

La presente tesis, titulado “Guía para la estabilización de suelos mediante el uso de asfalto espumado, en el tramo (KM 121+200 A 123 +000) centro poblado de Pumapuquio, distrito de Ccapacmarca-Chumbivilcas-Cusco”, tiene como objetivo “Proponer una guía práctica para realizar los estudios y diseño de una estabilización de suelos.”; utilizando el nivel de investigación y método: descriptivo-explicativo-inductivo. La población y muestra es el tramo (KM 121+200 A 123 +000) centro poblado de Pumapuquio distrito de Ccapacmarca-Chumbivilcas-Cusco. Este trabajo pretende reunir en un solo documento, información sobre el asfalto espumado, generalidades de diseño, uso, procedimiento de trabajo y ventajas.

En el **Primer capítulo**, se presenta la descripción de la realidad problemática, planteamiento del problema, objetivos e hipótesis.

En el **Segundo capítulo**, se realizó una revisión de la literatura de temas relacionados con la estabilización de suelo con asfalto espumado,

En el **Tercer Capítulo**, se realizó el marco metodológico tipo de investigación, población y muestra.

En el **Cuarto Capítulo**, se muestran los resultados obtenidos, determinando que 2,5% es el contenido óptimo de asfalto espumado a utilizar en el diseño, donde la densidad de la mezcla sería 2,199 gr/cm<sup>3</sup>, la resistencia a la tracción indirecta 449,63 kPa (para probetas secas), 199,35 kPa (para probetas húmedas); y la resistencia conservada 44%. Asimismo, se realizaron los estudios previos a través de los ensayos para saber los parámetros de diseño de mezclas para la estabilización con asfalto espumado.

Por último, **en el Quinto capítulo**, se dan las conclusiones y recomendaciones.

## ABSTRACT

The present thesis, entitled "Guide for the stabilization of soils through the use of foamed bitumen, in the section (KM 121 + 200 A 123 +000), populated center of Pumapuquio, district of Ccapacmarca-Chumbivilcas-Cusco", has as objective " Propose a practical guide to carry out studies and design a soil stabilization. "; using the level of research and method: descriptive-explanatory-inductive. The population and sample is the section (KM 121 + 200 A 123 +000) populated center of Pumapuquio district of Ccapacmarca-Chumbivilcas-Cusco. This work aims to gather in a single document, information on the foamed asphalt, general design, use, work procedure and advantages.

In the **first chapter**, the description of the problematic reality, the problem statement, objectives and hypotheses are presented.

In the **second chapter**, a review of the literature on topics related to the stabilization of soil with foamed bitumen was carried out, as well as a study history.

In the **Third Chapter**, the methodological framework for research, population and sample was carried out.

In the **Fourth Chapter**, the results obtained are shown, determining that 2.5% is the optimum content of foamed bitumen to be used in the design, where the density of the mixture would be 2,199 gr / cm<sup>3</sup>, the indirect tensile strength 449, 63 kPa (for dry specimens), 199.35 kPa (for wet specimens); and the resistance conserved 44%. Likewise, previous studies were carried out through the tests to know the design parameters of mixtures for stabilization with foamed bitumen.

Finally, **in the fifth chapter**, the conclusions and recommendations are given.

## ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTO.....	iii
RESUMEN.....	iv
ABSTRACT.....	v
ÍNDICE GENERAL.....	vi
ABREVIATURAS .....	xvii
INTRODUCCIÓN .....	xx
CAPÍTULO I.....	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	1
1.1 Descripción de la realidad problemática .....	1
1.2 Delimitación de la investigación .....	2
1.2.1 Delimitación Espacial.....	2
1.2.2 Delimitación Social.....	6
1.2.3 Delimitación Temporal.....	6
1.2.4 Delimitación Conceptual.....	6
1.3 Formulación del problema.....	7
1.3.1 Problema principal.....	7
Problemas específicos.....	7
1.4 Objetivos.....	8

1.4.1 Objetivo General.....	8
1.4.2 Objetivos Específicos. ....	8
1.5 Hipótesis.....	9
1.5.1 Hipótesis General.....	9
1.5.2 Hipótesis Específicas. ....	9
1.6 Justificación de la investigación. ....	10
CAPÍTULO II.....	12
MARCO TEÓRICO.....	12
2.1 Antecedentes del problema.....	12
2.2 Bases teóricas .....	20
2.2.1 Generalidades sobre los suelos. ....	20
2.2.1.2 Sistema de clasificación de suelos SUCS (ASTM D- 2487).....	25
2.3 Definición de términos básicos.....	67
CAPÍTULO III.....	70
MARCO METODOLÓGICO.....	70
3.1 Tipo y Nivel de investigación.....	70
3.1.1 Tipo de investigación.....	70
<b>3.1.2 Nivel de investigación</b> .....	71
3.2 Método y diseño de la Investigación .....	71
3.2.1 Método de la Investigación.....	71

3.2.2 Diseño de la Investigación.....	72
3.3 Población y Muestra.....	72
3.3.1 Población.....	72
3.3.2 Muestra.....	72
3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	73
3.4.1 Técnicas.....	73
3.4.2 Instrumentos.....	74
<b>3.4.3 Métodos de análisis de datos.....</b>	<b>74</b>
<b>3.4.4 Fuentes.....</b>	<b>75</b>
CAPÍTULO IV.....	76
RESULTADOS.....	76
“GUÍA PARA LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS MEDIANTE EL USO DE ASFALTO ESPUMADO, EN EL TRAMO (KM 121+200 A 123+000) EN EL CENTRO POBLADO DE PUMAPUQUIO, DISTRITO DE CCAPACMARCA, PROVINCIA DE CHUMBIVILCAS, REGIÓN DE CUSCO”.....	76
4.1 Estudio de ingeniería de la vía existente.....	76
4.2 Medición deflectométrica.....	77
4.2.1 Descripción del personal y equipos empleados.....	77
4.2.2. Trabajos de campo.....	78
4.3 Estimación de tránsito.....	82

4.3.1 Información general.....	82
4.3.2 IMDa de diseño.....	83
4.3.4.- Metodología.....	90
4.3.5 Trabajo de gabinete.....	92
4.4 Mecánica de suelos.....	98
4.3.1 Resultados de ensayos realizados. ....	98
4.5 Diagnostico y evaluación .....	107
4.5.1 Diseño de pavimentos.....	107
4.5.2 Comportamiento de un pavimento asfáltico. ....	108
4.5.3 Subrasante.....	109
4.5.4 Alternativa de solución para la sub razante. ....	111
4.6 Diseño de mezcla para la estabilización con asfalto espumado .....	112
4.6.1 Objetivo general.....	112
4.6.2 Introducción a la tecnología de estabilización con asfalto espumado. ....	113
4.6.3 Consideraciones para el diseño de mezclas con asfalto espumado. ....	114
Anexo 1: Ficha Técnica del Documento del Cemento Asfáltico (Petro Perú PEN 85/100)	
.....	120
Anexo 2: Caracterización de Espumado, Análisis Granulométrico de Agregado Fino y	
Grueso (ASTM C136/C136M14) y Límites de Consistencia de Suelos ASTM D4318-10 ...	121
4.6.4 Diseño de mezcla con asfalto espumado. ....	125

Anexo 3: Resultado de Ensayos de Tracción Indirecta (Muestra N° A1189 16).....	130
4.6.5 Resultados y conclusiones. ....	132
4.7 Limpieza de calzadas y bermas .....	133
4. 7.1 Limpieza. ....	133
4.7.2 Equipos y herramientas.....	133
4.7.3 Procedimiento de ejecución. ....	133
4.8 Metodología del trabajo.....	134
4. 8.1 Descripción del trabajo de campo.....	134
Preparación de la superficie existente .....	136
4.8.2 Distribución y mezcla del material. ....	136
4.8.3 Equipos de trabajo. ....	137
4.8.4 Proceso de estabilización. ....	138
8.5 Compactación y perfilado.....	139
4. 9 Obtención de resultados .....	140
CAPÍTULO V .....	154
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	154
5.2 Conclusiones.....	154
5.2 Recomendaciones .....	156
Anexo 4: Registro fotográfico .....	159

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: <i>Tramos del Proyecto</i> .....	4
Tabla 2: <i>Principales Poblados que Atraviesa el Corredor</i> .....	4
Tabla 3: <i>Clasificación de los Suelos AASHTO M-145</i> .....	22
Tabla 4: <i>Simbología de Tipo de Suelo (SUSCS)</i> .....	26
Tabla 5: <i>Clasificación de los Suelos (SUCS)</i> .....	26
Tabla 6: <i>Clasificación de Suelos según AASHTO M-145 y su Correlación con la Clasificación de Suelos SUCS (ASTM D 2487) y la Capacidad Portante CBR</i> .....	33
Tabla 7: <i>Características de Temperatura del Agregado</i> .....	49
Tabla 8: <i>Contenido de Asfalto Espumado Típico Relativo a Granulometría del Agregado</i> ....	52
Tabla 9: <i>Resistencia a la Tracción Indirecta de Materiales Estabilizados con Asfalto Espumado</i> .....	54
Tabla 10: <i>Rangos de Módulos Resilientes Típicos para Material Estabilizado, Ensayados en Laboratorio</i> .....	55
Tabla 11: <i>Factores de Drenaje F Drenaje para Estimar Rigideces de Terreno de Material Estabilizado con Asfalto</i> .....	58
Tabla 12: <i>Módulos Resilientes para Material Estabilizado Después de Alcanzar el Estado de Régimen (Fase 2)</i> .....	59
Tabla 13: <i>Comparativa de Estabilización</i> .....	61
Tabla 14: <i>Cuadro de Selección del Tipo de Estabilización</i> .....	63
Tabla 15: <i>Diferentes Materiales para la Estabilización de Suelos</i> .....	65

Tabla 16: <i>Deflexiones con el Equipo Fueron Procesados y Adicionalmente Fueron Corregidos por Carga a 16 KN</i> .....	81
Tabla 17: <i>Deflexiones con el Equipo Fueron Procesados y Adicionalmente Fueron Corregidos por Carga a 16 KN</i> .....	85
Tabla 18: <i>Tránsito de Diseño</i> .....	90
Tabla 19: <i>Tráfico Vehicular por Sentido – IMDs Estación El Quehuire</i> .....	93
Tabla 20: <i>Tráfico Vehicular por Sentido – IMDs Estación E2 – Mara</i> .....	94
Tabla 21: <i>Tráfico Vehicular por Sentido - IMDs Estación E3 – Velille</i> .....	95
Tabla 22: <i>Tráfico Vehicular por Sentido - IMDa Estación Quehuire (Marzo 2016)</i> .....	96
Tabla 23: <i>Tráfico Vehicular por Sentido - IMDa Estación Velille (Marzo 2016)</i> .....	97
Tabla 24: <i>Resultados de ensayos en el Corredor</i> .....	99
Tabla 25: <i>Cantidades de Cemente Recomendadas para Materiales Estabilizados con Asfalto Espumado</i> .....	102
Tabla 26: <i>Resumen de Resistencias a la Tracción Indirecta</i> .....	103
Tabla 27: <i>Valores de Módulo Resiliente (MR) Utilizados</i> .....	110
Tabla 28: <i>Longitud de Sectores que Cumplen Estructuralmente para El periodo de Diseño, según Estudio de Tránsito</i> .....	110
Tabla 29: <i>Resumen de Ensayos de Espumación - Medida de la Razón de Expansión y Vida Media</i> .....	116
Tabla 30: <i>Resumen de Condiciones Óptimas de Espumación</i> .....	117
Tabla 31: <i>Descripción de la Designación N° Muestra y N° de Informe de los Diferentes Agregados Ensayados</i> .....	119
Tabla 32: <i>Descripción de la Designación N° Muestra y N° de Informe de los Diferentes Agregados Ensayados</i> .....	120
Tabla 33: <i>Caracterización de Agregados para Diseño de Mezcla para la Estabilización con Asfalto Espumado/ Material Granular KM 121+850</i> .....	121
Tabla 34: <i>Análisis Granulométrico de Agregado Fino y Grueso (ASTM C136/C136M14)</i> ...122	
Tabla 35: <i>Límite de Consistencia de los Suelos ASTM D4318-10</i> .....	124
Tabla 36: <i>Exigencias de Filler Activo Requerido</i> .....	125

Tabla 37: <i>Tiempos de Inyección para la Dosificación de Asfalto Espumado</i> .....	127
Tabla 38: <i>Ensayo de Tracción Indirecta para Estabilizar (ASTM D 4867-AASHTO T 283)</i> .. .....	130
Tabla 39: <i>Resumen de Resistencia a la Tracción Indirecta</i> .....	132
Tabla 40: <i>Equipos, Herramientas y Materiales Utilizados</i> .....	135
Tabla 41: <i>Análisis Granulométrico</i> .....	141
Tabla 42: <i>Límite Líquido, Límite Plástico e Índice de Plasticidad de los Suelos km 121 + 400</i> .. .....	142
Tabla 43: <i>Proctor Modificado km 121 + 400</i> .....	143
Tabla 44: <i>Ensayo de Tracción Indirecta km 121 + 400</i> .....	144
Tabla 45: <i>Análisis Granulométrico km 122 + 080</i> .....	145
Tabla 46: <i>Límite Líquido, Límite Plástico e Índice de Plasticidad de los Suelos km 122 + 080</i> .....	146
Tabla 47: <i>Proctor Modificado km 122 + 080</i> .....	147
Tabla 48: <i>Ensayo de Tracción Indirecta km 122 + 080</i> .....	148
Tabla 49: <i>Análisis Granulométrico km 122 + 400</i> .....	149
Tabla 50: <i>Límite Líquido, Límite Plástico e Índice de Plasticidad de los Suelos km 122 + 400</i> .....	150
Tabla 51: <i>Proctor Modificado km 122 + 400</i> .....	151
Tabla 52: <i>Proctor Modificado km 122 + 400</i> .....	152
Tabla 53: <i>Análisis de Precios Unitarios Estabilización de Afirmado con Asfalto Espumado</i> .....	153

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Localización del Proyecto .....	3
Figura 2: Tramos que Conforman el Proyecto .....	3
Figura 3: Principales Poblados que Atraviesa el Corredor .....	5
Figura 4: Vista del corredor Existente .....	5
Figura 5: Esquema de una muestra de suelo, con sus partes principales .....	20
Figura 6: Índice de Plasticidad (IP) - Límite Líquido (LI).....	27
Figura 7: Límites con los que cuenta el suelo .....	30
Figura 8: Producción de Asfalto Espumado.....	35
Figura 9: Relación de Razón de Expansión y Vida Media .....	38
Figura 10: Relación entre Propiedades del Asfalto Espumado .....	40
Figura 11: Dispersión del Asfalto Espumado en la Matriz de Finos .....	44
Figura 12: Materiales Adecuados para Tratamiento con Asfalto Espumado.....	45
Figura 13: Light Weight Deflectometer .....	77
Figura 14: Mediciones de Deflectometría.....	79
Figura 15: Deflexiones Obtenidas Corregidas por Carga a 16 KN.....	80
Figura 16: Ubicación de Estaciones de Conteo y Carga .....	83
Figura 17: Muestra el Criterio Utilizado para Determinar el IMDA de Diseño .....	84
Figura 18: Clasificación de Materiales para Estabilización con Asfalto Espumado .....	101
Figura 19: Determinación de Óptimo Contenido de Agua Espumación para T= 160 °C.....	104
Figura 20: Determinación de Óptimo Contenido de Agua de Espumación para T=180°C ...	105
Figura 21: Coeficientes Estructurales Sugeridos para Materiales Estabilizados con Asfalto Espumado – Valor CBR Saturado a la Densidad Especificada .....	106

Figura 22: Leyes de Fatiga Pavimento Asfaltico .....	109
Figura 23: Solución Alternativa 1 - para Cumplimiento Estructural Hasta 2017 .....	112
Figura 24: Izquierda - Simulación del Proceso de Espumación - Muestra de Asfalto Espumado .....	113
Figura 25: Determinación de Índice de Espumación Vs Vida Media.....	116
Figura 26: Determinación de óptimo Contenido de Agua de Espumación para T= 180°C ...	117
Figura 27: Bandas Granulométricas Surafricana - TG2.....	118
Figura 28: Curva Granulométrica .....	123
Figura 29: Límite de Consistencia de los Suelos ASTM D4318-10.....	125
Figura 30: Procesos Curado y Rotura Mediante Tracción Indirecta.....	129
Figura 31: Actividades de Conservación Rutinaria .....	134

**ÍNDICE DE ANEXOS**

Anexos 1: Ficha Técnica del Documento del Cemento Asfáltico (Petro Perú PEN 85/100)	120
Anexos 2: Caracterización de Espumado, Análisis Granulométrico de Agregado Fino y Grueso (ASTM C136/C136M14) y Límites de Consistencia de Suelos ASTM D4318-10 ..	121
Anexos 3: Resultado de Ensayos de Tracción Indirecta (Muestra N° A1189 16) .....	130
Anexos 4: Registro fotográfico .....	159

## ABREVIATURAS

- **AASHTO:** “American Association of State Highway and Transportation Officials o Asociación Americana de Autoridades Estatales de Carreteras y Transporte.”
- **CBR :** “California bearing ratio o ensayo de relación de soporte de california”
- **ACI:** “American Concrete Institute o Instituto Americano del Concreto.”
- **AENOR:** “Asociación Española de Normalización.”
- **AI:** “The Asphalt Institute o Instituto del Asfalto.”
- **API:** “American Petroleum Institute o Instituto Americano del Petróleo.”
- **ASTM:** “American Society for Testing and Materials o Sociedad Americana para Ensayos y Materiales.”
- **TSR:** “Resistencia a la tracción requerida.”
- **CEN:** “Comité Europeo de Normalización.”
- **EE:** “Especificaciones Especiales.”
- **ISSA:** “International Slurry Surfacing Association o Asociación Internacional de Superficies con lechadas asfálticas.”
- **MTC:** “Ministerio de Transportes y Comunicaciones.”
- **NTP:** “Norma Técnica Peruana.”
- **PCA:** “Portland Cement Association o Asociación del Cemento Portland.”
- **SI:** “Sistema Internacional de Unidades (Sistema Métrico Modernizado).”
- **SLUMP:** “Sistema Legal de Unidades de Medida del Perú (el SI en el Perú).”
- **SUCS:** “Sistema unificado de clasificación de suelos.”
- **EE8.2 TON:** “Ejes equivalentes a ejes estándar de 8,2 ton (18 kpsi)”
- **IMDpi :** “Índice Medio Diario según tipo de vehículo pesado seleccionado (i)”

- Fd**: “Factor direccional que depende del uso de los carriles de la calzada.”
- Fc** : “Factor carril de diseño.”
- Fvpi** : “Factor de equivalencia de carga o destructivo del vehículo i, que depende de las cargas por eje para el parque automotor habitual.”
- Fpi**: “Factor de presión de neumáticos.”
- Fca**: “Factor de crecimiento acumulado por tipo de vehículo pesado.”
- Kpa**: “Kilo pascal”
- Kn**: “Kilo Newton”
- IMDA**: “Índice medio diario anual”
- Mr.** : “Modulo resilente”
- PSI**: “Libra de fuerza por pulgada cuadrada”
- TDR**: “Términos de referencia”
- T3S3 (3S3)**: “Semitrayler (3 ejes, 1 simple, 1 eje doble y 1 eje triple)”
- ITS**: “Resistencia a la tracción indirecta (Kpa)”
- P**: “Carga máxima aplicada (kn)”
- H**: “Altura promedio de la probeta (cm)”
- D**: “Diámetro de la probeta (cm)”
- Ll**: “Limite liquido”
- Lp**: “Limite plástico”
- Ip**: “Índice de plasticidad”
- Lc** : “Límite de contracción”
- T**: “Tiempo”
- Qasf**: “Caudal de asfalto”

•**Hnat:** “Humedad natural”

•**UCS:** “Resistencia a la compresión”

## INTRODUCCIÓN

Con el avance de la tecnología y la necesidad de mantener y rehabilitar la infraestructura vial, a conllevado a que muchos países enfrenten demandas enormes de gastos presupuestales, es así que el asfalto espumado es una técnica relativamente nueva, que permite producir mezclas asfálticas de un modo muy diferente a los sistemas tradicionales. Estas mezclas producidas con asfalto espumado tienen un comportamiento estructural similar a una mezcla tradicional, pero difieren en su estructura interna.

Con la propuesta de una guía para la estabilización de suelos mediante la técnica de asfalto espumado y equipos de construcción especialmente desarrollados para este tipo de aplicación, le confiere ventajas adicionales en comparación a otro tipo de técnicas constructivas; específicamente admite mayor tolerancia en la especificación de agregados y los procesos constructivos pueden ser de muy alto rendimiento. El asfalto espumado puede ser usado como un agente estabilizador con una variedad de materiales que van desde gravas chancadas de buena calidad hasta suelos marginales con plasticidad relativamente alta y también en materiales asfáltico reciclados.

Debido a que las carreteras de nuestro país aún presentan avanzado deterioro, vimos necesario investigar sobre la tecnología de estabilización de suelos con Asfalto Espumado, la cual es una alternativa con beneficios atractivos, para esto nos enfocamos en el mantenimiento de la vía - Heavy Haul Road (Vía de vehículos pesados) para evaluar, analizar y comparar sus beneficios, características y deficiencias, en la aplicación de ellas mismas y comparadas con técnicas convencionales.

## **CAPÍTULO I**

### **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### **1.1 Descripción de la realidad problemática**

El mejoramiento de la vía - Heavy Haul Road (Vía de vehículos pesados), desarrollada por la compañía minera “Las Bambas”, tiene su principal centro de operaciones del proyecto el Campamento ubicado en el distrito de Ccapacmarca, provincia de Chumbivilcas, departamento de Cusco.

Como parte del proyecto “Las Bambas” se vio en la necesidad de mejorar la vía por donde transporta su material minero (cobre), desde el distrito de Challhuahucho (ingreso a la mina) hasta llegar al distrito de Coporaque, provincia de Espinar, con una longitud total de 265.25 Km; sin embargo, esta tesis nos mostrara los resultados de un tramo de la vía (1.8 km). El mejoramiento de esta vía es fundamental para las poblaciones aledañas como también para la minera “Las Bambas”.

Minera Las Bambas S.A, mediante comunicación “LBA-064/2015” del 10/03/2015, solicitó a PROVIAS NACIONAL la suscripción del “Convenio de Cooperación Interinstitucional” para “la conservación rutinaria y atención de emergencias, dar condiciones de la seguridad vial y de la señalización y dispositivos de seguridad vial en los tramos a intervenir que se encuentran bajo su competencia (Rutas Nacionales: PE3SF, PE3SG y PE34E)”.

En este contexto “Las Bambas” como parte de su plan de mantenimiento y obras de conservación vial en la Carretera Chahuahucho – Coporaque (256.25 Km), lanzó la convocatoria, para la elaboración del Estudio Definitivo para el Mantenimiento Periódico de la Vía Chahuahucho – Coporaque, obteniendo la “Buena Pro” la empresa Constructora “CONALVIAS Construcciones S.A.S Sucursal Perú”.

## **1.2 Delimitación de la investigación**

### **1.2.1 Delimitación Espacial.**

El proyecto se encuentra ubicado en las regiones Apurímac y Cusco, tal como se muestra en la Figura N° 1 y Figura ° 2. (Santamarial, 2000)

La carretera Challhuahuacho – Coporaque, se ubica entre las regiones de Apurímac y Cusco; con altitudes comprendidas entre 3700 y 4700 m.s.n.m. Geográficamente el inicio de la vía se ubica en las coordenadas UTM WGS-84 797,397.07 Este y 8’438,034.77 Norte. El final de la carretera tiene coordenadas 874,387.42 Este, y 8’360,811.69 Norte.

Y comunica las provincias de Cotabambas y Chumbivilcas, además une los distritos de Challhuahuacho, Tambobamba, Mara, Capacmarca, Colquemarca, Chamaca, Velille, Coporaque y Espinar. Esta zona se caracteriza por ser agricultora y además cuenta con diversos atractivos turísticos como complejos arqueológicos: (Santamarial, 2000)

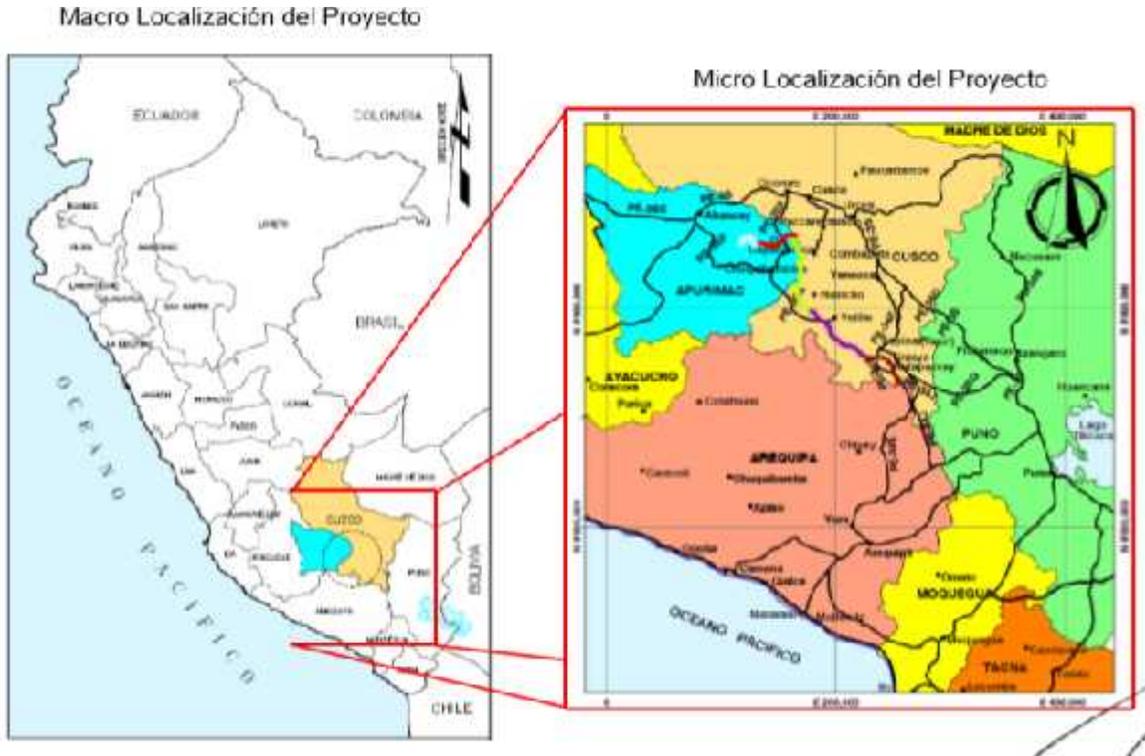


Figura 1: Localización del Proyecto

Fuente: Elaboración propia



Figura 2: Tramos que Conforman el Proyecto

Fuente: Google Earth 2018

Geográficamente los tramos de estudio se localizan en el siguiente cuadro:

Tabla 1

*Tramos del Proyecto*

<b>Tramo</b>	<b>Progresiva inicial (km)</b>	<b>Progresiva final (km)</b>	<b>Región</b>
I	0+000	42+175	Apurímac
II	42+165	112+896	Apurímac - Cusco
III	112+896	200+894	Cusco
IV	200+894	265+249	Cusco

Fuente: Minera Las Bambas S.A.

Seguidamente se incluyen los principales poblados que atraviesa el corredor y son mostrados en la tabla 2 y figura 3.

Tabla 2

*Principales Poblados que Atraviesa el Corredor*

<b>Principales poblados que atraviesa el corredor</b>		
1. Pumamarca	9. Pitic	17. Tiendachayoc
2. Antio	10. Sayhua	18. Wincho
3. Quehira	11. Caracha	19. Carpaiva
4. Chumille	12. Huascabamba	20. Tacllapampa
5. Congota	13. 8 de Agosto	21. Velille
6. Pisaccasa	14. Ccapacmarca	22. Chaychapampa
7. Yuricancha	15. Pumapuquio	23. Urinsaya
8. Mara	16. Yavi Yavi	24. Coporaque



*Figura 3: Principales Poblados que Atraviesa el Corredor*

De los 265.25 km de longitud del proyecto, la tesis solo intervendrá un tramo (km 121+200 a 123+000) de 1.8 km que se encuentra en el centro poblado de Pumapucquio, distrito de Ccapacmarca, provincia de Chumbivilcas, región de Cusco.

En la siguiente figura se muestra un Sub Tramo representativo de todo el corredor:



*Figura 4: Vista del corredor Existente*

Fuente: Elaboración propia

### **1.2.2 Delimitación Social.**

La provincia de Chumbivilcas, viene a ser una de las trece que conforman el departamento del Cuzco en el Perú. Está situada en el extremo suroeste del departamento. Limita por el norte con las provincias de Paruro y de Acomayo; al este, con las provincias de Canas y Espinar; al sur, con el departamento de Arequipa; y al oeste, con el departamento de Apurímac. Con mucha tradición, danzas, fiestas y costumbres populares, es una de las provincias con más riquezas del país.

La provincia tiene una población de 75 585 habitantes, más de la mitad de los cuales es menor de 16 años. Existen 79 comunidades rurales. Si bien el idioma de la población es el quechua, la gran cantidad de migración urbana ha resultado en una mayor influencia del español. Por ley, las escuelas públicas dictan clases bilingües a los niños de la zona.

### **1.2.3 Delimitación Temporal.**

Se desarrolló de conformidad a lo planificado en el cronograma de Gantt. Parte conformante del proyecto de investigación.

### **1.2.4 Delimitación Conceptual.**

#### **A. Estabilización de suelos**

“Es un tipo especial de pavimento de concreto, que gracias a su gran diseño permite la infiltración del agua y el almacenamiento temporal de la misma en la subbase, para su posterior disposición o infiltración en el terreno”. (Flores, 2015)

#### **B. Asfalto Espumado**

El asfalto espumado o ligante expandido “es producido mediante un proceso mecánico en el cual se inyecta, con ayuda de aire presurizado, una cantidad pequeña de agua (entre 1 % y 2 % sobre el peso de ligante) al asfalto caliente (160 °C a 180 °C) dentro de una cámara de

expansión, lo que genera instantáneamente el efecto de espuma en el asfalto (Figura 1). Warm-Mix Asphalt: European Practice”, FHWA, 2008.

### **1.3 Formulación del problema**

#### **1.3.1 Problema principal.**

¿En qué medida una guía práctica, permite realizar los estudios y diseño de una estabilización de suelos en el tramo (km 121+200 a 123+000) en el centro poblado de Pumapuquio, distrito de Ccapacmarca, provincia de Chumbivilcas, el cual entregue conocimientos sobre la tecnología de asfalto espumado, con muestras, ensayos de laboratorio, obtención y comprobación de resultados?

#### **Problemas específicos.**

- ¿Cuál son los conceptos fundamentales de la tecnología del asfalto espumado, nociones generales de diseño, sus características, usos, aplicaciones, procedimiento de trabajo y ventajas?
- ¿Cuáles son los parámetros, especificaciones y normas que están involucradas para el diseño, control de producción y colocación de mezcla suelo – asfalto espumado, en el tramo (km 121+200 a 123+000) de la comunidad de Pumapuquio, distrito de Ccapacmarca, provincia de Chumbivilcas?
- ¿Determinar el control adecuado en la producción de la mezcla suelo – asfalto espumado en obra y garantizar calidad de estabilización de suelos en el tramo (km 121+200 a 123+000) en la comunidad de Pumapuquio, distrito de Ccapacmarca, provincia de Chumbivilcas?
- ¿Cuál es el proceso adecuado para el control en la producción de la mezcla suelo – asfalto espumado en obra y garantizar de esta manera que se cumpla con la calidad en base al diseño

respectivo en el tramo (km 121+200 a 123+000) de la comunidad de Pumapuquio, distrito de Ccapacmarca, provincia de Chumbivilcas?

- ¿Cuál es el funcionamiento de la estabilización y determinar sus propiedades, equipos utilizados y ventajas del sistema, en el tramo (km 121+200 a 123+000) de la comunidad de Pumapuquio, distrito de Ccapacmarca, provincia de Chumbivilcas?
- ¿Cuáles son las proporciones en porcentajes del material estabilizante a usar y con los resultados de laboratorio obtener una estabilización mejorada en la vía?

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo General.**

Proponer una guía práctica para realizar los estudios y diseño de una estabilización de suelos en el tramo (km 121+200 a 123+000) en la comunidad de Pumapuquio, distrito de Ccapacmarca, provincia de Chumbivilcas, el cual entregue conocimientos sobre la tecnología de asfalto espumado, con muestras, ensayos de laboratorio, obtención y comprobación de resultados.

### **1.4.2 Objetivos Específicos.**

- Conocer los conceptos fundamentales de la tecnología del Asfalto Espumado, nociones generales de diseño, sus características, usos, aplicaciones, procedimiento de trabajo y ventajas.
- Establecer cuáles son los parámetros, especificaciones y normas que están asociados en el diseño, control de producción y colocación de mezcla suelo – asfalto espumado en el tramo (km 121+200 a 123+000) en la comunidad de Pumapuquio, distrito de Ccapacmarca, provincia de Chumbivilcas.

- Proponer un proceso adecuado de control en la producción de la mezcla suelo – asfalto espumado en obra y garantizar el cumplimiento de calidad de la estabilización de suelo en el tramo (km 121+200 a 123+000) en la comunidad de Pumapuquio, distrito de Ccapacmarca, provincia de Chumbivilcas.
- Estudiar el funcionamiento de la estabilización de suelos, sus propiedades, equipos utilizados y ventajas del sistema, en el tramo (km 121+200 a 123+000) en la comunidad de Pumapuquio, distrito de Ccapacmarca, provincia de Chumbivilcas.
- Definir proporciones en porcentajes del material estabilizante a usar y con los resultados de laboratorio obtener una estabilización mejorada en la vía.
- Las proporciones en porcentajes del material estabilizante a usar y con los resultados de laboratorio mejora la estabilización de suelo.

## **1.5 Hipótesis**

### **1.5.1 Hipótesis General.**

La aplicación de una guía práctica permite ejecutar adecuadamente los estudios y diseños de una estabilización de suelos en el tramo (km 121+200 a 123+000) en la comunidad Pumapuquio, distrito de Ccapacmarca, provincia de Chumbivilcas, el cual entregue conocimientos sobre la tecnología de asfalto espumado, con muestras, ensayos de laboratorio, obtención y comprobación de resultados.

### **1.5.2 Hipótesis Específicas.**

- A mayor conocimiento de conceptos fundamentales de la tecnología del asfalto espumado, nociones generales de diseño, sus características, usos, aplicaciones y procedimiento, menor riesgo de fallas en la estabilización de suelos/asfalto espumado.

- Los parámetros, especificaciones y normas que están involucradas para el diseño, influyen significativamente en el control de producción y colocación de mezcla suelo – asfalto espumado, en el tramo (km 121+200 a 123+000) en la comunidad de Pumapuquio, distrito de Ccapacmarca, provincia de Chumbivilcas.
- El adecuado proceso de control en la producción de la mezcla suelo – asfalto espumado en obra garantiza el cumplimiento de calidad de la estabilización de suelo en base al diseño respectivo en el tramo (km 121+200 a 123+000) en la comunidad de Pumapuquio, distrito de Ccapacmarca, provincia de Chumbivilcas.
- El correcto funcionamiento de la estabilización, así como la aplicación correcta de sus propiedades, equipos y sistemas, mejorara la aplicación satisfactoria en el tramo (km 121+200 a 123+000) en la comunidad de Pumapuquio, distrito de Ccapacmarca, provincia de Chumbivilcas.

## **1.6 Justificación de la investigación.**

Actualmente en el Perú, la gran mayoría de la infraestructura vial se encuentran en mal estado, es decir existe un deterioro de base, a causa diferentes factores, principalmente a los efectos del tráfico, factores climatológicos, suelos inestables, aumento de la presión de los neumáticos y de radiación solar, lo cual constituye un incremento de gasto para el estado peruano. Por ello se propone una “Guía para la estabilización de suelos mediante el uso de asfalto espumado, en el tramo (km 121+200 a 123+000) en el centro poblado de Pumapuquio, distrito de Ccapacmarca, provincia de Chumbivilcas, región de cusco”, con la finalidad de proponer una alternativa que brinde soluciones a diferentes problemas la infraestructura vial a travez de la aplicación de una nueva técnica de estabilización de suelos con asfalto espumado y

reducir elevados costos de obra con los métodos tradicionales, así mismo que sea de fácil aplicación y que cuente con todos los parámetros de calidad y seguridad.

- La tesis pretende proveer al país de una alternativa que brinde soluciones a los problemas de vías no pavimentadas en deterioro, que sea de bajo costo, de fácil aplicación y que cuente con todos los parámetros de calidad y seguridad.
- La tecnología del asfalto espumado es sumamente fácil de implementar en obra, debido a que los equipos y materiales a usar son muy comerciales en nuestro país.
- El rendimiento de estabilización con asfalto espumado es mayor, comparándolo con las estabilizaciones con otros material (cal, cemento, etc.).

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Antecedentes del problema

**Robles Diaz (2009)**, desarrolló un trabajo de investigación titulado *“Guía para diseñar la rehabilitación de una ruta mediante el uso de asfalto espumado; reciclando el pavimento asfáltico existente”*, con la finalidad de obtener el título profesional de Ingeniero Constructor, en la Universidad Austral de Chile, llegando a las siguientes conclusiones:

1. “El reciclado en frío in-situ es una opción innovadora y que posee bastantes ventajas ecológicas y económicas. Su principal arma de trabajo es la recicladora propiamente tal, la cual realiza el procedimiento de frezar a distintos espesores y mezclar con el ligante.”
2. “Cualquier proyecto de reciclado utilizando asfaltos espumados requiere de un estudio profundo de la ruta, teniendo en cuenta la situación actual del pavimento y lo que se espera obtener de la ruta.”
3. “El asfalto espumado se ha transformado al pasar los años en una excelente alternativa de conservación de caminos ya sea como estabilizador o realizando un reciclado de pavimento asfáltico existente, disminuyendo fuertemente el consumo energético y el costo final del proyecto.”

4. “Los dos criterios más importantes para la determinación del asfalto espumado corresponde a la razón de expansión y vida media, por ende, se debe estudiar de buena forma los porcentajes de agua y temperaturas del asfalto a utilizar en la mezcla.”
5. “Las ventajas de utilizar un reciclado en frío con asfalto espumado son: reutilización del material existente en ruta, lograr una alta calidad de las capas estructurales recicladas, menores tiempos de construcción, seguridad, entre otras.”
6. “El asfalto espumado aún no es un tema que se conozca masificadamente entre las personas involucradas en el ámbito de la construcción local, ya que muchas desconocen de esta tecnología de reciclado in-situ con el uso de asfalto espumado.”
7. “Este trabajo puede aportar bibliográficamente a nuestra Universidad, pues no existe material sobre este tema; puede ser la base para posteriores diseños prácticos de la rehabilitación de una ruta mediante el uso de asfalto espumado, reciclando el pavimento asfáltico existente.”

**Rosales Castañeda (2011)**, presentó un trabajo de investigación titulado “**Rehabilitación de carreteras utilizando asfalto espumado, reciclando el pavimento asfáltico existente**”, con la finalidad de optar al título profesional de Ingeniero Civil, en la Universidad de San Carlos de Guatemala, arribando a las siguientes conclusiones:

1. Con base en la experiencia en cuanto al diseño y evaluación de pavimentos, se puede afirmar que una parte fundamental para determinar el tipo de rehabilitación a aplicar en una ruta existente, es la evaluación visual preliminar de la misma. Por medio de esta evaluación preliminar se logra la identificación de las fallas que posea la carpeta asfáltica de rodadura y de estar expuestas, las capas subyacentes.

2. Diversos estudios y proyectos tanto nacionales como internacionales, han demostrado que el reciclado en frío es una opción que provee al pavimento de una importante mejora en cuanto al aporte estructural, ya que la capa de base, al ser mezclada con la carpeta de rodadura, mejora sus características físicas y mecánicas. Así mismo, la aplicación de esta técnica genera un ahorro significativo de recursos, tanto humanos como económicos y reduce considerablemente los impactos ambientales en el proyecto.
3. Aplicada la técnica del reciclado en frío se produce una mejora sustancial a la estructura de pavimento, y esto en conjunto con la estabilización con asfalto espumado el aporte aumenta aún más, proporcionando una capa de base estabilizada con propiedades mecánicas que aseguran un pavimento más duradero. También representa una buena opción para caminos de terracería.
4. “Realizar el diseño de la mezcla de materiales con asfalto espumado siguiendo los procedimientos establecidos en las normas y utilizando el equipo adecuado, asegurará la optimización de recursos del proyecto.”
5. Asegurar el control de calidad de los materiales, del proceso de reciclado, de los agentes estabilizadores a utilizar y del proceso constructivo en sí, proporcionará los resultados esperados de la obra y asegurará que se mantenga en óptimas condiciones para el período de diseño estipulado.

**Gonzales Remond (2017)**, desarrolló un trabajo de investigación que lleva por título **“Propuesta para la mejora de los pavimentos asfálticos utilizando el método del asfalto espumado”**, con la finalidad de optar título profesional de Ingeniero Civil, en la Universidad Católica de Santa María, arribando a las siguientes conclusiones:

1. “Los agregados fino y grueso, de la cantera “KM 19 – MTC” que han sido estudiados en laboratorio, son los que mejor cumplen los requisitos solicitados en la norma para producción de asfaltos, debido a sus buenos resultados”; frente a la resistencia al desgaste (abrasión: 17.07%), frente a los de las Canteras de Chiguata (abrasión: 40.11 %) y Quebrada del Pato (A.S.A.) (abrasión: 36.22%). Además de la resistencia a los agentes químicos (sulfatos), cantidad de fino y presencia de material orgánico.
2. “Los Agregados de la cantera “KM 19 – MTC” cumplen en lo que respecta al ensayo de absorción (Ag. Fino: 0.42%, Ag. Grueso: 0.86%), de acuerdo a la norma (Ag Fino: 0.50% MAX, Ag. Grueso: 1.0% MAX).”
3. “Las canteras de Chiguata (Ag. Fino: 0.85%, Ag. Grueso: 3.03%) y Quebrada del Pato (A.S.A.) (Ag. Fino: 0.22%, Ag. Grueso: 2.96%) no cumplen.”
4. “Concluimos, que este método de asfalto espumado no necesita el uso de cementos asfálticos especiales, ni aditivos; a los que actualmente se producen en las refinerías (Pen 60-70, 85-100, 120-130).”
5. “El Diseño de Mezclas debe ser dosificado de tal manera que las proporciones de los materiales no excedan de lo permitido”; ya que si la mezcla presenta exceso de material que pasa la malla N° 200 esta presentara segregaciones, si presenta mucha grava, la mezcla se vuelve seca y difícil de compactar, por el contrario, si tiene demasiada arena, la mezcla presentaría problemas en la estabilidad.
6. “Al producir el asfalto espumado la temperatura ideal para calentar el Pen y los agregados es de 132°C; de trabajar a mayor temperatura, al inyectar el agua, probablemente no obtengamos los resultados esperados, y no producirá la espumación requerida.”

7. “Con respecto al ensayo Marshall, el asfalto espumado presento un incremento en la estabilidad; de 1081.15kg frente a 1018.80kg del asfalto en caliente convencional. En el flujo de 3.59mm, frente a 2.80mm.”
8. “La mezcla de asfalto espumado tiene mayor trabajabilidad, porque, a nivel micro las partículas se encuentran completamente lubricadas, por la presencia del agua, en la mezcla. Es debido a esta característica, que la mezcla presenta mayor trabajabilidad.”
9. “El presupuesto de producción de asfalto en caliente es de S/. 785,540.16 y del asfalto espumado es de S/. 663,126.96, diferenciándose por S/. 122,413.20; debido al ahorro de combustible. Económicamente hablando es un ahorro sustancial para el proyecto.”
10. “El asfalto espumado es más económico, porque al producir el asfalto existe un ahorro importante de energía (25Kw/Ton) porque la mezcla se calienta a 132°C y el asfalto caliente convencional a 150°C, esta diferencia ahorra el 30% de combustible.”
11. “La producción de asfalto espumado, implica menor emanación de gases nocivos al aire (38.150kg), porque al producirlo se quema menor combustible; frente a un asfalto en caliente que producido genera en doble de emanaciones al medio ambiente (76.300kg).”
12. “La producción de asfalto espumado, por las características que hemos estudiado, permite una mayor autonomía en el transporte de mezcla asfáltica. Debido a que el margen de temperatura para la colocación de este tipo de asfalto es mayor y se puede hacer hasta casi los 100°C, sin que la mezcla se endurezca, ni presente segregaciones.”
13. “Concluimos que para este método propuesto no se necesita una mayor especialización del personal técnico y de la mano de obra; puesto que los procesos de trabajo son los mismos a los del asfalto en caliente convencional.”

**Fernández Machado (2010)**, presentó un trabajo de investigación titulado “**Estudio definitivo y ejecución de la carretera Conococha – Yanacancha reciclado con asfalto espumado**”, con la finalidad de optar título profesional de Ingeniero Civil en la Universidad Ricardo Palma, llegando a las siguientes conclusiones:

1. “El material para el tratamiento superficial bicapa cumplió satisfactoriamente el requerimiento mínimo de 85.0 % de partículas con una o más caras de fractura con 99.43 % y 99.12 % en los agregados para primera y segunda capa respectivamente.”
2. “Asimismo, se verificó que contenido de partículas chatas y alargadas no excedió del 15.0 % máximo permisible, obteniendo 5.54 % y 10.02 % en los agregados para cada capa, respectivamente.”
3. “De igual forma; el material de base granular, empleado como aporte para recuperar los niveles de la rasante en las zonas críticas, satisfizo los requerimientos técnicos considerados en las especificaciones pertinentes.”
4. “El Plan de Aseguramiento y Control de Calidad realizó un análisis granulométrico y un próctor modificado por kilómetro (900 m<sup>3</sup>) de reciclado con asfalto espumado, este último para determinar la M.D.S. y O.C.H para controles de compactación con Densímetro Nuclear.”
5. “Se hallaron las condiciones óptimas de espumabilidad (PEN 85/100 a 160 °C y 2.50 % de agua de espumación); y enteniendo como rango 0.18 Gln. /m<sup>2</sup> a 0.22 Gln. /m<sup>2</sup>. con una temperatura de esparcido de 70 – 80 °C.” Las estadísticas finales del proyecto arrojaron una tasa de riego efectivo de 0.19 Gln. / m<sup>2</sup> a una temperatura media de 72.30 °C.
6. “A las 24 horas del riego de imprimación se aplicó un esparcido de arena de aproximadamente 9.50 Kg. / m<sup>2</sup>”; todo lo mencionado se realizó para ayudar al curado y

sello de la misma, así como para mejorar la transitabilidad al mismo tiempo que se protege e impermeabiliza dicha base. Mediante esta técnica se obtuvieron los resultados esperados, con penetraciones entre 3.0 y 5.0 mm.

7. “En cuanto al riego de liga del tratamiento superficial bicapa, luego de la observación y el análisis de resultados en diversas pistas de prueba de los diseños planteados”, lo que se hizo fue optar por la siguiente dosificación: “1.50 Lts. /m<sup>2</sup> para la primera capa y 1.60 Lts. /m<sup>2</sup> para la segunda capa de asfalto modificado con polímeros SBS a 170 – 180 °C.”
8. "Asimismo, las tasas propuestas para el esparcido de agregado pétreo fueron en rangos de 16.0 a 18.0 Kg. / m<sup>2</sup> y 8.0 a 10.0 Kg. / m<sup>2</sup> para áridos de 3/4" y 3/8", respectivamente.
9. Luego de los controles realizados se obtuvo un riego promedio de 1.524 Lts. / m<sup>2</sup> a 175.8 °C para la primera capa y 1.594 Lts. / m<sup>2</sup> a 174.8 °C para la segunda capa de asfalto modificado; así como tasa promedio en el esparcido de agregados de 17.40 Kg. /m<sup>2</sup> y 8.74 Kg. / m<sup>2</sup>, respectivamente.
10. “La Unidad de Control de Calidad se encuentra satisfecha con los resultados obtenidos en cuanto a las resistencias de la base reciclada, la imprimación reforzada de la misma y la colocación del tratamiento superficial bicapa”; ya que se alcanzaron los niveles óptimos de ejecución, más aun considerando las condiciones climatológicas y el tráfico pesado que impera en la zona.
11. “Respecto a la evaluación estructural, mediante el control de deflexiones, se obtuvo una deflexión máxima de 56.59 (0.01 mm.) como media global de la evaluación con la viga benkelman.”
12. “Asimismo; los resultados promedio para cada tramo según el número de ejes equivalentes fueron de 56.80 (0.01 mm.)”; para un tráfico de 2.55 x 10<sup>6</sup> y 56.41 (0.01mm.) para un

tráfico de  $1.44 \times 10^6$  proyectado a 10 años; es decir, por debajo de las deflexiones admisibles para cada tramo: 81.9 (0.01 mm.) para el tramo A (0+000 –71+500); y 94.5 (0.01 mm.) para el tramo B (71+500 – 120+000).

13. “La base reciclada con asfalto espumado y la rodadura construidos presentan una adecuada capacidad de soporte a partir de la evaluación de la condición estructural en pavimento terminado”; ya que las deflexiones admisibles no son superadas por las deflexiones características cumpliendo los objetivos del dimensionamiento de espesores para un periodo de servicio de 10 años.
14. “La evaluación de condición funcional dio una rugosidad (IRI) promedio de 2.44 m. / Km., cumpliendo el valor máximo requerido en las EE.TT. de 3.00 m. / Km. En consecuencia, el Índice de Serviciabilidad final obtenido (PSI) fue de 3.21.”; ambos valores son óptimos para asegurar la funcionalidad y el confort del pavimento construido considerando las condiciones climatológicas y de tráfico pesado que imperan en la zona.
15. “En cuanto a la evaluación de la condición de seguridad, se obtuvo un espesor promedio de la macrotextura de 2.83 mm. y una fricción media de la microtextura de 0.65.”; estos valores cumplen los requerimientos mínimos exigidos para asegurar la seguridad del pavimento, los cuales son 1.20 mm. para la macrotextura y 0.45 para la microtextura.
16. “Los requerimientos y parámetros de control estipulados en las especificaciones técnicas de las partidas del proyecto han tenido éxito, demostrando la eficiencia de la frecuencia de ensayos bosquejada en el Plan de Aseguramiento y Control de Calidad.”
17. “Finalmente, los ensayos especiales (no ejecutables en obra) han sido efectuados por laboratorios externos calificados y certificados.”

## 2.2 Bases teóricas

### 2.2.1 Generalidades sobre los suelos.

#### 2.2.1.1 Definición de suelo.

Tomando en cuenta los términos de la ingeniería, suelo “es el sustrato físico sobre el que se realizan las obras, del que importan las propiedades físico-químicas, especialmente las propiedades mecánicas.” (Paez, 2011)

Además, “se diferencia del término roca al considerarse específicamente bajo este término un sustrato formado por elementos que pueden ser separados sin un aporte significativamente alto de energía.” (Paez, 2011)

Este autor considera el suelo como un sistema multifase formado por:

- “Fase sólida, que constituyen el esqueleto de la estructura del suelo.”
- “Fase líquida (generalmente agua).”
- “Fase gaseosa (generalmente aire) que ocupan los intersticios entre los sólidos.”

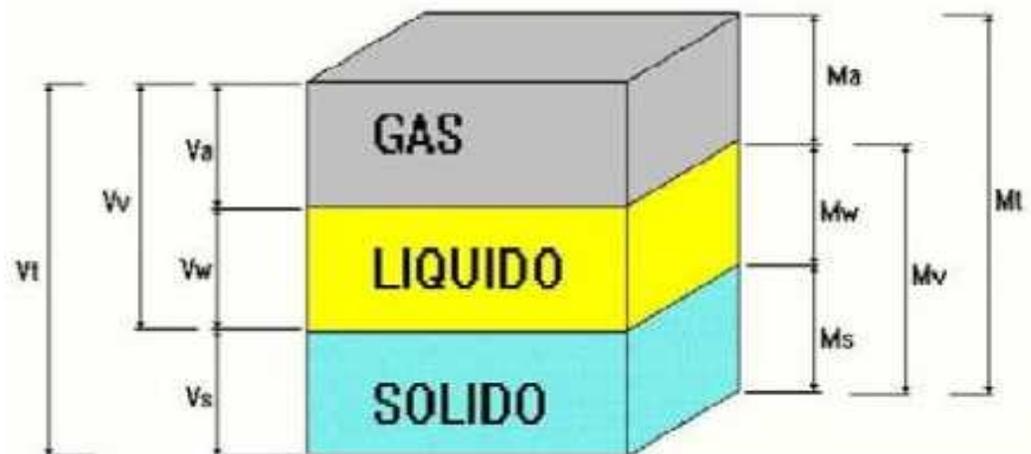


Figura 5: Esquema de una muestra de suelo, con sus partes principales

Fuente: Maribel Paez Ponz (2011)

Por otro lado, para poder definir de qué manera se comporta el suelo ante la obra que en el incide, se pueden distinguir tres diferentes grupos de parámetros:

**Parámetros de identificación:** Son los más significativos la granulometría (distribución de los tamaños de grano que constituyen el agregado) y la plasticidad (la variación de consistencia del agregado en función del contenido en agua). El tamaño de las partículas va desde los tamaños granulares conocidos como gravas y arenas, hasta los finos como la arcilla y el limo. Las variaciones en la consistencia del suelo en función del contenido en agua diferencian también las mencionadas clases granulométricas principales.

**Parámetros de estado fundamentales:** Son la humedad (contenido en agua del agregado), y la densidad, referida al grado de compacidad que muestren las partículas constituyentes.

**En función de la variación de los parámetros de identificación y de los parámetros de estado:** Varía el comportamiento geomecánico del suelo, definiéndose un segundo orden de parámetros tales como la resistencia al esfuerzo cortante, la deformabilidad o la permeabilidad. (Paez, 2011)

#### ***2.2.1.2 Clasificación de los suelos en base a “Norma AASHTO M-145”.***

Los suelos tienen adquieren una clasificación con el propósito de que se pueda entender la manera en la que se comportan:

La American Association of State Highway Officials adoptó este sistema de clasificación de suelos (AASHTO M 145), tras varias revisiones del sistema adoptado por el Bureau of Public Roads de Estados Unidos, en el que los suelos se agrupan en función de su comportamiento como capa de soporte o asiento del firme. Es el sistema más utilizado en la clasificación de suelos en carreteras. (AASHTO M 145, s.f.)

En base al tamaño de las partículas que conforman los suelos, la “Norma AASHTO M -145”, los clasifica de la siguiente manera:

- Grava: “de un tamaño menor a 76.2mm (3”) hasta el tamiz No 10 (2mm).”
- Arena Gruesa: “de un tamaño menor a 2mm hasta el tamiz No 40 (0.425mm).”
- Arena Fina: “de un tamaño menor a 0.425mm hasta el tamiz No 200 (0.075mm).”
- Limos y Arcillas: “tamaños menores de 0.075mm.”

“Se clasifica los suelos basándose en sus propiedades mecánicas principalmente, los divide en siete grupos diferentes, designados desde el A-1 hasta A-7”. (AASHTO M 145, s.f.)

A continuación, se presentan los siete grupos en la siguiente tabla:

Tabla 3

*Clasificación de los Suelos AASHTO M-145*

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos pasa el tamiz #200)							Materiales limoarcillosos (más de 35% pasa el tamiz #200)			
	A-1- a	A-1- b	A-3 <sup>A</sup>	A-2- 4	A-2- 5	A-2- 6	A-2- 7	A-4	A-5	A-6	A-7- 5 A-7- 6
Tamizado, % que pasa											
Nº.10 (2.00mm)	50ma x.										
Nº40 (425 µm)	30ma x.	50ma x.	51mi n.								
Nº200 (75 µm)	15ma x.	25ma x.	10ma x.	35ma x.	35ma x.	35ma x.	35ma x.	35ma x.	36mi n.	36mi n.	36mi n.
consistencia											
Limite líquido						B		40ma x.	41mi n.	40ma x.	41mi n.
Índice de plasticidad		6max.	N. P.			B		10ma x.	10ma x.	11mi n.	11mi n.
Tipos de materiales	Cantos, grava y arena		Aren a fina	Grava y arena limoarcillosas				Suelos limosos		Suelos arcillosos	

---

características calificación	Excelente a bueno	Regular a malo
---------------------------------	-------------------	----------------

---

Fuente: Clasificación de los suelos - Norma AASHTO M-145

El suelo A-1, es un “suelo de propiedades óptimas para ser usado en las capas que conforman la estructura de un pavimento y en su orden ascendente de numeración, su comportamiento va decreciendo hasta llegar al suelo A-7, cuya aplicación en carreteras no es recomendable.” (AASHTO M 145, s.f.)

Descripción de los grupos y sub grupos contemplados en la norma AASHTO M-145:

### **Materiales Granulares.**

**A-1.-** “Son suelos bien graduados de tamaño grueso y fino, con un débil aglomerante plástico.”

**A-1-a.-** “En estos se incluyen materiales predominantes de fracción de rocas o grava, con o sin aglomerante.”

**A-1-b.-** “El material predominante es arena gruesa, con o sin un buen aglomerante.

Algunos suelos del grupo A-1 carecen de finos, de manera que deberá agregar cierta cantidad de finos para formar una sub base de buena calidad.”

**A-2.-** “Estos se componen por una amplia porción de materiales granulares que no pueden clasificarse en el grupo A-1 por su contenido de finos y plasticidad.”

Contienen materiales granulares con cantidades considerables de arcillas, los suelos del grupo A-2 son inferiores a los del grupo A-1 debido a su menor graduación y menos aglomerantes. En periodo seco los suelos A-2 son muy estables como superficie de rodamiento, pero esto depende de la clase de aglomerante, sin embargo, en periodos húmedos se pueden ablandar y en periodos secos se pueden disgregar y formar polvaredas.

**A-2-4 y A-2-5.-** “Incluyen diversos materiales granulares que contienen un 35 por ciento máximo de material que pasa el tamiz 0.075mm (No 200).”

**A-2-6 y A-2-7.-** “Incluyen materiales similares a los descritos en los subgrupos A-2-4 y A-2-5, excepto que la porción fina suelo cuenta con arcilla plástica de características similares a los grupos A-6 o A-7.”

**A-3.-** “Estos suelos están compuestos de arenas deficientes en aglomerantes, como la arena de las playas.”

Se encuentran a menudo y son muy inestables excepto cuando están húmedos. Cuando se encuentran confinados son apropiados como bases para cualquier tipo de pavimentos.

#### **Materiales Limo- Arcillosos.**

**A-4.-** “Son suelos muy comunes, predominan los limos con ligeros porcentajes de material grueso y pequeñas cantidades de arcilla.”

**A-5.-** “Estos suelos se encuentran en muy pocas ocasiones, son muy parecidos a los del grupo A-4, excepto porque contienen mica y diátomas que los vuelven muy elásticos e inestables aun en estado seco, haciéndolos tenaces a la compactación.”

**A-6.-** “El típico material de este grupo es un suelo arcilloso plástico, que tienen el 35 por ciento o más de material que pasa el tamiz de 0.075mm (No 200).”

“Los materiales de este grupo suelen tener gran cambio volumétrico, cuando se tiene presencia de humedades altas en el suelo, debido a la presencia de arcillas.”

**A-7.-** “Estos suelos están compuestos principalmente de arcilla como son los del grupo A-6, pero se diferencia de estos por la presencia de partículas uniformes de limo, materia orgánica y mica, lo que los hace muy elásticos.”

**A-7-5.-** “Estos suelos del grupo A-7 tienen índices de plasticidad moderados en relación con límites líquidos, y pueden ser elásticos y expansivos.”

**A-7-6.-** “Son suelos expansivos con altos índices de plasticidad en relación a los límites líquidos.” (AASHTO M 145, s.f.)

### **2.2.1.2 Sistema de clasificación de suelos SUCS (ASTM D- 2487).**

Este sistema de clasificación de suelos al igual que la clasificación AASHTO M-145 describe los suelos para propósitos ingenieriles en base a la determinación en laboratorio del tamaño de partículas, generando así dos grandes grupos de suelos que a continuación se presenta:

- “Suelo de grano grueso (G y S), formado por gravas y arenas, si más del 50% del peso seco de la muestra se retiene en el tamiz N ° 200 (75  $\mu$  m).” (Vargas, 2016)

- “Suelo de grano fino (M y C), si el 50% o más del peso seco de la muestra pasa por el tamiz No 200 (75 -  $\mu$  m).” (Vargas, 2016)

- “Suelos orgánicos (O, Pt), constituidas fundamentalmente por materia orgánica.

Aparte del tamaño de las partículas otro parámetro que sirve para generar la clasificación SUCS en un suelo de grano fino es el límite líquido que presente el suelo analizado.” (Vargas, 2016)

“El Sistema de Clasificación de Suelos SUCS, se vale de unos símbolos de grupo, consistentes en un prefijo que designa la composición del suelo y un sufijo que matiza sus propiedades.” (Bañon, 2000)

En el siguiente esquema se muestra dichos símbolos y su significado:

Tabla 4

*Simbología de Tipo de Suelo (SUSCS)*

<b>Símbolos de grupo (SUCS)</b>			
<b>TIPO DE SUELO</b>	<b>PREFIJ O</b>	<b>SUBGRUPO</b>	<b>SUFIJO</b>
GRAVA	G	Bien graduado	W
ARENA	S	Probablemente	P
LIMO	M	graduado	M
ARCILLA	C	Limoso	C
ORGANICO	O	Arcilloso	L
TURBA	Pt	Limite liquido alto(>50)	H
		Limite liquido bajo(<50)	

Fuente: Clasificación de los suelos - Luis Bañon Blazquez (2000)

En función de estos símbolos, puede establecerse diferentes combinaciones que definen uno y otro tipo de suelo.

Tabla 5

*Clasificación de los Suelos (SUCS)*

<b>Tipología de suelos (SUCS)</b>			
<b>Símbolo</b>		<b>Características generales</b>	
GW	GRAVAS	Limpias	Bien graduadas
GP	(>50% en tamiz	(Finos<5%)	Pobremente graduadas
GM	#4 ASTM)	Con finos	Componente limoso
GC		(Finos>12%)	Componente arcilloso
SW		Limpias	Bien graduadas
SP	ARENA(<50%	(Finos<5%)	Componente limoso
SM	en tamiz #4	Con finos	Componente arcilloso
SC	ASTM))	(Finos>12%)	
ML	LIMOS	Baja plasticidad (LL<50)	
MH		Alta plasticidad(LL>50)	
CL	ARCILLAS	Baja plasticidad (LL<50)	
CH		Alta plasticidad(LL>50)	
OL	SUELOS	Baja plasticidad (LL<50)	
OH	ORGANICOS	Alta plasticidad(LL>50)	

Fuente: Clasificación de suelos - Luis Bañon Blazquez (2000)

Asimismo, “dentro de la tipología expuesta pueden existir casos intermedios, empleándose una doble nomenclatura; por ejemplo, una grava bien graduada que contenga entre un 5 y un 12% de finos se clasificara como GW-GM.” (Bañon, 2000)

“Tras un estudio experimental de diferentes muestras de suelos de grano fino, Casagrande consigue ubicarlos en un diagrama que relaciona el límite líquido (LL) con el índice de plasticidad (IP).” (Bañon, 2000)

En este diagrama, conocido como la “**carta de Casagrande**” de los suelos cohesivos, destacan dos grandes líneas que actúan a modo de límites:

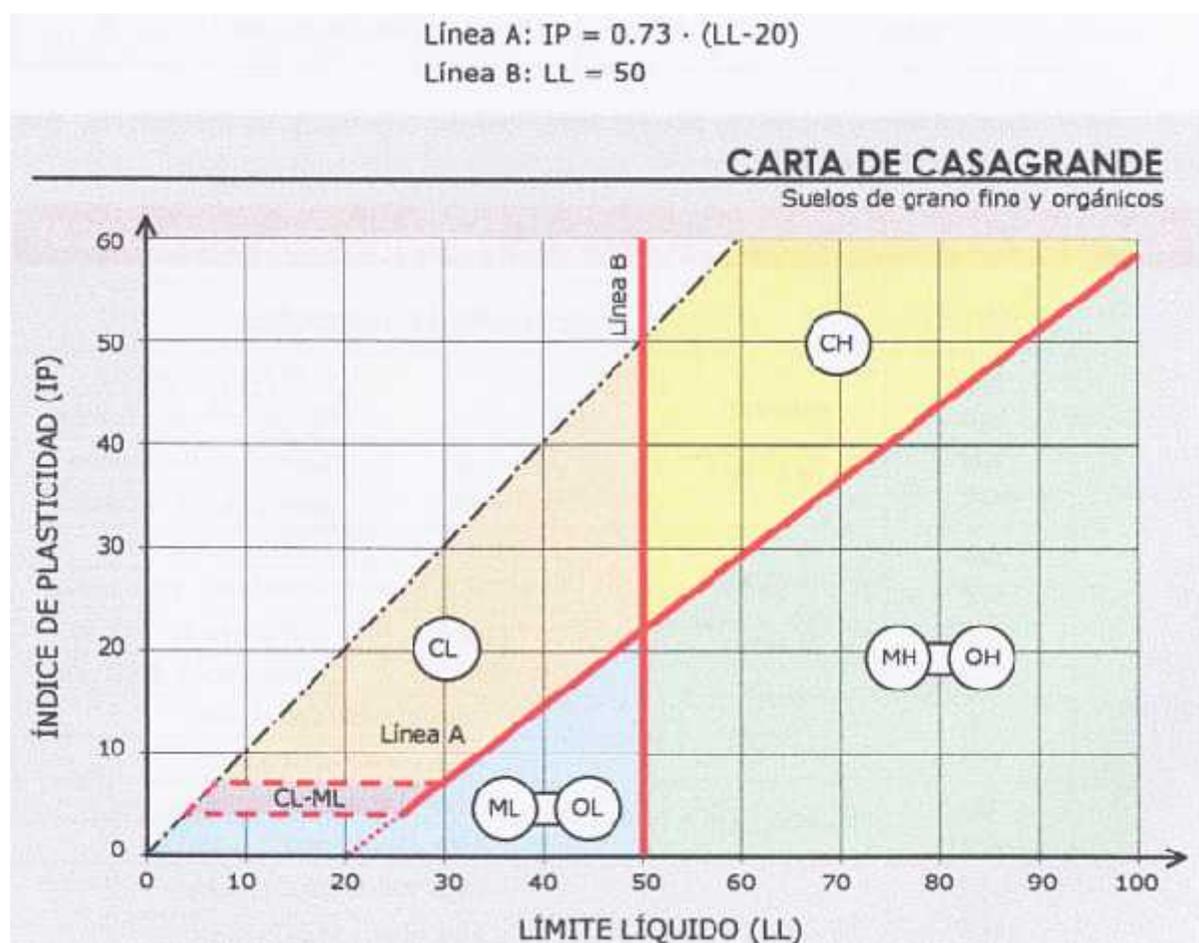


Figura 6: Índice de Plasticidad (IP) - Límite Líquido (LI)

Fuente: Clasificación de suelos - Luis Bañon Blazquez (2000)

### 2.2.1.3 Caracterización de los suelos.

La caracterización se lleva a cabo mediante dos tipos “parámetros de naturaleza” y “parámetros de estado”. A continuación, describiremos cada uno de ellos:

a) **Parámetros de naturaleza:** “Se caracteriza porque no varían ni con el tiempo ni a lo largo de las manipulaciones que puedan realizarse a los suelos durante los trabajos.”

(Bañon B, 2000)

Los más importantes son:

- **Variación volumétrica:** “Muchos suelos se expanden y se contraen debido a los cambios en su contenido de humedad.” (Bañon B, 2000)

Este autor también considera que:

Las presiones de expansión se desarrollan debido a incrementos en la humedad, los cuales deben de ser controlados, ya que estas presiones pueden levantar pavimentos, inclinar postes, fracturar muros, romper tubos de drenaje, etc.; por lo cual, es de suma importancia detectar los suelos expansivos, su composición y el tratamiento más adecuado a seguir para evitar dichos problemas. (Bañon B, 2000)

- **Permeabilidad:** “Se consideran importantes todas las presiones de poro y los relacionados con el flujo de agua a través del suelo; ya que estos dos fenómenos provocan su debilidad en su resistencia o su estabilidad.” (Bañon B, 2000)

- **Granulometría:** “Son los tamaños de los granos que participan (como porcentaje de peso total) de la composición del suelo que representan.” (Bañon B, 2000)

“Las propiedades tanto físicas como mecánicas de los suelos son función directa de su granulometría y su determinación es fundamental para establecer su comportamiento mecánico, principalmente cuando se someten a cargas directamente.” (Bañon B, 2000)

- **Plasticidad:** “Es la propiedad que tiene el suelo para cambiar de forma (dentro de un rango de humedad dado) y mantener sin perder volumen ni romperse cuando se someten a fuerzas de compresión.” (Bañon B, 2000)

- **Límites de A. Atterberg:** Son usados para caracterizan el comportamiento de suelos finos, designados con ese nombre por el científico sueco Albert Maurits Atterberg:

Los límites se basan en el concepto de que en un suelo de grano fino solo pueden existir cuatro estados de consistencia de acuerdo a su humedad. Así, un suelo se encuentra en estado sólido, cuando está seco. Al agregársele agua de poco a poco va pasando sucesivamente a los estados de semisólido, plástico, y finalmente al líquido. Estos límites son denominados por contenidos de humedad que existen en los puntos de transición de un estado al otro.

Las propiedades de un suelo formado por partículas finamente divididas, como una arcilla no estructurada, depende en gran parte de la humedad. El agua forma una película alrededor de los granos y su espesor puede ser determinante para el comportamiento del material.

Para interpretar mejor estos límites se tomará de ejemplo una masa de arcilla. Cuando está tiene mucha cantidad de agua podríamos decir: se encuentra en estado líquido pues la arcilla se escurre con la facilidad de una masa líquida, pero a medida que se evapora el agua que contiene, va haciéndose un tanto plástica. Existe un momento en que la masa de arcilla pasa de estado “líquido” al estado “plástico”. Este límite entre los estados “líquido” y “plástico” se halla representado por el contenido de humedad del suelo y se denomina “límite líquido”.

Si continua la evaporación de agua, la arcilla perderá plasticidad y llegar a secarse hasta adquirir una consistencia semisólida. Este paso del estado plástico al semisólido se le llama límite plástico, su valor está dado por el contenido de humedad que tiene la arcilla en tal estado límite. Para luego tener un último límite que se encuentra en la frontera del estado semisólido al estado sólido, conocido como límite de contracción. (Atterberg, 1846-1916)

Hay cuatro límites para caracterizar el comportamiento de los suelos finos:

- “Límite líquido (LL), contenido de humedad por debajo del cual el suelo se comporta como un material plástico. A este nivel de contenido de humedad el suelo está en el vértice de cambiar su comportamiento al de un fluido viscoso.”
- “Límite plástico (LP), el límite plástico de un suelo es el más bajo contenido de agua en el que el suelo sigue presentando plasticidad.”
- “Límite de contracción (Lc), contenido de humedad por debajo del cual no se produce reducción adicional de volumen o contracción en el suelo.” (Atterberg, 1846-1916)

En la siguiente figura se presenta los diferentes límites con los que puede contar un suelo, así como la transición de los estados en donde estos ocurren:



Figura 7: Límites con los que cuenta el suelo

Fuente: Imágenes Google

**Índice de plasticidad (IP):** “Es una medida de cuánta agua puede absorber un suelo antes de disolverse en una solución. Mientras más alto es este número, el material es más plástico y más débil.” (Bañon B, 2000)

También se debe considerar el IP:

Generalmente la cal reacciona con suelos plástico que tengan un IP entre 10 a 50, reduciendo así significativamente el IP, creando de esta manera un nuevo material con resistencia estructural. Suelos con IP menores a 10, usualmente, no reaccionan tan fácilmente con la cal.

El IP se mide por dos pruebas simples en la mecánica de suelo: el límite líquido y el límite plástico; la diferencia entre los dos es el Índice de Plasticidad.

$$\mathbf{IP = LL - LP}$$

b) **Parámetros de estado:** “No son propios de las características del suelo sino de las condiciones ambientales en que se encuentran. Para suelos sensibles al agua, el parámetro de estado hídrico determinará las condiciones de los rellenos, terraplenes y explanadas en las redes viales.” (Bañon B, 2000)

El autor continúa acotando que:

Su determinación no puede hacerse exclusivamente con el cálculo del contenido en agua natural, sino que es necesario relacionarlo con el contenido de agua específico de suelo al que le corresponde un comportamiento particular.

El método más corriente para indicar el estado hídrico de un suelo es referirse a los valores de los ensayos PROCTOR y CBR, que realizados sobre cada suelo o clase de suelo que se quiere estudiar. (Bañon B, 2000)

- **Resistencia mecánica:** “En los suelos la humedad es muy importante porque determinan la capacidad de estos para resistir las cargas y mantener su estructura en condiciones estables de trabajo hasta ciertas humedades, los suelos pueden mantener resistencias aceptables.” (Bañon B, 2000)

Sin embargo, los suelos pueden dejar de resistir si existe un exceso:

Cuando hay excesos de agua, los suelos se debilitan y pierden la resistencia, que se manifiestan en hundimientos, grietas, cuarteamientos, hinchamientos, etc.

En época húmeda (invierno) los suelos se vuelven débiles, ya que el agua que absorben hace que pierdan resistencia hasta que se saturen. En época seca (verano) pierden humedad y se vuelven muy duros o resistentes, pero en la superficie donde los vehículos circulan, la acción abrasiva de las llantas hace que se genere la soltura de las partículas de suelo abundantemente para producir capas de polvo, con lo cual el deterioro superficial llega a ser severo.

- **La compactación (ensayo próctor):** “Se puede comprobar que cuando se compacta un suelo con una energía de compactación dada, su densidad seca (suelo en estado seco), varía según el contenido en agua hasta alcanzar un máximo de densidad correspondiente a un contenido de humedad denominado óptimo.” (Bañon B, 2000)

“Para alcanzar igual densidad con una humedad distinta a la óptima hay que emplear mayor energía de compactación.” (Bañon B, 2000)

- **La capacidad portante (ensayo CBR):** “El ensayo CBR (California Bearing Ratio), consiste en medir la resistencia al punzonamiento de un suelo sobre las probetas confeccionadas por el procedimiento del ensayo proctor y comparar los valores obtenidos con un valor de referencia patrón.” (Bañon B, 2000)

“Se mide así su capacidad de soportar una carga para cada pareja de valores de densidad-humedad. Se expresa por el índice portante CBR en % del valor de referencia. Cuanto más elevado es el CBR más capacidad portante tiene el suelo.” (Bañón B, 2000)

Tabla 6

*Clasificación de Suelos según AASHTO M-145 y su Correlación con la Clasificación de Suelos SUCS (ASTM D 2487) y la Capacidad Portante CBR*

En el siguiente Tabla se presenta la clasificación de suelos según AASHTO M-145 y su correlación con la clasificación de suelos SUCS (ASTM D 2487) y la capacidad portante CBR:

<b>DIVISIONES PRINCIPALES</b>	<b>SÍMBOLO</b>	<b>COMPORTAMIENTO MECÁNICO</b>	<b>CAPACIDAD DE DRENAJE</b>	<b>Densidad óptima P.M.</b>	<b>CBR I n situ</b>
SUELOS DE GRANO GRUESO	Gravas	GW	Excelente	Excelente	2.00 – 6
		GP	Buena a excelente	Excelente	2.24 0-80
		GM	Buena a excelente	Aceptable a mala	1.76 – 2
		GC	Buena	Mala a impermeable	2.08 5-60
				Mala a impermeable	2.08 – 4
				impermeable	2.32 0-80
				Mala a impermeable	1.92 – 2
				impermeable	2.24 0-40
					1.92 – 2
					2.24 0-40
Arenas		SW	Buena	Excelente	1.76 – 2
		SP	Aceptable a buena	Excelente	2.08 0-40
		SM	Aceptable a buena	Aceptable a mala	1.60 – 1
		SC	Mala a aceptable	Mala a impermeable	1.92 0-25
				impermeable	1.91 – 2
				Mala a impermeable	2.16 0-40
				impermeable	1.68 – 1
				impermeable	2.08 0-20
Limos y arcillas(LL<50)		ML	Mala a aceptable	Aceptable a mala	1.60 – 5-
		CL	Mala a aceptable	mala	2.00 15
		OL	Mala	Casi impermeable	1.60 – 5-
				impermeable	2.00 15
				Mala	1.44 – 4-

GRANO FINO				1.70	8
Linos y arcillas(LL>50)	MH	Malo	Aceptable a mala	1.28 –	4-
	CH	Malo a aceptable		1.60	8
	OH	Malo a muy malo	Casi impermeable	1.44 –	3-
				1.76	5
			Casi impermeable	1.28 –	3-
			1.68	5	
SUELOS ORGÁNICOS	Pt	Inaceptable	Aceptable a mala	-	-

Fuente: Clasificación de suelos - Luis Bañon Blazquez (2000)

### 2.2.2.3 Estabilización con asfalto espumado.

Es importante considerar la estabilización que se realiza con asfalto espumado:

El asfalto caliente (160 – 180 °C) se transforma en asfalto espumado cuando este se mezcla con una pequeña cantidad de la denominada agua atomizada (típicamente un 2 % en masa) en una cámara de expansión especial. En el estado espumado (un estado temporal de baja viscosidad), el asfalto puede ser agregado y mezclado con los agregados a temperatura ambiente y con los contenidos de humedad in-situ. El proceso de asfalto espumado es análogo al de un panadero batiendo la clara del huevo para formar espuma de baja viscosidad, antes de mezclarla bien con la harina. En el proceso de batido, podemos ver que la clara del huevo se transforma en burbujas de películas delgadas llenas con aire, ocupando así un volumen mucho mayor; un estado necesario para la distribución homogénea entre las partículas finas de harina, haciendo posible, de esta manera, alcanzar una mezcla consistente.

El proceso de espumado del asfalto es dependiente del cambio de estado del agua de líquido a vapor, un proceso que está acompañado de una expansión de unas 1500 veces el

volumen original del líquido a una presión atmosférica normal. 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 ésta cambia de estado, y al hacerlo, crea una burbuja con una delgada película de asfalto llena con vapor de agua.

La primera persona en darse cuenta del potencial de usar asfalto espumado como agente estabilizador fue el profesor Ladis Csanyi en la Estación Experimental de Ingeniería (Engineering Experiment Station) en la Universidad Estatal de Iowa (Iowa State University) en 1956. Esta tecnología fue refinada más tarde por la organización Mobil Oil que desarrolló la primera cámara de expansión para mezclar agua con asfalto para generar espuma. El sistema desarrollado por Wirtgen a mediados de los '90 inyecta tanto aire como agua al asfalto en la cámara de expansión, como se muestra en el gráfico. (Wirtgen Manual de Reciclado en Frío, págs. 55-102)

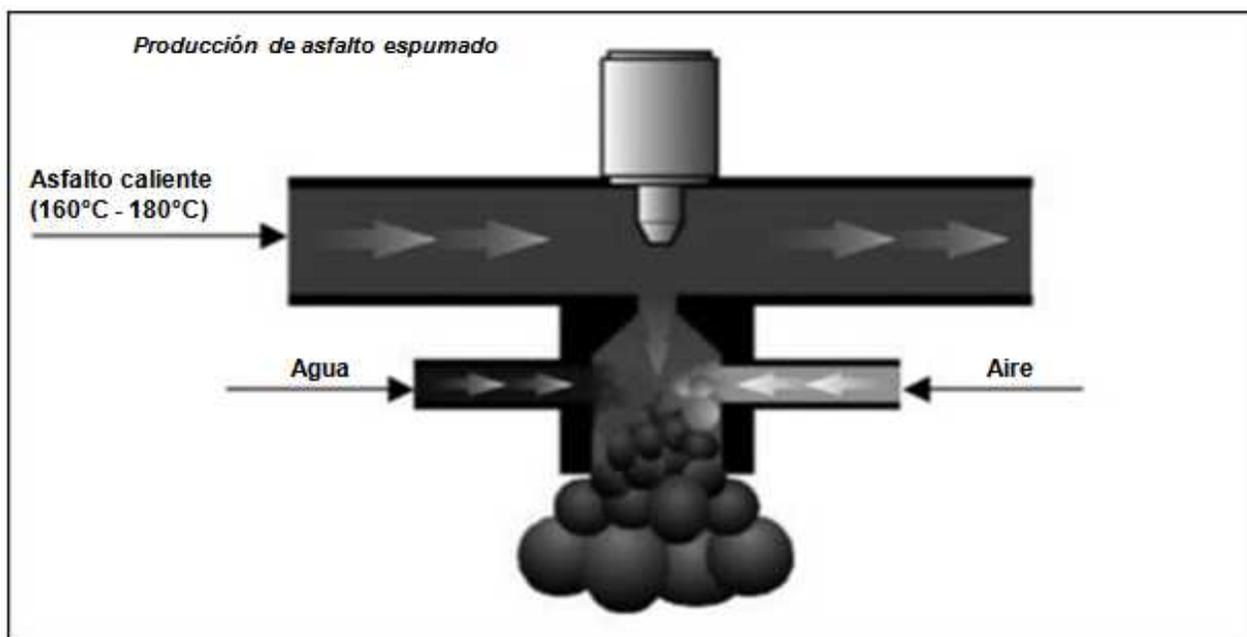


Figura 8: Producción de Asfalto Espumado

Fuente: Wirtgen Manual de Reciclado en Frío – 2da Edición

El asfalto espumado “puede ser utilizado como un agente estabilizador con una variedad de materiales, desde piedra chancada de buena calidad hasta gravas marginales con cierto grado de plasticidad.” (Wirtgen Manual de Reciclado en Frío, págs. 55-102)

Las principales ventajas de estabilizar con asfalto espumado en comparación a la emulsión asfáltica son:

- Reducción de costos de ligante, ya que el comprende un asfalto de penetración estándar y sólo un pequeño porcentaje de agua, típicamente un 2% en masa del asfalto. En el asfalto espumado no se incurren en costos de fabricación distintos al de inversión inicial del equipo.
- Reducción de costos de transporte. Para una misma proporción de asfalto residual una emulsión contiene 40% de agua la cual debe ser transportada con el asfalto.
- El material tratado con asfalto espumado puede ser colocado, compactado y abierto al tráfico inmediatamente.
- El material tratado con asfalto espumado se mantiene trabajable por extensos períodos de tiempo y puede ser acopiado en condiciones climáticas adversas sin que el asfalto sea lavado del agregado.
- El proceso de asfalto espumado puede ser usado para tratar materiales in-situ con contenidos de humedad de terreno relativamente altos, debido a que el ligante puede ser agregado sin usar agua adicional.

Se puede observar que, el proceso de asfalto espumado posee criterios muy importantes en los que es necesario seguir profundizando:

De forma similar a la estabilización con emulsión asfáltica, se debe agregar pequeñas proporciones de cemento o cal junto con el asfalto espumado. El objetivo es similar,

mejorar la resistencia retenida en condiciones de humedad. El empleo de un filler activo ayuda además a la dispersión del asfalto al incrementar la fracción menor a 0,075 mm del material, así como también mejorar la trabajabilidad de la mezcla y la reducción del Índice de Plasticidad. La adición de filler activo se discute líneas abajo.

A pesar de que la aplicación del asfalto espumado se descubrió en los años '50, han ido construidos pocos proyectos aplicando esta tecnología. Las pruebas principales eran hechas en secciones cortas de camino y acompañadas por un esfuerzo de investigación limitado. Esta situación se mantuvo hasta que Wirtgen entró al mercado con sus sistemas y equipos a mediados de los '90. Los procedimientos de diseño de mezclas y la caracterización de los materiales fueron basados en probetas de 100 mm de diámetro fabricados con la compactación Marshall estándar, de manera similar a la tecnología del asfalto caliente. A medida que se hizo evidente el hecho que el material tratado con asfalto espumado se comportaba de distinta forma al asfalto, la estabilidad y fluencia de Marshall fueron gradualmente reemplazadas por ensayos de tracción indirecta, procedimientos que, como se describe más adelante, son utilizados hasta el día de hoy.

El interés en esta tecnología fue despertado con el advenimiento del sistema Wirtgen en 1996. El mercado global respondió rápidamente y, a pesar de que el primer sistema fue insertado a una recicladora WR 2500, cientos de sistemas incorporados a distintos modelos de recicladoras tanto en planta como en sitio han sido puestos en marcha. El número de kilómetros de pistas deterioradas que son rehabilitados anualmente a través del reciclado con asfalto espumado se incrementa año a año, incluyendo tanto caminos de bajo volumen de tránsito como carreteras de múltiples pistas con tráfico pesado. Sin embargo, las

iniciativas de investigación no han podido seguir el mismo ritmo de desarrollo. (Wirtgen Manual de Reciclado en Frío, págs. 55-102)

### a) Características del asfalto espumado

El asfalto espumado se caracteriza en base a dos propiedades principales que posee:

- **Razón de expansión**, “medida de la viscosidad de la espuma y va a determinar qué tan bien se va a dispersar el asfalto en la mezcla. Se calcula como la razón entre el máximo volumen de la espuma relativo a su volumen original.” (Wirtgen Manual de Reciclado en Frío, págs. 55-102)

- **Vida media**, “medida de estabilidad de la espuma y provee una indicación de la tasa de colapso de la espuma. Se calcula como el tiempo, en segundos, que transcurre para que la espuma colapse a la mitad de su volumen máximo.” (Wirtgen Manual de Reciclado en Frío, págs. 55-102)

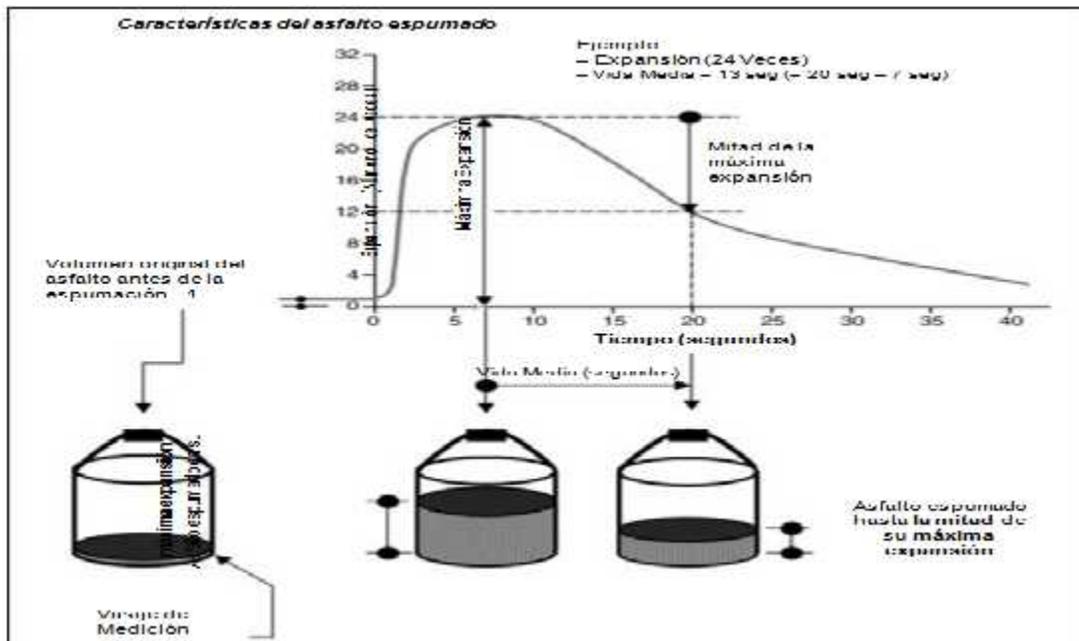


Figura 9: Relación de Razón de Expansión y Vida Media

Fuente: Wirtgen Manual de Reciclado en Frio – 2da Edición

**b) Factores que influyen a las propiedades de la espuma**

Son diversos los aspectos o factores que se consideran como aquellas que inciden en las propiedades de la espuma:

Se considera que la mejor espuma es aquella que optimiza tanto la expansión como la vida media. La determinación de las propiedades espumantes de un asfalto, bajo los procedimientos descritos para el diseño de mezcla de materiales tratado con asfalto espumado. La razón de expansión y la vida media del asfalto espumado está afectado por:

- **Adición de agua:** “Aumentar la cantidad de agua inyectada al asfalto aumenta efectivamente el volumen de espuma producido por un factor multiplicador de 1500. Aumentando la cantidad de agua añadida aumenta el tamaño de burbujas creadas, causando que aumente la tasa de expansión.” (Wirtgen Manual de Reciclado en Frío, págs. 55-102)

Sin embargo, el aumentar el tamaño individual de las burbujas reduce el espesor de la película del asfalto que las rodea, haciéndolas menos estables y resultando en una reducción de la vida media. Por ello, la razón de expansión y la vida media están relacionadas de forma inversa a la cantidad de agua que es añadida, como se muestra en el gráfico. (Wirtgen Manual de Reciclado en Frío, págs. 55-102)

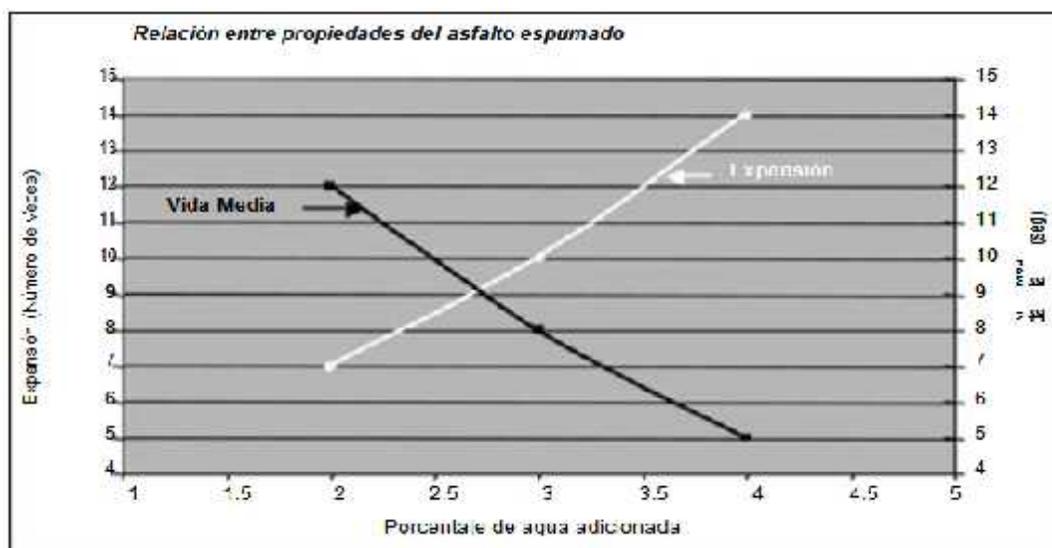


Figura 10: Relación entre Propiedades del Asfalto Espumado

Fuente: Wirtgen Manual de Reciclado en Frío – 2da Edición

- **Tipo de asfalto:** “Generalmente se utiliza asfaltos con valores de penetración entre 80 y 150 para espumar, pese a que asfaltos más rígidos que cumplen con los requisitos mínimos de espumado (explicado más adelante) se han utilizados en el pasado.” (Wirtgen Manual de Reciclado en Frío, págs. 55-102)

“Por razones prácticas, los asfaltos más rígidos son generalmente evitados ya que producen una espuma de peor calidad, generalmente una dispersión más pobre.” (Wirtgen Manual de Reciclado en Frío, págs. 55-102)

- **Fuente de Asfalto:** “Algunos asfaltos espuman mejor que otro debido a su composición. Por ejemplo, las propiedades espumantes de los asfaltos en Venezuela exceden enormemente a aquellos de otras fuentes.” (Wirtgen Manual de Reciclado en Frío, págs. 55-102)

- **Temperatura de Asfalto:** “La viscosidad del asfalto goza de una relación inversa con la temperatura; a medida que la temperatura aumenta, la viscosidad se reduce.” (Wirtgen Manual de Reciclado en Frío, págs. 55-102)

Lógicamente, mientras más baja la viscosidad, mayor el tamaño de burbuja que se formará cuando el agua cambie de estado en el proceso de espumado. Debido a que este proceso saca energía del asfalto, la temperatura antes del espumar debe exceder los 160 °C para obtener un producto satisfactorio. (Wirtgen Manual de Reciclado en Frío, págs. 55-102)

- **Presión de asfalto y de agua:** “El asfalto y el agua son inyectados en la cámara de expansión a través de pequeñas aberturas.”

El aumentar la presión en las tuberías de suministro causa que el flujo que pasa a través de estas aberturas se disperse (atomice). A más pequeñas las partículas individuales, mayor es el área de contacto disponible, mejorando así la uniformidad de la espuma.

- **Aditivos:** “Existen muchos productos en el mercado que van a afectar las propiedades espumantes del asfalto, tanto negativa (agentes anti-espumantes) como positivamente (espumantes).” (Wirtgen Manual de Reciclado en Frío, págs. 55-102)

Usualmente, los espumantes son sólo requeridos cuando el asfalto ha sido tratado con un agente anti-espumante (normalmente durante el proceso de refinado). La mayoría de los espumantes son añadidos al asfalto antes de calentar a las temperaturas de aplicación y tienden a ser sensibles a la temperatura, siendo su vida efectiva bastante corta. Para obtener los beneficios de añadir un espumante, el asfalto debe ser utilizado dentro de pocas horas. Sin embargo, estos productos son generalmente caros y se consideran sólo como un último recurso para mejorar las propiedades de un asfalto difícil de espumar (el cortar el asfalto con petróleo diesel ha probado ser exitoso en reducir suficientemente su viscosidad como para alcanzar una espuma aceptable. Sin embargo, esto no es recomendado a menos que sea llevado a cabo por un proveedor de asfalto). (Wirtgen Manual de Reciclado en Frío, págs. 55-102)

### c) Características aceptables de espumado

Se debe considerar aquellos asfaltos en los que se va a aplicar espuma deben ser analizados y ensayados previamente en el laboratorio de modo que se puedan establecer sus propiedades espumantes:

El objetivo de este ejercicio es encontrar la combinación de temperatura de asfalto y adición de agua a la que se consigue un espumado óptimo (La mayor razón de expansión y vida media). Como se describe en párrafos anteriores, cada asfalto es distinto e incluso diferentes partidas de asfalto de una misma fuente van a variar. Sin embargo, siguiendo un simple procedimiento de laboratorio se puede determinar el porcentaje de agua y la temperatura, para cada tipo de asfalto que se desee espumar. Los parámetros determinados en laboratorio serán utilizados en terreno a escala real.

No hay límites superiores para las propiedades del espumado y el objetivo siempre debiera apuntar a producir la mejor calidad de espuma requerida para la estabilización. Solamente se encuentran problemas cuando un asfalto no produce una “buena” espuma, generando la necesidad de proveer límites inferiores. Los mínimos valores aceptados de razón de expansión y vida media para estabilizar un material a 25 °C son:

- “Razón de Expansión: 10 veces”

- “Vida Media: 8 segundos”

Durante su investigación en asfalto espumado a fines de los '90, el profesor Kim Jenkins desarrolló el concepto de “Índice de Espumación” para medir la combinación de razón de expansión y vida media. Definió el Índice de Espumación como “el área bajo la curva obtenida de graficar la razón de expansión v/s la vida media, concluyendo que, a mejores propiedades de espumado, mejor el Índice de Espumación y mejor el producto estabilizado

alcanzado.” Lo que hizo su investigación fue comparar 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. Estos descubrimientos se discuten más adelante.

#### **d) Dispersión del asfalto espumado**

La dispersión del asfalto espumado tiene una gran diferencia en relación a las mezclas asfálticas en caliente:

La diferencia reside en que el material estabilizado con asfalto espumado no se ve negro. 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, como se mostró previamente en la Figura 4.1. 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). Investigaciones limitadas han mostrado 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, a las cuales las partículas de asfalto tienden a adherirse. (Wirtgen Manual de Reciclado en Frío, págs. 55-102)

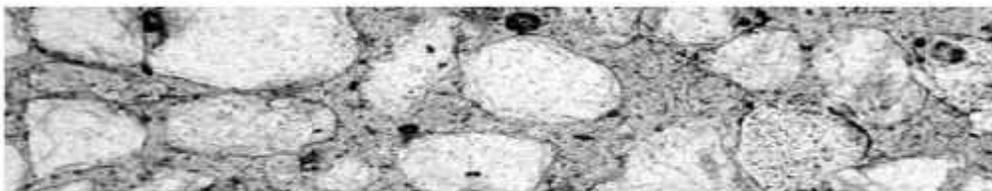


Figura 11: Dispersión del Asfalto Espumado en la Matriz de Finos

Fuente: Wirtgen Manual de Reciclado en Frío – 2da Edición

### e) Material adecuado para tratamiento con asfalto espumado

La tecnología de asfalto espumado es aplicable en la estabilización de una gran variedad de materiales:

Esto diversos materiales van desde arenas, gravas, hasta piedra chancada y RAP. Tanto granulares seleccionados como marginales, vírgenes o reciclados, han sido utilizados en forma satisfactoria en el proceso de reciclado. Sin embargo, es importante establecer los límites de tolerancia requerida en los agregados, así como identificar la composición óptima del material que va a ser sometido al tratamiento con asfalto espumado.

Los materiales que son pobres en finos no se mezclan en forma adecuada con el asfalto espumado. Como se señala en la siguiente figura, el porcentaje mínimo de finos requerido es del 5%, considerando como finos la fracción del material que pasa la malla de 0,075 mm (No. 200). Cuando un material no tiene la cantidad adecuada de finos, el asfalto espumado no se dispersa en forma apropiada y tiende a formar lo que se conoce en el material reciclado como “filamentos” de asfalto (aglomeraciones de material fino con asfalto), los que varían en tamaño dependiendo de la escasez de finos. Un porcentaje de finos muy bajo producirá largos filamentos, los que en la mezcla actuarán como lubricante y producirán una disminución en la resistencia y estabilidad del material. (Wirtgen Manual de Reciclado en Frío, págs. 55-102)

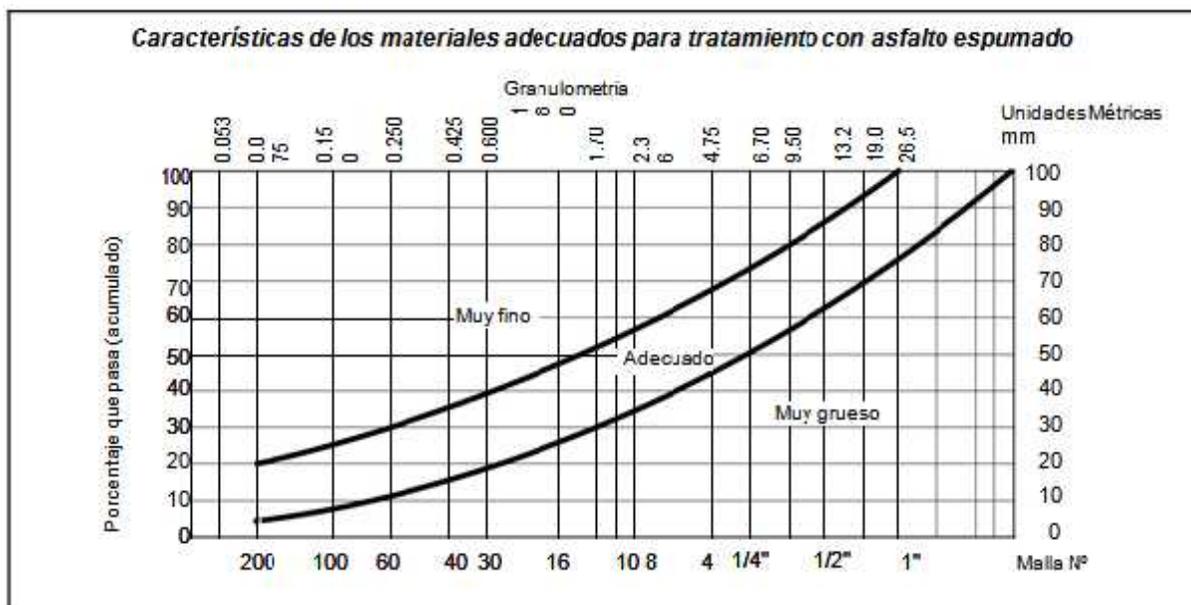


Figura 12: Materiales Adecuados para Tratamiento con Asfalto Espumado

Fuente: Wirtgen Manual de Reciclado en Frio – 2da Edición

Es conveniente enfocarse las deficiencias para que estas puedan ser corregirlas a tiempo: Ensayos granulométricos simples, que se realizan a partir de muestras extraídas del pavimento existente indican si existe una eventual deficiencia en el contenido de finos. Sin embargo, esta deficiencia puede ser corregida mediante la importación de material adecuado, con un alto contenido de finos. Este material se esparce sobre la superficie del pavimento en forma previa a la aplicación del reciclado. No obstante, los materiales cohesivos deben ser tratados con cuidado. Si bien los ensayos de laboratorio de estos materiales pueden arrojar un alto porcentaje de finos que pasan la malla de 0,075 mm de diámetro, generalmente la calidad del mezclado conseguida en terreno es deficiente. Este fenómeno se debe a la naturaleza plástica del material, la que produce que la fracción fina se aglomere, haciendo difícil la dispersión del asfalto en forma de espuma a través del agregado. Comparaciones entre ensayos granulométricos lavados y no lavados realizados en laboratorio, entregan una indicación sobre la relevancia del problema. La granulometría

no lavada indica la calidad de los finos disponibles. (Wirtgen Manual de Reciclado en Frío, págs. 55-102)

"El material que es deficiente en finos puede ser mejorado mediante la adición de cemento, cal u otro material que pase en un 100% la malla No 200. Sin embargo, debe evitarse una dosificación de cemento superior al 1,5%." (Wirtgen Manual de Reciclado en Frío, págs. 55-102)

Un porcentaje mayor de cemento tiene un efecto negativo, producto de la pérdida de flexibilidad en la capa estabilizada.

Las bandas granulométricas presentadas en la Figura anterior tienen un amplio rango de tolerancia y pueden ser ajustadas con el objetivo de obtener una granulometría que entregue la cantidad mínima de vacíos en el agregado mineral. Si se logra producir mezclas con un bajo contenido de vacíos, se obtiene un material estabilizado con asfalto espumado con excelentes propiedades. Una relación única para conseguir la cantidad mínima de vacíos, que permite la variación en el contenido de filler, se presenta en la ecuación 1. Esta ecuación es útil, puesto que entrega flexibilidad respecto al contenido de finos de la mezcla. Un valor de  $n=0,45$  se requiere para obtener el mínimo de vacíos.

$$P = \frac{(100 - F) (d^n - 0.075^n)}{(D^n - 0.075^n)} + F \quad \text{[Ecuación 1]}$$

Donde:

- d = tamaño seleccionado del tamiz (mm)
- P = porcentaje en peso del material que pasa el tamiz de tamaño d (mm)
- D = tamaño máximo del agregado (mm)
- F = porcentaje del contenido de finos (inertes y activos)
- n = variable que depende de las características del agregado

Es importante obtener una granulometría continua en el tamaño del agregado menor a 2 mm, debido a la dispersión del asfalto espumado y a la facilidad en la compactación, ya que se reducen los vacíos y por lo tanto la susceptibilidad al ingreso de agua. Por lo tanto, cuando sea necesario, debe considerarse la posibilidad de mezclar dos materiales para mejorar una granulometría deficiente.

## **Muestras de material utilizadas para el diseño de mezclas**

El método utilizado en la toma de muestras del material que va a ser estabilizado con asfalto espumado es muy importante. “Un control deficiente en la toma de muestra se traduce en ensayos no representativos que entregarán resultados erróneos, que puede traer serias consecuencias. Por lo tanto, debe tenerse conocimiento de tres factores importantes para la toma de muestras de dosificación.” (Wirtgen Manual de Reciclado en Frío, págs. 55-102)

Estos tres factores son los siguientes:

- “Profundidad del reciclado, y las proporciones de cada capa in-situ que será mezclada y conformará la capa compuesta.”
- “Variabilidad del material en la longitud y profundidad del pavimento existente”; esto significa que deben realizarse suficientes diseños de mezclas como para considerar esta variación. En los casos donde la variabilidad es significativa, el material de cada capa debería ser separado en sus fracciones correspondientes, y luego ser mezclado en las proporciones requeridas. De esta forma, puede obtenerse una mezcla óptima y luego estudiar la influencia de la granulometría en la variabilidad de la mezcla tratada con asfalto espumado.
- “Preparación del material del pavimento existente para la mezcla”; la utilización de una máquina de fresado pequeña para el muestreo del material asfáltico es el procedimiento más adecuado para obtener muestras representativas.

### **f) Trabajando con asfalto espumado**

- **Seguridad:** Es asfalto debe tener una alta temperatura para lograr la reacción del agua y producir una espuma aceptable (típicamente sobre 160 °C). A dichas temperaturas, el asfalto es una sustancia letal, y si no se maneja en forma adecuada podría incluso provocar

la muerte de una persona. Sin embargo, el constructor que aplica asfalto espumado y ejecuta un proyecto de reciclado por primera vez, debe tomar todas las medidas de precaución necesarias y asegurarse que sus empleados reciban el entrenamiento o capacitación necesarios. Es posible aplicar las mismas normas de seguridad que se utilizan en mezclas asfálticas en caliente para la construcción con asfalto espumado.

- **Temperatura de material:** Es uno de los más importantes en la dispersión adecuada del asfalto espumado en el material reciclado y, por ende, en la resistencia de la nueva capa de pavimento. El concepto de Índice de Espumación dado por el Profesor Jen-kins representa las propiedades espumantes del asfalto (razón de expansión y vida media). La investigación demostró que el Índice de Espumación y temperatura del agregado (al producirse la mezcla) son muy importantes en la dispersión. 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). (Wirtgen Manual de Reciclado en Frío, págs. 55-102)

“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.” (Wirtgen Manual de Reciclado en Frío, págs. 55-102)

Lo antes mencionado se debe principalmente a que las presiones de trabajo utilizadas en terreno son mayores y la continuidad en la operación del tren reciclador permite trabajar a temperaturas más altas. Por ende, hay una variación entre las mediciones de laboratorio y las de terreno, por ello es importante verificar las propiedades de espumación en terreno. Estas mediciones deben compararse con la temperatura del agregado (y no sólo la

superficie del camino) y los resultados verificados con las recomendaciones de la siguiente tabla. (Wirtgen Manual de Reciclado en Frío)

Tabla 7

*Características de Temperatura del Agregado*

<b>Facilidad del asfalto espumado para dispersarse (capacidad de mezclado)</b>				
<b>Índice de Espumación</b>	<b>Razón de Expansión (implícito)</b>	<b>Temperatura del agregado (°C)</b>		
		<b>&lt; 15 °C</b>	<b>15 °C a 25 °C</b>	<b>&gt; 25 °C</b>
< 75	< 8	Muy mala	Mala	Moderada
75 a 150	8 a 12	Moderada	Buena	Buena
> 150	> 12	Buena	Muy buena	Muy buena

Fuente: Wirtgen Manual de Reciclado en Frio – 2da Edición

El trabajo con asfalto espumado no se debería realizar cuando la temperatura del agregado esté bajo los 10 °C.

- **Consistencia del suministro de asfalto:** Cuando se acopla un nuevo camión-tanque a la recicladora, se deben realizar dos verificaciones para asegurar que el asfalto es adecuado para la producción de la espuma:

**Temperatura del asfalto en el tanque:** “Debería medirse utilizando un termómetro calibrado (termocuplas adheridas al tanque no son confiables).” (Wirtgen Manual de Reciclado en Frío, págs. 55-102)

**Calidad de espumación en el tanque:** “Debería utilizarse la boquilla de prueba de la recicladora. La verificación debería realizarse cuando al menos 100 litros de asfalto hayan pasado por la barra aplicadora de asfalto mientras se recicla, con el objetivo de obtener una muestra representativa.” (págs. 55-102)

- **Flujo del asfalto:** “El asfalto suministrado en terreno por tanques provistos de tubos calentados por llamas a veces es contaminado con pequeñas partículas de carbón que se forman a los costados de los tubos cuando estos aumentan su temperatura.” (Wirtgen Manual de Reciclado en Frío, págs. 55-102)

Al utilizar las últimas toneladas de asfalto del tanque, estas partículas indeseables tienden a introducirse en el sistema de flujo de asfalto, y son la causa de los bloqueos en la recicladora. Este problema puede evitarse tomando precauciones mínimas, como que el filtro en el sistema de abastecimiento funcione correctamente. Cualquier incremento inusual en la presión indicará que el filtro requiere de limpieza. En todo caso, es recomendable la limpieza diaria de este dispositivo (por ejemplo, al término de cada turno de trabajo).

- **Presión de asfalto:** “La calidad de espuma es función directa de la presión de operación de la recicladora. A mayor presión, mayor flujo de asfalto que se “atomise” a medida que pase mediante el surtidor de asfalto a la cámara de expansión.” (Wirtgen Manual de Reciclado en Frío, págs. 55-102)

Esto asegura que las partículas pequeñas de asfalto entrarán en contacto con el agua y también ingresará a la cámara de expansión en forma atomizada. Una presión mayor, asegurará uniformidad a la espuma de asfalto. Si el asfalto entrara en la cámara de expansión como un flujo (lo que sucede cuando ingresa a bajas presiones) el agua impactaría solamente sobre una cara del flujo. Por esta cara se produciría espuma, pero sobre la otra permanecería un flujo de asfalto caliente sin espumar. Por lo tanto, es imperativo mantener una presión de operación sobre los 3 bares como mínimo. (Wirtgen Manual de Reciclado en Frío, págs. 55-102)

- **Aplicación de un filler activo:** “Como se describió anteriormente, es una práctica común adicionar un porcentaje pequeño de cemento u otros agentes estabilizadores cementantes cuando se recicla con asfalto espumado.” (Wirtgen Manual de Reciclado en Frío, págs. 55-102)

Por otro lado, la calidad de la mezcla también es de suma importancia en este punto:

La calidad de la mezcla cuando se agrega asfalto espumado será deficiente si el contenido de finos es bajo como para dispersar las partículas de asfalto. Por lo tanto, es recomendable que el cemento siempre sea agregado en conjunto con el asfalto espumado. (Wirtgen Manual de Reciclado en Frío, págs. 55-102)

- **Re-mezclado de la capa finalizada:** “El material estabilizado con asfalto espumado puede ser vuelto a trabajar sin afectar significativamente su resistencia última, siempre y cuando el contenido de humedad se mantenga aproximadamente constante y cercano al que presentaba al momento de la compactación.” (Wirtgen Manual de Reciclado en Frío, págs. 55-102)

El re-mezclado de la capa finalizada es una característica de gran ventaja:

Cuando el camino debe abrirse al tráfico al corto tiempo después de haber sido construido, a pesar de que no se haya completado el trabajo de terminación. El material puede ser vuelto a trabajar el día siguiente (generalmente, después de una pulverización previa) y luego terminado en forma adecuada. Sin embargo, si éste pierde su humedad, volver a trabajarlo (perfilarlo y compactarlo) afectará negativamente su resistencia última. (Wirtgen Manual de Reciclado en Frío, págs. 55-102)

- **Propiedades típicas de materiales estabilizados con asfalto espumado:** “A continuación, se describen las propiedades de ingeniería más importantes aplicables al material estabilizado con asfalto espumado. Estas propiedades se obtienen cuando la aplicación del

asfalto espumado es óptima, de acuerdo al procedimiento de diseño de mezclas descrito líneas abajo.” (Wirtgen Manual de Reciclado en Frío, págs. 55-102)

Los rangos de aplicación del asfalto espumado sugeridos en la siguiente tabla son útiles para definir un contenido asfáltico aproximado en el diseño de mezclas. Estos rangos de aplicación generalmente son aplicables cuando se utiliza un 1% de filler activo (cal o cemento) en la mezcla. (Wirtgen Manual de Reciclado en Frío, págs. 55-102)

Tabla 8

*Contenido de Asfalto Espumado Típico Relativo a Granulometría del Agregado*

Porcentaje que pasa la malla (%)		Porcentaje de asfalto espumado
4.75 mm	0.075 mm	
< 50	3.0 - 5.0	2.0 a 2.5
	5.0 - 7.5	2.0 a 3.0
	<b>7.5 - 10.0</b>	<b>2.5 a 3.5</b>
	> 10.0	3.0 a 4.0
> 50	3.0 - 5.0	2.0 a 3.0
	5.0 - 7.5	2.5 a 3.5
	7.5 - 10.0	3.0 a 4.0
	> 10.0	3.5 a 4.5

Fuente: Wirtgen Manual de Reciclado en Frío – 2da Edición

**-Resistencia:** “Para evaluar la resistencia de los materiales estabilizados con asfalto se utiliza la resistencia a la tracción indirecta (Indirect Tensile Strength, ITS), en vez del ensayo Marshall. Se muestra los valores que comúnmente se obtienen de estos ensayos.” (Wirtgen Manual de Reciclado en Frío, págs. 55-102)

[Ecuación 2]

$$ITS = \frac{2 \times P}{\pi \times h \times d \times 10000}$$

Dónde:

ITS = “Resistencia a la tracción indirecta (kPa)”

P = “Carga máxima aplicada (kN)”

h = “Altura promedio de la probeta (cm)”

d = “Diámetro de la probeta (cm)”

El ensayo ITS puede ser realizado en probetas de 100 mm o 150 mm, confeccionadas y curadas siguiendo los procedimientos señalados en el diseño de mezcla. Además, la susceptibilidad a la humedad del material es generalmente determinada en términos de la Resistencia a la Tracción Retenida (Tensile Strength Retained, TSR), ensayando probetas de 100 mm mediante la siguiente ecuación:

[Ecuación 3]

$$TSR = \frac{ITS_{\text{saturado}}}{ITS_{\text{seco}}}$$

El valor de TSR saturada se obtiene sumergiendo las probetas curadas en agua durante 24 horas antes de realizar el ensayo, como se describe en el diseño de mezcla.

Tabla 9

*Resistencia a la Tracción Indirecta de Materiales Estabilizados con Asfalto Espumado*

Tipo de material		Probetas 100 mm		Probeta 150 mm
		Marshall		Proctor
		ITS <sub>seco</sub> (kPa)	TSR (Razón)	ITS <sub>sequ</sub> (kPa)
RAP/piedra (mezcla 50/50)	chancada	250 a 600	0.8 a 1.0	120 a 250
	Piedra chancada graduada	200 a 500	0.6 a 0.9	120 a 200
	Grava natural (IP<10, CBR<30)	150 a 450	0.3 a 0.75	80 a 150

Fuente: Wirtgen Manual de Reciclado en Frio – 2da Edición

Investigaciones recientes han introducido la Resistencia a la Compresión no Confinada (Unconfined Compressive Strength, UCS) como un indicador de la capacidad de soporte del material estabilizado (re-sistencia a la deformación permanente). Este es un valor importante, especialmente cuando se estabiliza material de baja calidad. Se propone un valor mínimo UCS de 700 kPa para una probeta de 150 mm de diámetro, confeccionada con un esfuerzo de compactación del 100% del Proctor Modificado (curada y ensayada en el contenido óptimo de humedad, como se describe en el diseño de mezcla. (págs. 55-102)

- **Rigidez:** El Módulo Resiliente (MR) de un material estabilizado con asfalto “puede medirse en laboratorio de someterse un espécimen a un ensayo de carga repetitiva. El ensayo de probetas Marshall de 100 mm de diámetro (curadas y secas) a tracción indirecta a 10 Hz y 25°C, entrega diversos valores. (Wirtgen Manual de Reciclado en Frío, págs. 55-102)

Los valores mencionados anteriormente, se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 10

*Rangos de Módulos Resilientes Típicos para Material Estabilizado, Ensayados en Laboratorio*

<b>Tipo de material</b>	<b>MR (MPa)</b>
RAP/piedra chancada (mezcla 50/50)	2500 a 4000
Piedra Granular chancado	2000 a 3000
Grava natural (IP<10, CBR<30)	1500 a 3000

Fuente: Wirtgen Manual de Reciclado en Frio – 2da Edición

Nota: Debido principalmente a la pérdida de humedad en los especímenes ensayados (pero también debido a la geometría y estado de tensiones producido por la forma del ensayo), estos valores son significativamente mayores a aquellos determinados a partir de ensayos triaxiales dinámicos y de viga flexural, así como aquellos retro-analizados de un cuenco de deflexiones.

Los modelos de diseño de pavimentos propuestos por el TG2, así como las futuras recomendaciones TG3, próximas a ser publicadas para tratamientos con emulsión, asumen que el material presenta dos fases de comportamiento definidas como:

- **Fase 1:** “Rápida pérdida de rigidez ante el tráfico sobre la capa estabilizada”
- **Fase 2:** “Deformación permanente considerando valores menores de rigidez”

Los valores de rigidez propuestos por el TG2 y TG3 fueron obtenidos a partir de información limitada. En forma particular, el denominado “estado equivalente granular” (una expresión sacada de la terminología utilizada en las capas levemente cementadas, refiriéndose al momento en que se aproximan al término de su vida útil) en conjunto con los datos establecidos en las recomendaciones TG, se encuentran bajo revisión debido a que estos no correlacionan correctamente con los ensayos de terreno realizados en pavimentos que fueron construidos en los últimos 10 años.

Mediciones realizadas en terreno han demostrado que la rigidez de una capa estabilizada con asfalto efectivamente se reduce durante su vida útil. Después de la construcción, la rigidez aumenta en la medida en que el material se “cura”, y el contenido de humedad se

reduce hasta alcanzar los niveles óptimos. Posteriormente, pareciera existir una fase de “acomodo” acompañada por una pérdida en la rigidez y también por una pequeña deformación permanente, presumiblemente debido a la consolidación del material producto de las cargas de tránsito. Las densidades de construcción generalmente van a determinar la magnitud de la deformación permanente que se producirá mientras la capa se asienta. Sin embargo, la pérdida de rigidez parece ser una función compleja, dependiente de varios parámetros. Los principales parámetros son la calidad y tipo del material, la cantidad de asfalto y cemento en la mezcla, el soporte entregado por la estructura de pavimento subyacente, y la efectividad de las instalaciones de drenaje. La pérdida de rigidez parece ser mayor en materiales de calidad deficiente que son estabilizados con dosis de cemento altas, en un medio húmedo con un sistema de drenaje inadecuado y que se encuentran sobre estructuras con una baja capacidad de soporte. (Wirtgen Manual de Reciclado en Frío, págs. 55-102)

Mientras no se obtengan mayores avances en la investigación de pavimentos reciclados con asfalto espumado, se puede aplicar el método de diseño transitorio del TG2. Sin embargo, la terminología asociada en éste se debería cambiar a:

**Fase 1:** Fase de asentamiento. El término que utiliza el TG2 llamado “fatiga efectiva”, “indica que el agrietamiento producido está asociado a la carga. Esto no es correcto, puesto que no se produce un agrietamiento evidente a medida que la rigidez de la capa se reduce (pese a que algún micro fracturamiento puede ocurrir).” (Wirtgen Manual de Reciclado en Frío, págs. 55-102)

**Fase 2:** Estado de régimen. El término también utilizado por TG2 denominado “estado granular equivalente”, “sugiere que los efectos de la estabilización se pierden. Este tampoco es el adecuado, debido a que la rigidez que va a alcanzar el material estabilizado con asfalto espumado, es siempre mucho mayor que el material sin estabilizar.” (Wirtgen Manual de Reciclado en Frío, págs. 55-102)

Resultados de laboratorio indican que los valores de Módulo Resiliente para la modelación mecanicista deberían basarse en los resultados de los ensayos de ITS y UCS utilizando probetas de 150 mm, confeccionadas y ensayadas con el contenido óptimo de humedad, como se describe en el Apéndice 2. Las fórmulas sugeridas para la determinación del Módulo Resiliente (MR en MPa) son:

**FASE 1:**

$$MR_{Fase1} = \log ITS_{equ} \times 3950 - 7000 \times TSR \times F_{drenaje}$$

**FASE 2:**

$$MR_{Fase2} = \frac{M_{Fase} \times TSR}{0.5 \times UCS_{equ} + 0.7}$$

Donde:  $MR_{Fase1}$  = Módulo Resiliente durante la Fase 1

$ITS_{equ}$  = ITS a la condición de humedad óptima

TSR = resistencia a la tracción requerida

$F_{drenaje}$  = factor de drenaje determinado de la tabla 4.9

$MR_{Fase2}$  = Módulo Resiliente en estado de régimen

$ucs_{equ}$  = UCS a la humedad óptima

Tabla 11

*Factores de Drenaje F Drenaje para Estimar Rigideces de Terreno de Material Estabilizado con Asfalto*

Calidad de Drenaje	Precipitación media anual (mm)			
	<200	200 a 600	600 a 1000	>1000
Muy buena	1.4	1.3	1.2	1.1
Buena	1.3	1.2	1.1	1.0
Normal	1.2	1.1	1.0	0.9
mala	1.1	1.0	0.9	0.8
Muy mala	1.0	0.9	0.8	0.7

Fuente: Wirtgen Manual de Reciclado en Frio – 2da Edición

El Módulo Resiliente en estado de régimen ( $MR_{\text{Fase 2}}$ ) calculado mediante la ecuación de  $MR_{\text{Fase 2}}$  debe ser considerado como un indicador y no un valor exacto debido a que la ecuación se desarrolló con una cantidad limitada de datos. El valor verdadero que se obtiene in-situ es una función de muchas variables. Una de las variables más importantes es la cantidad de filler activo y asfalto en la mezcla, la calidad del material no tratado, la densidad del material estabilizado, la temperatura del ensayo y el contenido de humedad. Por ejemplo, incrementar la cantidad de filler activo de un 1% a un 2% se traduce en un incremento del

$MR_{\text{Fase 1}}$ , pero por otro lado se produce una reducción del valor  $MR_{\text{Fase 2}}$  después de relativamente pocas repeticiones de carga (generalmente, menos de 250.000).

El valor para el  $MR_{\text{Fase 2}}$  calculadas utilizando la su ecuación antes mencionada debería ser verificada siempre con el rango presentado en la Tabla 12 debería encontrarse una

explicación si el valor calculado es significativamente menor o mayor al rango señalado. Frecuentemente, especímenes confeccionados en laboratorio no son representativos de las condiciones de terreno, y cualquier resultado de ensayo que pareciera ser incorrecto debería ser detectado e investigado. (Wirtgen Manual de Reciclado en Frío, págs. 55-102)

Tabla 12

*Módulos Resilientes para Material Estabilizado Después de Alcanzar el Estado de Régimen (Fase 2)*

<b>Tipo de material</b>	<b>Asfalto espumado Añadido (%)</b>	<b>Módulo resiliente MRfase (MPa)</b>
100% RAP	1.5 a 2.0	1000 a 2500
rap/piedra chancada (mezcla 50/50)	2.0 a 2.5	800 a 2000
piedra chancada bien graduada	2.0 a 3.0	600 a 1500
grava natural (IP<10, CBR>45)	2.0 a 3.5	400 a 800
grava natural (IP<10, CBR>25)	2.5 a 4.0	300 a 600
arenas no plásticas	3.0 a 5.0	200 a 500

Fuente: Wirtgen Manual de Reciclado en Frío – 2da Edición

**- Tiempo de mezclado:** “No existe un período específico para trabajar el material estabilizado con asfalto espumado; dependerá fundamentalmente del contenido de humedad que el material mantenga. Entre más tiempo se mantenga al contenido óptimo de humedad, el período para trabajar es mayor.

- **Densidad:** “Como se describió anteriormente, en los materiales tratados con cemento y emulsión asfáltica la compactación debería apuntar siempre a obtener la máxima densidad posible bajo las condiciones prevalecientes en terreno (la denominada “densidad máxima”).” (Wirtgen Manual de Reciclado en Frío, págs. 55-102)

Usualmente se especifica una densidad mínima requerida como un porcentaje de la densidad AASHTO modificada, generalmente entre un 98% y un 102% para bases estabilizadas con asfalto espumado. A veces se permite aceptar un gradiente de densidad a través del espesor de compactación. Esto significa que la densidad en la parte superior de la capa puede ser mayor que la de la parte inferior. Cuando se especifica de este modo, es normal incluir una desviación máxima de 2% para la densidad medida en el tercio inferior de la capa. Así, si la densidad promedio es especificada en un 100%, la densidad en la parte inferior de la capa debe ser mayor que 98%. Para agregados de mejor calidad (por ejemplo, CBR > 80%), es recomendable especificar una densidad absoluta. (Wirtgen Manual de Reciclado en Frío, págs. 55-102)

Tabla 13

*Comparativa de Estabilización*

<b>Comparativa</b>	
<b>Estabilización con emulsión asfáltica</b>	
<p><b>Ventajas</b></p> <p><b>Flexibilidad:</b> “La estabilización con asfalto produce un material con propiedades viscoelásticas con una flexibilidad mejorada y resistencia a la deformación.”</p> <p><b>Facilidad De Aplicación:</b> “Un tanque se acopia a la recicladora y se aplica a través de la barra espaciadora.”</p> <p><b>Aceptación:</b> “Las emulsiones asfálticas son relativamente bien conocidas en la industria de la construcción. Métodos de ensayos estándares y especificaciones se encuentran ampliamente disponibles.”</p>	<p style="text-align: center;"><b>Desventajas</b></p> <p><b>Costo:</b> “Las emulsiones de asfalto generalmente no se producen en terreno. Este proceso requiere de un estricto control, y los emulsificadores son caros. Los costos de transporte se ven incrementados debido al transporte (la emulsión además de asfalto tiene una cantidad importante de agua).”</p> <p>Donde el contenido de humedad del material sea cercano a la OMC es posible que se alcance un estado de saturación del mismo.</p> <p><b>Disponibilidad:</b> “La formulación requerida para una aplicación de reciclado no siempre está disponible.”</p>
<b>Estabilización con asfalto espumado</b>	
<p><b>Ventajas</b></p> <p><b>Flexibilidad:</b> “La estabilización con asfalto se produce un material con propiedades visco estáticas con una flexibilidad mejorada y resistencia a la deformación.”</p> <p><b>Facilidad de aplicación:</b> “Un tanque se acopia a la recicladora y el asfalto caliente es bombeado y esparcido mediante una barra roceadora, donde la espuma de asfalto es inyectada en la cámara de mezclado”</p> <p><b>Costo:</b> “El asfalto espumado utiliza cemento asfáltico de penetración estándar. No existen costos adicionales de producción del mismo.”</p> <p><b>Velocidad para adquirir resistencia:</b> “El material puede ser transitado inmediatamente después de ser colocado y compactado.”</p>	<p style="text-align: center;"><b>Desventajas</b></p> <p>“El asfalto espumado requiere que el asfalto este caliente, generalmente sobre los 160°C. frecuentemente esto requiere de instalaciones para calentar el mismo, y medidas especiales de seguridad.”</p> <p><b>Condición y tipo de material:</b> “El material saturado y pobre en la fracción fina (menor a 0.075) no se puede ser tratado con asfalto espumado sin un tratamiento previo a la adición de material nuevo.”</p>
<b>Estabilización con cemento</b>	
<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>

---

“Disponibilidad el cemento se puede obtener en cualquier parte del mundo, a granel o en bolsas.”

Costo: “En relación al asfalto, el cemento no es caro.”

Facilidad de aplicación: “El cemento puede ser esparcido a mano si no se encuentran disponibles esparcidores mecánicos o mediante lechadas.”

Aceptación: “El cemento es conocido y ampliamente aceptado en la industria de la construcción. Métodos estándares y especificaciones se encuentran disponibles.”

“El agrietamiento por retracción es inevitable, sin embargo, puede ser minimizado.”

“Requiere de un curado apropiado y protección para el tráfico a temprana edad una vez puesto en servicio, particularmente de vehículos pesados que se desplazan a baja velocidad.”

---

Fuente: Wirtgen Manual de Reciclado en Frio – 2da Edición

Tabla 14

*Selección del Tipo de Estabilización*

ÁREA	CLASE DE SUELO	TIPO DE ESTABILIZADOR RECOMENDADO	RESTRICCIÓN EN LL Y IP DEL SUELO	RESTRICCIÓN EN EL PORCENTAJE QUE PASA LA MALLA 200	OBSERVACIONES
1 A	SW ó SP	(1) Asfalto			
		(2) Cemento Pórtland			
		(3) Cal-Cemento-Cenizas volantes	IP no excede de 25		
1 B	SW - SM ó SP - SM ó SW - SC ó SP - PC	(1) Asfalto		IP no excede de 10	
		(2) Cemento Pórtland		IP no excede de 30	
		(3) Cal		IP no menor de 12	
		(4) Cal-Cemento-Cenizas volantes	IP no excede de 25		
1 C	SM ó SC ó SM-SC	(1) Asfalto		IP no excede de 10	No debe exceder el 30% en peso
		(2) Cemento Pórtland		(b)	
		(3) Cal		IP no menor de 12	
		(4) Cal-Cemento-Cenizas volantes	IP no excede de 25		
2 A	GW ó GP	(1) Asfalto			Solamente material bien graduado.
		(2) Cemento Pórtland			El material deberá contener cuanto menos 45% en peso de material que pasa la Malla N° 4.
		(3) Cal-Cemento-Cenizas volantes	IP no excede de 25		
2B	GW -	(1) Asfalto		IP no excede de 10	Solamente material bien graduado.

	<b>GM ó GP - GM ó GW - GC ó GP-GC</b>	(2)	Cemento Pórtland	IP no excede de 30		El material deberá contener cuanto menos 45% en peso de material que pasa la Malla N° 4.
		(3)	Cal	IP no menor de 12		
		(4)	Cal-Cemento- Cenizas volantes	IP no excede de 25		
<b>2C</b>	<b>GM ó GC ó GM - GC</b>	(1)	Asfalto	IP no excede de 10	No debe exceder el 30% en peso	Solamente material bien graduado.
		(2)	Cemento Pórtland	(b)		El material deberá contener cuanto menos 45% en peso de material que pasa la Malla N° 4.
		(3)	Cal	IP no menor de 12		
		(4)	Cal-Cemento- Ceniza	IP no excede de 25		
<b>3</b>	<b>CH ó CL ó MH ó ML ó OH ó OL ó ML-CL</b>	(1)	Cemento Pórtland	LL no menor de 40 IP no menor de 20		Suelos orgánicos y fuertemente ácidos contenidos en esta área no son susceptibles a la estabilización por métodos ordinarios
		(2)	Cal	IP no menor de 12		
		IP = Índice Plástico (b) IP 20 + (50 porcentaje que pasa la Malla N° 200) / 4		Sin restricción u observación No es necesario aditivo estabilizador	No	Fuente: US Army Corps of Engineers

Fuente: Manual de carreteras, suelos, geología y pavimentos – Aprobado por la resolución directorial 05 – 2013–  
MTS&14

Tabla 15

Cuadro con los diferentes materiales para la estabilización de suelos

<b>TIPO DE ESTABILIZADOR RECOMENDADO</b>	<b>NORMAS TÉCNICAS</b>	<b>SUELO(1)</b>	<b>DOSIFICACIÓN(3)</b>	<b>CURADO (APERTURA AL TRÁNSITO) (5)</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
<b>Cemento</b>	<b>EG-CBT-2008 Sección 3068 ASTM C150 AASHTO M85</b>	A-1,A-2,A-3,A-4,A-5,A-6 y A-7 LL < 40% IP 18% CMO (2) < 1.0% Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) < 0.2% Abrasión < 50% Durabilidad SO <sub>4</sub> Ca (4) - AF 10% - AG 12% Durabilidad SO <sub>4</sub> Mg - AF 15% - AG 18%	2 - 12%	7 días	Diseño de mezcla de acuerdo a recomendaciones de la PCA (Portland Cement Association)
<b>Emulsión</b>	<b>ASTM D2397 ó AASHTO M208</b>	A-1, A-2 y A3 Pasante malla N° 200 10% IP 8% Equiv. Arena 40% CMO (2) < 1.0% Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) < 0.6% Abrasión < 50% Durabilidad SO <sub>4</sub> Ca (4) - AF 10% - AG 12% Durabilidad SO <sub>4</sub> Mg - AF 15% - AG 18%	4 - 8%	Mínimo 24 horas	Cantidad de aplicación a ser definida de acuerdo a resultados del ensayo Marshall modificado o Illinois
<b>Cal</b>	<b>EG-CBT-2008 Sección 3078 AASHTO M216 ASTM C977</b>	A-2-6, A-2-7, A-6 y A-7 10% IP 50% CMO (2) < 3.0% Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) < 0.2% Abrasión < 50%	2 - 8%	Mínimo 72 horas	Para IP > 50%, se puede aplicar cal en dos etapas Diseño de mezcla de acuerdo a la Norma ASTM D 6276
<b>Cloruro de</b>	<b>ASTM D98</b>	A-1, A-2, y A-3 IP 15%	1 a 3% en		

<b>Calcio</b>	<b>ASTM D345</b> <b>ASTM E449</b> <b>MTC E 1109</b>	CMO (2) < 3.0% Sulfatos (SO <sub>4</sub> 2 ) < 0.2% Abrasión < 50%	peso del suelo seco	24 horas	
<b>Cloruro de Sodio</b>	<b>EG-CBT-2008</b> <b>Sección 309B</b> <b>ASTM E534</b> <b>MTC E 1109</b>	A-2-4, A-2-5, A-2-6, A-2-7 8% IP 15% CMO (2) < 3.0% Abrasión < 50%	50 - 80 kg/m <sup>3</sup>	07 días	La cantidad de sal depende de los resultados (dosificación) y tramo de prueba
<b>Cloruro de Magnesio</b>	<b>MTC E 1109</b>	A-1, A-2 y A-3 IP 15% CMO (2) < 3.0% pH: mínimo 5 Abrasión < 50%	50 - 80 kg/m <sup>3</sup>	48 horas	La cantidad de sal depende de los resultados de laboratorio (dosificación) y tramo de prueba
<b>Enzimas</b>	<b>EG-CBT-2008</b> <b>Sección 308B</b> <b>MTC E 1109</b>	A-2-4, A-2-5, A-2-6, A-2-7 6% IP 15% 4.5 < pH < 8.5 CMO (2) No debe contener Abrasión < 50% % < N° 200: 10 - 35%	1L / 30-33 m <sup>3</sup>		De acuerdo a Especificaciones del fabricante
<b>Aceites sulfonados</b>		Aplicable en suelos con partículas finas limosas o arcillosas, con LL bajo, arcillas y limos muy plásticos CMO (2) < 1.0% Abrasión < 50%			De acuerdo a Especificaciones del fabricante

Fuente: Manual de carreteras, suelos, geología y pavimentos – Aprobado por la resolución directorial 05 – 2013–MTS&14

### 2.3 Definición de términos básicos

**Relación de expansión:** “Se define como la relación entre el volumen máximo del asfalto en su estado espumado y el volumen del asfalto una vez que la espuma ha colapsado completamente.” (Santamarial, 2000)

**Vida media:** “Es el tiempo requerido (medido en segundos) para que la espuma baje hasta la mitad de su volumen máximo alcanzado.” (Santamarial, 2000)

**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.” (Thenoux, 2011)

**Reciclado en frío de pavimentos asfálticos:** “Recuperación del material de un pavimento asfáltico existente que es mezclado con asfalto espumado, adiciones (cemento o cal) y agregados nuevos (si es necesario) para formar una base asfáltica que será colocada en el mismo lugar o en otro distinto.” (Thenoux, 2011)

La recuperación puede ejecutarse mediante un equipo fresador capaz de disgregar el material o mediante métodos convencionales donde el proceso de disgregación ocurre con posterioridad a la recuperación. En general el material recuperado está formado no sólo por concreto asfáltico disgregado, sino también por agregados aportados por la base y sub-base granular existente. (Thenoux, 2011)

**Estabilización de suelos:** “Consiste en la estabilización de suelos de relativa baja plasticidad ( $IP < 16$ ) con asfalto espumado en donde los suelos pueden provenir de la recuperación de áridos de un camino sin pavimentar o de nuevos pozos.” (Thenoux, 2011)

Principalmente se emplean agregados recuperados cuya granulometría es mejorada por agregados nuevos (si es necesario), ya que uno de los objetivos de esta aplicación es

obtener mezclas de bajo costo. El proceso de recuperación de los agregados es similar al descrito para el reciclado en frío de pavimentos asfálticos. (Thenoux, 2011)

**Asfalto espumado:** “El asfalto espumado se realiza mediante la inyección de una pequeña cantidad de agua fría con aire comprimido sobre asfalto caliente, el intercambio de calor espontáneo deriva en un fenómeno físico que espuma al asfalto (no hay proceso químico).” (García)

“Este proceso altera temporalmente las propiedades físicas del asfalto, ya que el asfalto caliente entra en contacto con el agua fría, provocando que este último se convierta en vapor, el cual es atrapado por miles de pequeñas burbujas de asfalto.” (García)

**Material pétreo:** “La caracterización al material pétreo (de aporte o recuperado de la base), se realiza mediante dos ensayos.” (García)

“Primero se evalúa la plasticidad del material por medio de la Norma (ASTM D4318), y segundo el ensayo de plasticidad, se realiza la determinación de la granulometría mediante la Norma ASTM C136 Análisis Granulométrico del material pétreo Finos y Gruesos”. (García)

**Material asfáltico:** “El material asfáltico puede clasificarse mediante dos metodologías: ya sea por medio de viscosidad o por su grado PG. Sin importar la metodología seleccionada, se debe tener en cuenta que para la elaboración del asfalto espumado no se pueden utilizar asfaltos modificados.” (Instituto Mexicano del Transporte, 2016)

**Densidad seca máxima:** “Se determina el peso volumétrico seco máximo (PVSM), conocido también como Yd. Esta determinación se realiza con apego a la norma SCT M-MMP-1-09/06 (2006), en su variante “D”. Este ensayo permitirá obtener dos parámetros de diseño: contenido de humedad óptima y densidad seca máxima.” (Instituto Mexicano del Transporte, 2016)

**Espumado Óptimo:** “El criterio que se utiliza para seleccionar la mejor espuma obtenida es seleccionar la mejor relación de expansión  $R_e$ , con una mejor vida media  $1/2$ .” (Instituto Mexicano del Transporte, 2016)

**Subrasante:** “de la calidad de esta capa depende, el espesor de un pavimento, sea este flexible o rígido, como parámetro para evaluar esta capa se emplea la capacidad de soporte a la deformación por esfuerzo cortante bajo las cargas de tránsito.” (Montejo, 2002)

**Clasificación De Suelos:** “Teniendo en cuenta que en la naturaleza existe una gran variedad de suelos la ingeniería de suelos ha desarrollado algunos métodos de clasificación de los mismos en la actualidad los sistemas más utilizados para la clasificación de los suelos.” (Montejo, 2002)

“En estudios para diseño de pavimentos de carreteras y aeropistas son el de la AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO) y el UNIFIED SOIL CLASSIFICATION SYSTEM conocido como sistema unificado de clasificación de suelos (S.U.C.S)” (Montejo, 2002)

### **Dosificación Del Asfalto Espumado**

“La cantidad de asfalto espumado a ser adicionado al material reciclado para adquirir la resistencia requerida, solo puede ser determinada estableciendo un proceso de laboratorio de diseño de mezcla.”

## CAPÍTULO III

### MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1 Tipo y Nivel de investigación

##### 3.1.1 Tipo de investigación.

“En la ciencia existen diferentes tipos de investigación y es necesario conocer sus características para saber cuál de ellos se adapta mejor a la investigación que se realizará.” (Borja, 2013)

“Aunque no hay acuerdo entre los distintos autores sobre la clasificación de los tipos de investigación, hemos considerado los siguientes criterios.” (Borja, 2013)

El presente proyecto es una investigación tecnológica, “tiene como objetivo la solución de problemas prácticos, lo cual implica la intervención o transformación de la propia realidad, que se manifiesta en el diseño de nuevos productos, nuevos procedimientos, nuevos métodos, etc. Su criterio de valoración radica en su utilidad, en su eficiencia y en su práctica.” (Borja, 2013)

La investigación tecnológica no resuelve problemas prácticos aislados, sino que tiene un efecto multiplicador, por ejemplo:

El diseño de un nuevo sistema de encofrado en base a resinas y plásticos que pueda ser usado para diferentes elementos estructurales. La investigación tecnológica no emplea las habilidades profesionales para la solución de un complicado problema de un enfermo, sino que “establece los procedimientos para el tratamiento de toda una enfermedad”. La

investigación tecnológica no elabora el programa de costos y presupuestos de una empresa constructora, sino más bien elabora un sistema de costos que puede ser aplicado a un conjunto de empresas.

Esta investigación también genera una importante cantidad de conocimientos y contribuye en forma decisiva a la interpretación de la realidad. La investigación tecnológica además de utilizar ciencia aplicada, utiliza también la “expertez”. Incorpora dentro de su metodología, los procedimientos de control de calidad. (Borja, 2013)

### **3.1.2 Nivel de investigación**

El presente trabajo utilizará el nivel descriptivo - explicativo, debido a que, no solo describiremos el problema o fenómeno observado, sino que nos acercaremos y buscaremos explicar las causas que originaron la problemática a solucionar.

“Van más allá de la descripción de conceptos o fenómenos o del establecimiento de relaciones entre variables. Buscan las causas que originan ciertos fenómenos físicos o sociales.” (Borja, 2013)

En el nivel descriptivo – explicativo, “su interés se centra en explicar por qué ocurre un fenómeno y en qué condiciones se da éste, o porqué se relaciona entre dos o más variables.” (Borja, 2013)

## **3.2 Método y diseño de la Investigación**

### **3.2.1 Método de la Investigación.**

Para la presente investigación se utilizará el método inductivo, en la cual se obtendrán conclusiones generales a partir de premisas particulares, que quiere decir que iremos de lo particular a lo general mediante diversas observaciones de los sucesos se propondrá una

conclusión que resulte general para todos los sucesos que sean de la misma clase para la solución del problema; asimismo se recurrirá a los métodos analítico, sintético, descriptivo y estadístico.

### **3.2.2 Diseño de la Investigación.**

La presente investigación, será de tipo no experimental. “Las investigaciones no experimentales no establecen, ni pueden probar relaciones causales directas entre dos variables o entre dos elementos.” (Borja, 2013)

Se basa en categorías, conceptos, variables, sucesos, comunidades o contextos que ya ocurrieron o se dieron sin la intervención directa del investigador. Son hechos o acontecimientos que ya surgieron sin la intervención del investigador que utilizara herramientas o métodos como la descripción, la explicativa la histórica entre otras para llegar a la mejor conclusión posible.

## **3.3 Población y Muestra**

### **3.3.1 Población.**

Está constituida por la carretera Challhuahuacho – Coporaque, se ubica entre las regiones de Apurímac y Cusco; geográficamente el inicio de la vía se ubica en las coordenadas UTM WGS-84 797,397.07 Este y 8'438,034.77 Norte. El final de la carretera tiene coordenadas 874,387.42 Este, y 8'360,811.69 Norte, y comunica las provincias de Cotabambas y Chumbivilcas, además une los distritos de Challhuahuacho, Tambobamba, Mara, Capacmarca, Colquemarca, Chamaca, Velille, Coporaque y Espinar.

### **3.3.2 Muestra.**

La muestra será tramo (km 121+200 a 123+000) en el centro poblado de Pumapuquio, distrito de Ccapacmarca, provincia de Chumbivilcas.

### 3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

#### 3.4.1 Técnicas.

**A. La observación directa:** La observación directa es un método de recolección de datos que consiste en observar al objeto de estudio dentro de una situación particular. Esto se hace sin intervenir ni alterar el ambiente en el que el objeto se desenvuelve. De lo contrario, los datos obtenidos no serían válidos. Por ejemplo, es recomendable recurrir a la observación directa cuando lo que se desea es evaluar el comportamiento por un período de tiempo continuo. Al momento de realizar la observación directa, se puede proceder de dos maneras: de forma encubierta (si el objeto no sabe que está siendo observado) o de forma manifiesta (si el objeto es consciente de estar siendo observado).

**B. Información Indirecta:** “Recopilación de la información existente en fuentes bibliográficas (para analizar temas generales sobre la investigación a realizar), recurriendo a las fuentes originales en lo posible: éstas fueron libros escritos por autores expertos y páginas web de internet.”

**C. Observación de Campo y de Laboratorio:** Según Vengaría, M. y Valdés la observación es “el recurso principal de la observación descriptiva; se realiza en los lugares donde ocurren los hechos o fenómenos investigados. La investigación social y la educativa recurren en gran medida a esta modalidad.”

La observación de laboratorio se entiende de dos maneras: por un lado, la que “se realiza en lugares pre-establecidos para el efecto como los museos, bibliotecas y, naturalmente los laboratorios; y por otro lado, es investigación de laboratorio la que se realiza con grupos humanos previamente determinados, para observar sus comportamientos y actitudes.

**D) Observación Individual y de Equipo:** “Observación Individual es la que hace una sola persona, sea porque es parte de una investigación igualmente individual, o porque, dentro de un grupo, se le ha encargado de una parte de la observación para que la realice sola.”

**E) Observación de Equipo o de grupo:** “Es, en cambio, la que se realiza por parte de varias personas que integran un equipo o grupo de trabajo que efectúa una misma investigación puede realizarse de varias maneras.”

### **3.4.2 Instrumentos.**

**A. Guía de información:** Redes de información, documentales, normas, etc.

**B. Ficha de observación:** Una ficha de observación, “es un instrumento de recolección de datos, referido a un objetivo específico, en el que se determinan variables específicas. Una ficha de observación es un documento que intenta obtener la mayor información de algo, (sujeto) observándolo.”; la ficha puede ser de gran duración o corta duración en el tiempo. En opinión de Sabaino (1992), la observación “es una técnica antiquísima, cuyos primeros aportes sería imposible rastrear.” A través de sus sentidos, el hombre capta la realidad que lo rodea, que luego organiza intelectualmente y agrega: La observación puede definirse, como el uso sistemático de nuestros sentidos en la búsqueda de los datos que necesitamos para resolver un problema de investigación. (pag. 111-113)

### **3.4.3 Métodos de análisis de datos**

Las técnicas de análisis cuantitativo “son aquellas que sirven para describir, graficar y resumir los datos obtenidos con los instrumentos cuantitativos”.

Para el procesamiento de nuestros datos a nivel descriptivo se utilizarán tablas y gráficos a nivel descriptivo, los cuales serán procesados con el programa de Excel 2016 (tabla de frecuencias y gráficos de barras). Su procesamiento se realizará en el programa estadístico SPSS

versión 24. Posteriormente, se realizará el análisis e interpretación y descripción de los resultados. Para la validación de los instrumentos, se utilizará el juicio de expertos, donde, se distribuirá a tres profesionales de la especialidad, quienes calificarán la redacción y contenido del cuestionario y que es aplicable a las unidades de estudio. Además, la confiabilidad de la consistencia interna del cuestionario se hará con la prueba del coeficiente alfa de Cronbach, la cual, deberá ser mayor a 0,750; para ser considerado como un instrumento es de buena confiabilidad.

#### **3.4.4 Fuentes**

Para el presente proyecto de investigación se pudo obtener la información de diversas fuentes tales como:

- Libros
- Artículos científicos
- Tesis
- Páginas web

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS**

#### **“GUÍA PARA LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS MEDIANTE EL USO DE ASFALTO ESPUMADO, EN EL TRAMO (KM 121+200 A 123+000) EN EL CENTRO POBLADO DE PUMAPUQUIO, DISTRITO DE CCAPACMARCA, PROVINCIA DE CHUMBIVILCAS, REGIÓN DE CUSCO”**

##### **4.1 Estudio de ingeniería de la vía existente**

Para poder conocer a fondo el estado de la vía existente y desarrollar las alternativas de solución, se llevó a cabo diversos estudios estructurales y estadísticos (ejecución de ensayos de mecánica de suelos y conteos de tráfico) de la vía existente.

Con el objeto de realizar la evaluación del pavimento existente y verificar las intervenciones de mantenimiento periódico planteadas en las Bases y demás documentos contractuales, se llevó a cabo una evaluación estructural mediante mediciones de deflectometría, auscultación visual de daños o defectos, determinación de espesores y calidad de los materiales a partir de calicatas y ejecución de ensayos de mecánica de suelos, conteos de tráfico y finalmente el diseño de mezclas de material granular existente estabilizado con asfalto espumado..

## 4.2 Medición deflectométrica

### 4.2.1 Descripción del personal y equipos empleados.

La cuadrilla de trabajo para la medición de la deflectometría fue conformada por un técnico especializado y un conductor con experiencia en mediciones de este tipo. El conductor estuvo encargado de manejar el vehículo, así como del control y mantenimiento técnico del equipo.

El técnico es el encargado de todos los aspectos relacionados con las mediciones, es decir, del manejo de la palm mediante la cual se activa el proceso de medición. Adicionalmente los acompaña una camioneta escolta que brinda seguridad en el momento de efectuar las mediciones. Los trabajos fueron realizados entre el 25 y 27 de Julio del presente año.

El equipo empleado fue el deflectómetro liviano (Light Weight Deflectometer, LWD) de la compañía Dynatest, equipo que ofrece el máximo nivel de precisión y un alto rendimiento en las mediciones.

Una palm con el programa y conexión bluetooth con el cual se registraron los datos de cada una de las pruebas con su respectiva progresiva o estación. En la Figura N° 13 se puede apreciar la fuerza aplicada en kN, en kPa, y la deflexión del geófono 0 medida en  $\mu\text{m}$  (micrómetros).

Además en la parte inferior una gráfica de la carga aplicada (F) y deflexión (D1). En la parte inferior a la gráfica vemos la progresiva y la cantidad golpes aplicado en esa estación.

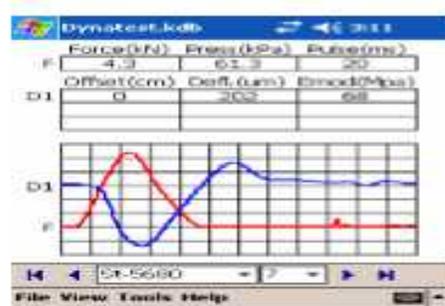


Figura 13: Light Weight Deflectometer

Fuente Conalvias contrucciones SAS sucursal Perú

#### 4.2.2. Trabajos de campo.

La evaluación estructural de pavimentos consiste básicamente en la determinación de la capacidad portante del sistema pavimento-subrasante de una estructura vial existente, en cualquier momento de su vida de servicio, con lo cual se puede establecer y cuantificar las necesidades de intervención del paquete estructural.

La evaluación estructural:

**No destructiva.-** Permite al Ingeniero Vial disponer de una herramienta racional con buena aproximación de forma rápida, a diferencia de ejecutar calicatas para tomar muestras y ensayarlas en el laboratorio, y posteriormente analizar cada uno de sus componentes (materiales) por separado, para incorporarlos luego en el sistema (pavimento) y deducir las características estructurales del mismo.

La metodología “**No destructiva**” se basa en la interpretación de las deflexiones medidas en la superficie del pavimento, las mismas que reflejan una respuesta global del sistema pavimento subrasante bajo una carga liviana dada.

Su medición es simple, rápida, económica y “no destructiva”, es decir, no se altera el equilibrio ni la integridad del pavimento.

Otra característica de la metodología de evaluación “no destructiva”, es que por constituir la “muestra de ensayo” el pavimento mismo, ésta representa el fiel reflejo de la compleja interacción entre sus componentes (capas de materiales y subrasante) y además esta “muestra de ensayo” puede ser evaluada en cualquier momento de su vida sin disturbarla ni destruirla.

La deflexión es la medida de deformación elástica que experimenta un pavimento al paso de una carga liviana y es función no solo del tipo y estado del pavimento, sino también del método y equipo de medida.

En el ensayo no solo se desplaza el punto bajo la carga, sino también un sector alrededor de ella, generando lo que se denomina cuenco o deformada.

Los equipos que trabajan con el sistema de medida de deflexión bajo carga por impacto envían una fuerza de impacto transitoria al pavimento; una masa es levantada a determinada altura y luego soltada sobre una placa circular amortiguadora en el pavimento. Una fuerza de impulso transitoria se genera a causa de la caída de la masa, para este caso, la carga aplicada fue de 16 kN. Los desplazamientos verticales producidos en el pavimento a causa del impacto, son detectados por sensores situados a determinadas separaciones del centro de aplicación de la carga, típicamente 0, 30 y 60 cm. Se aplicó una carga dinámica y las deflexiones producidas fueron medidas por medio de una grupo de sensores ubicados a distancias de 0.30 y 0.60 m del centro del disco de carga, y registradas automáticamente en una palm. Para llevar a cabo las mediciones se tuvo en cuenta.



*Figura 14:* Mediciones de Deflectometría

Fuente: Conalvias construcciones SAS sucursal Perú

Lo establecido en las normas: ASTM E 2583 (2011).

Los datos de las deflexiones obtenidas con el equipo fueron procesados y adicionalmente fueron corregidos por carga a 16 Kn.

Los valores obtenidos son presentados en el Anexo A y se muestran los resultados en la tabla 16, en donde, se aprecian deflexiones de menor magnitud en los tramos 1 y 2 entre 50 y 340 micrones mientras que para los tramos 3 y 4 se tienen promedios que van entre los 200 y 500 micrones; estos valores permiten evaluar los sub tramos con buen comportamiento de la estructura de pavimento existente. Los sub tramos con deflexiones altas dan indicios de posibles problemas en el pavimento entre los que pueden existir deficiencias de drenaje, insuficiente espesor de la estructura, problemas por geometría de la vía (curvas de volteo o fuertes pendientes que generan descompactación y segregación del material), entre otros.

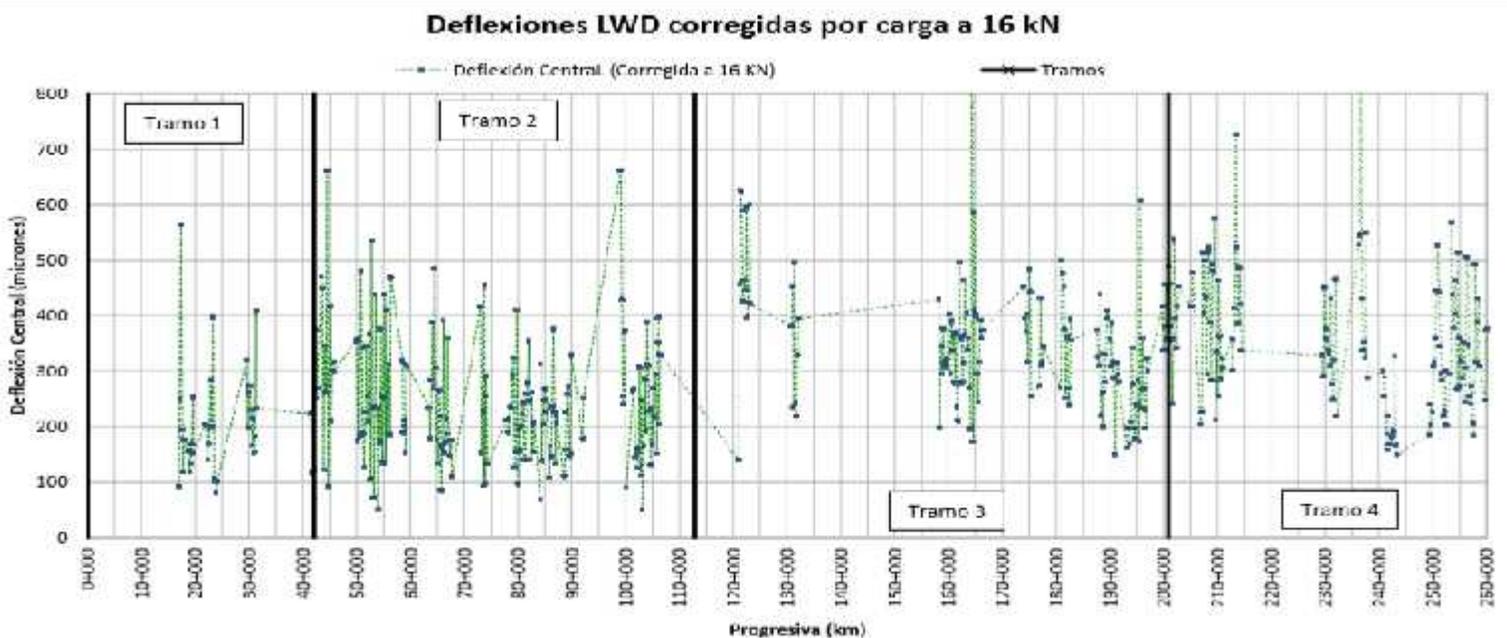


Figura 15: Deflexiones Obtenidas Corregidas por Carga a 16 KN

Fuente: Conalvias construcciones SAS sucursal Perú

**Anexos A:**

## Deflexiones con el Equipo Fueron Procesados y Adicionalmente Fueron Corregidos por Carga a 16 KN

Tabla 16

*Deflexiones con el Equipo Fueron Procesados y Adicionalmente Fueron Corregidos por Carga a 16 KN*

REPORTE EQUIPO LWD													
T ram o	Prog resiva(k m)	R adi o( m)	Car ga aplica da (k N)	Esf uerzo aplica do (K pa)	Sensores			Deflexiones			Deflexiones Corregidas por carga a 16 KN		
					d 0( m m)	d 1( m m)	d 2( m m)	d 0(mi cron es)	d 1(mi cron es)	d 2(mi cron es)	d 0(mi cron es)	d 1(mi cron es)	d 2(mi cron es)
3	121 +060	1 50	16. 0	22 6.0	0	3	6	1 40	3 6	1 2	1 40	3 6	1 2
3	121 +200	1 50	15. 7	22 1.0	0	3	6	4 48	1 11	5 2	4 58	1 13	5 3
3	121 +400	1 50	15. 6	22 0.0	0	3	6	6 07	1 81	7 7	6 25	1 86	7 9
3	121 +600	1 50	15. 7	22 3.0	0	3	6	5 79	1 11	2 7	5 90	1 13	2 8
3	121 +800	1 50	15. 9	22 4.5	0	3	6	4 23	1 02	4 3	4 26	1 03	4 3
3	122 +000	1 50	15. 7	22 3.0	0	3	6	4 57	1 68	6 6	4 66	1 71	6 7
3	122 +200	1 50	15. 8	22 3.0	0	3	6	4 42	1 41	4 9	4 47	1 42	5 0
3	122 +400	1 50	15. 5	21 8.5	0	3	6	5 75	2 55	1 06	5 95	2 64	1 10
3	122 +600	1 50	15. 8	22 3.5	0	3	6	3 93	9 0	3 5	3 97	9 1	3 5
3	122 +800	1 50	15. 6	22 0.5	0	3	6	4 13	1 37	4 7	4 24	1 40	4 8
3	123 +000	1 50	14. 7	20 8.0	0	3	6	5 53	1 17	2 1	6 01	1 27	2 3

Fuente: Conalvias construcciones SAS sucursal Perú

### **4.3 Estimación de tránsito**

El presente estudio de tráfico tiene por finalidad, la evaluación del flujo vehicular particular que está transitando por los diversos tramos que conforman la carretera Heavy Hall Road y el impacto de los tracto camiones de capacidad de 52.4 ton, vinculados directamente con los proyectos mineros Las Bambas.

#### **4.3.1 Información general.**

Los trabajos de campo para la recolección de datos, conteos vehiculares y los monitoreos de peso por eje se realizaron en la siguiente locación y en las fechas señaladas:

##### **4.3.1.1 Conteos vehiculares.**

CONTEO VEHICULARES 1 - las mediciones del flujo vehicular se realizaron en:

- ✓ ESTACION QUEHUIRE : del 31 de julio al 04 de agosto 2016
- ✓ ESTACION MARA : del 04 al 06 de agosto 2016
- ✓ ESTACION VELILLE : del 02 al 04 de agosto 2016

CONTEO VEHICULAR 2.- los conteos validados forman parte del estudio denominado programa de conservación vial por niveles de servicio de Provias nacional y se realizaron en las estaciones siguientes:

- ✓ ESTACION QUEHUIRE : realizado entre el 04 al 10 de marzo de 2016
- ✓ ESTACION VELILLE : realizado entre el 10 al 16 de marzo de 2016

CONTEO VEHICULAR 3.- información suministrada por la mina las bambas referente al número de camiones tipo t3s3, que transitan diariamente por el HEAVY HAUL ROAD transportando concentrado y materiales de logística vinculados con los proyectos de la mina. se cuenta también con el número de camiones proyectado que transitarán a partir de enero de 2017.

#### 4.3.1.2 Censo de carga (pesaje de vehículos).

Estación censo de carga YAURI, tomó las muestras de pesos por ejes en los vehículos a la altura del km 455 en el ingreso espinar, realizado en 13 y 14 de marzo del 2016. Esta estación forma parte del estudio denominado programa de conservación vial por niveles de servicio de provias nacional, del cual también se tomaron como referencia los factores de carga resultantes.

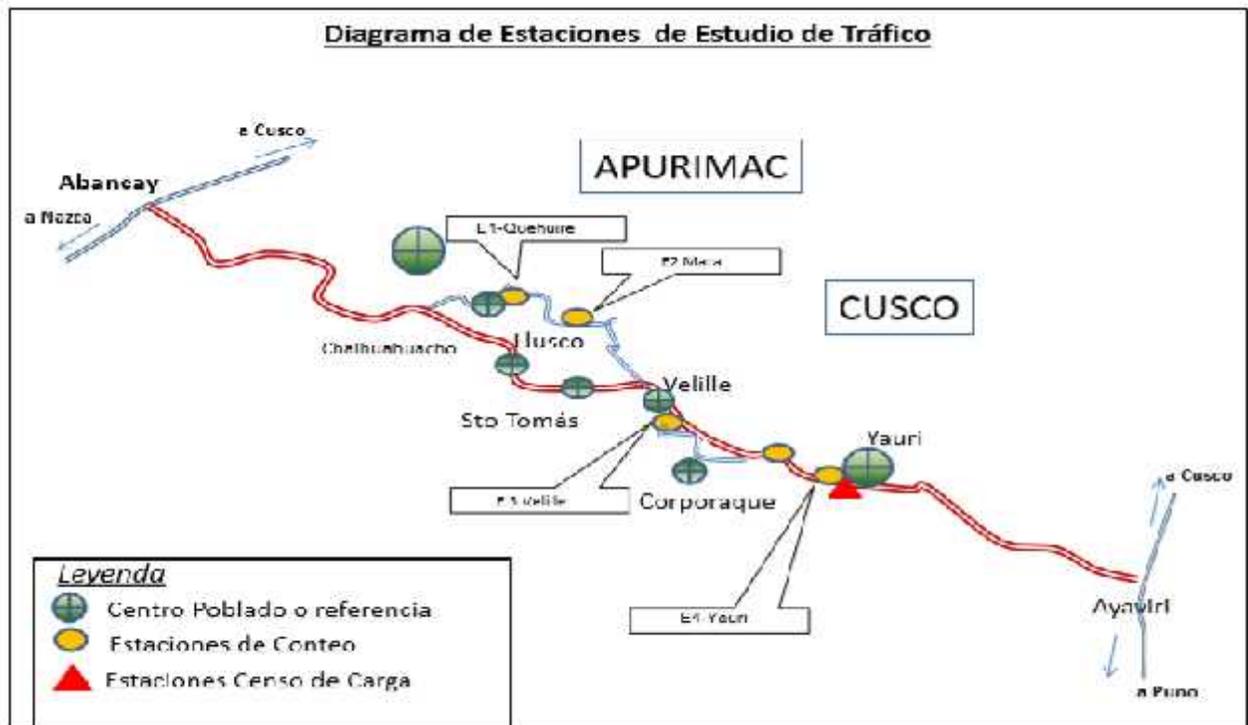


Figura 16: Ubicación de Estaciones de Conteo y Carga

Fuente: Elaboración propia

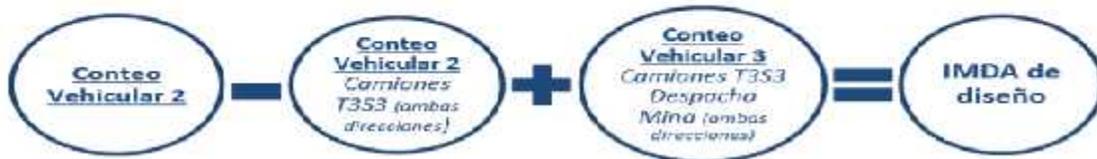
#### 4.3.2 IMDa de diseño.

Para la determinación del IMDa de diseño se consideró el conteo vehicular realizado en marzo del presente año, que tuvo una duración de 7 días y estuvo ubicado en las estaciones de Quehuere Y Velille, el cual prevaleció sobre el conteo vehicular 1 realizado en agosto del presente, dado que en dicho periodo de aforo se presentó una reducción en la operación de la

mina, lo cual hizo que el flujo vehicular habitual se redujera drásticamente, no siendo representativo.

El conteo obtenido en la estación Quehuire representa el tránsito de los tramos 1 y 2 del proyecto, es decir, desde la ubicación del acceso a la mina pasando por Mara, hasta el dv. cusco, y el conteo ubicado en la estación Velille representa el tránsito de los tramos 3 y 4 del proyecto, es decir, desde dv. Cusco pasando por Velille, hasta el final del tramo cerca a espinar. adicionalmente, fue considerada información del conteo vehicular 3 suministrada por las bombas referente al número de camiones tipo T3S3, que transitan diariamente en el presente año, por el

**Figura 2-5 IMD<sub>o</sub> considerados para la determinación del IMD<sub>a</sub> de diseño**



Heavy Haul Road, el cual, se compone por 110 vehículos de materiales de logística y 160 vehículos de transporte de concentrado, vinculados con los proyectos de la mina.

Fuente: Elaboración propia

Nota: EL IMD<sub>a</sub>, hace referencia al tránsito medio diario que circula en ambas direcciones de la vía.

Figura 17: Muestra el Criterio Utilizado para Determinar el IMDA de Diseño



Semitraylers	70	75	79	84	89	79	84	89	94	100	137	540	540	168	540	540
T3s3																
Traylers	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	0	0	0
Total IMDA	354	622	644	666	689	311	580	597	617	637	683	1095	1104	649	1029	1037

Fuente: Conalvias contrucciones SAS sucursal Perú

En la tabla anterior se puede apreciar que existe una diferencia considerable en el número de camiones y semitrailers tipo T3S3, para los años 2017 y 2018, lo cual hace que se tenga un IMDa superior a 1,000 vehículos/día. Este incremento importante en el número de vehículos pesados hace que se incremente significativamente el número de repeticiones de ejes equivalentes, y por ende la confiabilidad requerida para el diseño, y en igual sentido solicitará una estructura de pavimento de mayor espesor.

Se ha considerado como IMDa de diseño el determinado a partir del Estudio de Tránsito de 2016. Es importante precisar a fin que sea tomado en cuenta por el cliente en necesidades futuras de la carretera, que el IMDa determinado para la carretera, le da una clasificación por demanda de “Carretera de segunda Clase3, para la cual se establece una superficie pavimentada, es decir una superficie de rodadura tipo carpeta asfáltica.

#### **4.2.3.- Estimación de ejes equivalentes de 8.2 ton de diseño**

Habiendo establecido el IMDa de diseño para el presente estudio se procedió a determinar la repetición de ejes equivalentes de 8.2 ton (18 kpsi) de diseño, basados en Estudio de tránsito del año 2016, el cual corresponde al tránsito actual de la vía incluyendo la operación actual de Las Bambas. La proyección para el periodo de diseño previsto (año 2017 y 2018) se efectuó empleando una tasa de crecimiento variable entre **0,2% y 6,0%** según el tipo de vehículo. Se considera que el tránsito minero no sufre ningún incremento anual, a menos que se registre una expansión del proyecto o aumento en la producción.

#### 4.2.3.1 Metodología de estimación de ejes equivalentes de 8.2 ton

Para efectos de diseño, la estimación consiste en proyectar el volumen medio diario de vehículos pesados, considerando el factor de deterioro que produce su combinación de ejes en un periodo de análisis. El factor de equivalencia de carga es determinado mediante valores de referencia de otros estudios, para su cálculo existen diferentes metodologías, como la ley de la cuarta potencia y AASHTO entre otras. Para el presente cálculo se utilizó la información establecida en el Manual de Suelos y Pavimentos del MTC.

$$EE_{8.2ton} = [EE_{dia.carril} \times Fca \times 365]$$

$$EE_{dia.carril} = IMDpi \times Fdx \times Fcx \times Fvpi \times Fpi$$

Donde:

$EE_{8.2TON}$  : Ejes equivalentes a ejes estándar de 8,2 ton (18kpsi)

$IMDpi$  = Índice medio diario según tipo de vehículo pesado seleccionado (i)

$Fd$  = Factor direccional que depende del uso de los carriles de la calzada

$Fc$  = Factor carril de diseño

$Fvpi$  = Factor de equivalencia de carga o destructivo del vehículo i, que depende de las cargas por eje para el parque automotor habitual

$Fpi$  = Factor de presión de neumáticos

$Fca$  = Factor de crecimiento acumulado por tipo de vehículo pesado

365 = Número de días del año

**Volumen de diseño:** corresponde al IMDa estimado según se enuncio precedentemente.

Porcentaje de vehículos pesados: Se estima como el porcentaje de vehículos pesados respecto al total.

**Factor direccional:** La utilización prevista para las pistas de la Heavy Haul Road es del 50%, ya que se estima que la cantidad de vehículos que ingresa es igual al que sale. Patrón de comportamiento del tránsito asociado a la operación de proyectos de esta índole.

**Tasa de Crecimiento:** Se considera para el tránsito local, o no asociado a la actividad minera, una tasa de crecimiento entre 0.2% y 4,6%, según el tipo de vehículo, referida a condiciones específicas de crecimiento económico, aumento del turismo, aumento del parque automotor, expansión demográfica, etc.

**Factor camión:** De acuerdo a la información suministrada por el cliente y a las características del tránsito observadas en los diferentes recorridos a la vía se deduce lo siguiente: Se prevén camiones de 52,8 toneladas como peso bruto para un vehículo de especificaciones tales que se encuentre dentro de las tolerancias legales, correspondiendo a un semitrailer conformado por un eje sencillo, un eje tandem y un eje tridem (T3S3), al cual corresponde un factor camión de 4,52.

**Número de ejes equivalentes:** Es calculado según lo indicado. De acuerdo a los análisis realizados a partir de los antecedentes desarrollados en la Ingeniería Básica y directrices entregados por el cliente en cuanto al tránsito de operación referente al volumen y características de los vehículos, el tránsito de diseño expresado como repeticiones de ejes equivalentes de 8.2

Ton es el siguiente:

Tabla 18

*Tránsito de Diseño*

<b>Año</b>	<b>Tramo 1</b>	<b>Tramo 2</b>	<b>Tramo 3</b>	<b>Tramo 4</b>
	<b>MMG Las Bambas - Pte. Inchuray</b>	<b>Pte Inchuray - Dv. Cusco</b>	<b>Dv. Cusco - Velille</b>	<b>Velille - Espinar</b>
2017	6.57E+05	6.57E+05	6.33E+05	6.33E+05
2018	1.32E+06	1.32E+06	1.27E+06	1.27E+06
2021	3.32E+06	3.32E+06	3.19E+06	3.19E+06

Fuente: Conalvias Construcciones S.A.S.

#### **4.3.4.- Metodología.**

Los métodos empleados para realizar el presente estudio de tráfico se describen a continuación:

##### **4.3.4.1. Conteos vehiculares.**

**En el Conteo Vehicular 1** se realizaron 03 estaciones de conteo vehicular con una duración de tres (3) días en cada ubicación. Conteos 24 horas continuas.

**En el Conteo Vehicular 2** se realizaron 02 estaciones de conteo vehicular con una duración de siete (7) días en cada ubicación. Conteos 24 horas continuas. En ambos casos, se empleó un factor de corrección estacional del mes correspondiente

##### **4.3.4.2. Censo de cargas y pesaje por ejes en modo dinámico.**

Se realizó durante 4 días consecutivos 12 horas por días, el proceso de pesaje consistió en usar un equipo de pesaje dinámico (pesaje en movimiento) con el cual se determina el peso por ejes y

peso bruto vehicular. En el proceso de pesaje también se verificó la presión de llantas y el origen y destino de los vehículos pesados.

El margen de error de las mediciones oscila en un +/- 5% a un promedio de velocidad no mayor de 5Km/h.

#### **4.3.4.3. Materiales y equipos.**

- Materiales de Escritorio: Formato de encuesta y conteo vehicular, Papel Bond, Lapiceros, Lápices, Mesa de trabajo, Sillas, Tableros A4.
- Material de Señalización: 12 Conos y 01 Cilindros de Señalización, 04 Lámparas Intermitentes, 01 Reflector de 500w, 02 Bastones de Señalización, 01 Señalización Vertical, Chalecos reflexivos, Cascos, Guantes, Linternas y otros.
- 01 Cámara Fotográfica Digital
- 01 Cargador de Baterías 12V DC– 220AC
- 01 Equipo de Pesaje Dinámico Marca PAT TRAFFIC 300PC / WPM100
- 02 Baterías de 12V 225Ah

Para el censo de carga, los vehículos fueron clasificados según su tamaño y número de líneas de rotación (ejes) y su contacto con el pavimento, de acuerdo a la configuración vehicular aprobada en el Reglamento Nacional de Vehículos, Decreto Supremo N° 058-2003-MTC, así:

Buses: Buses de 2, 3 y 4 ejes (B2, B3 y B4)”

C2: “Camión de 2 ejes (2 ejes simples)”

C3: “Camión de 3 ejes (1 eje simple y 1 eje doble)”

C4: “Camión de 4 ejes (1 eje simple y 1 eje triple)”

T2S1 (2S1): “Semitrayler (3 ejes simples)”

T2S2 (2S2): “Semitrayler (3 ejes, 2 simples y 1 eje doble)”

T2S3 (2S3): “Semitrayler (3 ejes, 2 simples y 1 eje triple)”

T3S2 (3S2): “Semitrayler (3 ejes, 1 simples y 2 ejes dobles)”

T3S3 (3S3): “Semitrayler (3 ejes, 1 simple, 1 eje doble y 1 eje triple)”

C3R2 (3T2): “Trayler (Camión C2+carreta de 2 ejes simples)”

C3R3 (3T3): “Trayler (Camión C2+carreta de 2 ejes, uno simple y otro doble)”

C4R2 (4T2): “Trayler (Camión C4+carreta de 2 eje simples)”

E7: “Vehículos especiales con 7 ejes (biarticulados o doble semirremolque)”

#### **4.3.5 Trabajo de gabinete.**

##### ***4.3.5.1 resultados de conteos vehiculares.***

- ✓ **Para el conteo vehicular 1** se realizaron 03 estaciones de conteo con la finalidad de ponderar el tráfico local, y los vehículos vinculados a las operaciones de la mina.

Los resultados de los tres días de conteo de tráfico que incluyeron dos días laborales y un día de fin de semana para las estaciones de **Quehuire, Mara y Velille**, permitió determinar Índice Medio Diario Semanal (IMDS) de la muestra vehicular tomada. La estación de conteo de Quehuire se realizó los días 31 de julio, 01 y 03 de agosto del presente año, registró un Índice Medio Diario Semanal (IMDS) de 802 vehículos/día.

Tabla 19

*Tráfico Vehicular por Sentido – IMDs Estación El Quehuire*

<b>Tipo de vehículo</b>	<b>IMDa a chalhuahuacho</b>	<b>IMDa a puente inchural</b>	<b>IMDa total</b>	<b>Distr.</b>
Autos	19	13	32	3.97%
s. wagon	40	40	80	10.00%
c. pick up	79	89	167	20.83%
c. panel	0	6	6	0.78%
Camioneta rural	51	54	105	13.08%
Micro	5	10	15	1.81%
Ómnibus 2E	11	6	17	2.17%
Ómnibus 3E	0	0	0	0.00%
Ómnibus 4E	0	0	0	0.00%
Camión 2E	25	38	63	7.83%
Camión 3E	77	89	167	20.78%
Camión 8 X 4	10	0	10	1.28%
CAMION 4 E	0	8	8	1.03%
SEMITRAYLES 2S2	0	0	0	0.00%
SEMITRAYLES 2S3	0	0	0	0.00%
SEMITRAYLES 3S2	0	2	2	0.27%
SEMITRAYLES 3S3	37	92	130	16.17%
<b>TOTAL, IMDs</b>	<b>355</b>	<b>447</b>	<b>802</b>	<b>100%</b>

Fuente: Elaboración propia

La Estación de Conteo de **Mara** registro a los vehículos en los días 04, 05 y 06 de agosto del presente año, obteniendo un Índice Medio Diario Semanal (IMDS) de 387 vehículos/día.

Tabla 20

*Tráfico Vehicular por Sentido – IMDs Estación E2 – Mara*

<b>Tipo de vehículo</b>	<b>IMDa Saiwa</b>	<b>a IMDa chalhuahuacho</b>	<b>a IMDa total</b>	<b>Distr %</b>
Autos	11	8	19	4.89%
s. wagon	24	21	46	11.82
c. pick up	49	45	95	24.44
c. panel	0	0	0	0.00
Camioneta rural	29	35	65	16.72
Micro	2	1	3	0.81
Ómnibus 2E	3	5	8	2.11
Ómnibus 3E	0	0	0	0.00
Ómnibus 4E	0	0	0	0.00
Camión 2E	21	36	57	14.74
Camión 3E	14	17	31	7.99
Camión 8 X 4	0	0	0	0.00
Camion 4e	0	0	0	0.00
Semitraylers 2s2	0	0	0	0.00
Semitraylers 2s3	0	0	0	0.00
Semitraylres 3s2	1	0	1	0.25%
Semitrayles 3s3	39	24	63	16.24%
Traylers 2t2	0	0	0	0.00%
Traylers 2t3	0	0	0	0.00%
Traylers 3t2	0	0	0	0.00%
Traylers 3t3	0	0	0	0.00%
<b>Total IMDs</b>	<b>194</b>	<b>193</b>	<b>387</b>	<b>100</b>

Fuente: Elaboración propia

La Estación de Conteo de **Velille** se llevó a cabo los días 02, 03 y 04 de agosto del presente año, obteniéndose un Índice Medio Diario Semanal (IMDS) de 428 vehículos/día en ese periodo.

Tabla 21

*Tráfico Vehicular por Sentido - IMDs Estación E3 - Velille*

<b>Tipo de vehículo</b>	<b>IMDa A HHR</b>	<b>IMDa a Velille</b>	<b>IMDa Total</b>	<b>Distrb.</b>
Autos	9	15	24	5.70%
s. wagon	22	17	39	9.10%
c. pick up	55	67	122	28.55%
c. panel	1	0	1	0.35%
Camioneta rural	28	33	61	14.24%
Micro	1	3	4	0.90%
Ómnibus 2E	8	4	13	2.99%
Ómnibus 3E	0	0	0	0.07%
Ómnibus 4E	0	0	0	0.00%
Camión 2E	30	30	60	13.90%
Camión 3E	6	12	18	4.18%
Camión 8 X 4	1	1	2	0.37%
Camión 4E	0	0	0	0.07%
Semitrayles 2S2	0	0	0	0.00%
Semitrayles 2S3	0	1	1	0.15%
Semitrayles 3S2	2	0	2	0.52%
Semitrayles 3S3	39	42	81	18.90%
Traylers 2t2	0	0	0	0.00%
Traylers 2t3	0	0	0	0.00%
Traylers 3t2	0	0	0	0.00%
Traylers 3t3	0	0	0	0.00%
<b>Total IMDs</b>	<b>202</b>	<b>226</b>	<b>428</b>	<b>100%</b>

Fuente: Elaboración propia

- ✓ **Para el conteo vehicular 2** realizados en el mes de marzo, que fueron realizados para el programa de conservación vial por niveles de servicio de Provias Nacional.

Tabla 22

*Tráfico Vehicular por Sentido - IMDa Estación Quehuire (Marzo 2016)*

<b>Tipo de vehículo</b>	<b>IMDa de chalhuahuacho</b>	<b>A IMDa a puente Inchurai</b>	<b>IMDa total</b>	<b>Distrib %</b>
Autos	7	9	16	2%
s. wagon	21	20	41	6%
c. pick up	101	100	200	29%
c. panel	0	1	1	0%
Camioneta rural	61	63	124	18%
Micro	7	6	13	2%
Ómnibus 2E	3	3	6	1%
Ómnibus 3E	0	0	0	0%
Ómnibus 4E	0	0	0	0%
Camión 2E	36	32	68	10%
Camión 3E	17	22	39	6%
Camión 8 X 4	0	0	0	0%
Camión 4E	0	0	1	0%
Semitrayles 2S2	0	0	0	0%
Semitrayles 2S3	0	0	0	0%
Semitrayles 3S2	26	10	36	5%
Semitrayles 3S3	64	73	137	20%
Traylers2t2	0	2	2	0%
Traylers2t3	0	0	0	0%
Traylers 3t2	0	0	0	0%
Traylers 3t3	0	0	0	0%
<b>Total IMDs</b>	<b>344</b>	<b>338</b>	<b>683</b>	<b>100%</b>

Fuente: Provias nacional

Tabla 23

*Tráfico Vehicular por Sentido - IMDa Estación Velille (Marzo 2016)*

<b>Tipo de vehículo</b>	<b>IMDa A Velille</b>	<b>IMDa Espinar</b>	<b>a IMDa total</b>	<b>Distrib %</b>
Autos	13	13	25	4%
s. wagon	11	10	22	3%
c. pick up	105	111	216	33%
c. panel	1	0	1	0%
Camioneta rural	36	34	71	11%
Micro	6	7	13	2%
Ómnibus 2E	12	11	23	4%
Ómnibus 3E	0	0	1	0%
Ómnibus 4E	0	0	0	0%
Camión 2E	30	31	61	9
Camión 3E	17	18	35	5
Camión 8 X 4	0	0	0	0
Camión 4E	3	4	7	1
Semitrayles 2S2	0	0	1	0
Semitrayles 2S3	0	0	0	0
Semitrayles 3S2	2	2	4	1
Semitrayles 3S3	80	87	168	26
Traylers2t2	0	0	0	0
Traylers2t3	0	0	0	0
Traylers 3t2	0	0	0	0
Traylers 3t3	0	0	0	0
<b>TOTAL IMDa</b>	<b>318</b>	<b>331</b>	<b>648</b>	<b>100%</b>

Fuente: Provias nacional

Estos son los resultados del IMDa que se emplearán en la determinación del Número de Repeticiones de Ejes Equivalentes de 8.2 Tn en el Heavy Haul Road, por tener estaciones con cobertura de al menos siete días de la semana.

## **4.4 Mecánica de suelos**

### **4.3.1 Resultados de ensayos realizados.**

Para determinar las características físicas – mecánicas del material de rodadura existente y de la sub rasante de la carretera, se realizaron calicatas y ensayos en laboratorio de clasificación granulométrica, índices de consistencia, densidad máxima seca y resistencia.

Los resultados de laboratorio realizados se presentan en el Anexo C y en el resumen de dichos ensayos en la Tabla N° 22

En síntesis, se observa que en la superficie de rodadura existente predominan suelos de tipo grava limosa (GM) en los tramos 1 y 2, mientras que en los tramos 3 y 4 se aprecian suelos de tipo grava bien gradada (GW) de acuerdo a clasificación SUCS. En general con resistencia al corte, medida indirectamente mediante CBR, (entre 35% y 87%) alta, y con Índices de Plasticidad menores a 9.

Se realizaron ensayos para la sub rasante en lugares donde no se encontraron suelos Estabilizados y/o mejorados. Estos sectores estabilizados presentan bolonería.

Los ensayos realizados a la subrasante permitieron identificar en general una subrasante del tipo arena limosa (SM) de acuerdo a clasificación SUCS, con CBR mayor a 19%.

El CBR de la subrasante en los sectores estabilizados y/o mejorados con bolonería, Utilizado en el cálculo de la estructura de pavimento requerido, es de 40%, leído a una Penetración de 0.1 pulgadas, mientras que en los demás sectores se utilizó el CBR Medido.

Tabla 24

*Resultados de ensayos en el Corredor*

<b>Numero ensayo</b>	<b>tramo</b>	<b>Pr of. Inicio (cm)</b>	<b>Pr of. Fin (cm)</b>	<b>capa</b>	<b>Prog . inicial</b>	<b>Prog . final</b>	<b>AAs hto</b>	<b>SU CS</b>	<b>LI</b>	<b>LP</b>	<b>I P</b>	<b>W %</b>	<b>CB R 95 %</b>	<b>CB R 100 %</b>
37	2	0	20	MATERIAL DE RODADURA	85+860	86+010	A-2-4(0)	G M	32. 4	24. 10	8. 3	2.1 5	70. 80	87
38	2	0	33	MATERIAL DE RODADURA	86+010	86+440	A-1-a(0)	G M- GC	24. 8	20. 70	4. 1	2.1 4	77. 50	92. 20
39	2	0	26	MATERIAL DE RODADURA	86+440	87+220	A-2-4(0)	G M	33. 10	25	8. 1	2.1 3	78. 80	92. 90
40	2	0	33	MATERIAL DE RODADURA	88+600	88+750	A-1-b(0)	G M- GC	24. 60	19. 20	5. 4	2.1 5	70. 60	89. 40
41	2	0	40	MATERIAL DE RODADURA	88+750	89+280	A-1-a(0)	G W- G M	19. 90	16. 50	3. 4	2.1 7	82. 20	97. 10
42	2	0	12	MATERIAL DE RODADURA	92+000	92+200	A-1-a(0)	G M	28. 80	26. 10	2. 7	2.1 1	58. 40	81. 40
43	2	0	30	MATERIAL DE RODADURA	99+100	99+250	A-1-a(0)	G W- G M	26. 20	23. 50	2. 7	2.1 3	58. 20	79. 40
44	2	0	20	MATERIAL DE RODADURA	99+980	100+130	A-1-a(0)	G W- G M	29	26. 10	2. 9	2.1 2	60. 40	82
45	2	0	25	MATERIAL DE RODADURA	100+400	102+090	A-1-a(0)	G W- G M	24. 80	21	3. 8	2.0 9	77. 50	90. 20

46	2	0	16	MATER IAL DE RODAD URA	102+ 910	105+ 230	A-1- a (0)	GP - G M	26. 90	NP	N P	2.1 5	72. 90	86
47	2	0	15	MATER IAL DE RODAD URA	106+ 990	106+ 710	A-1- a (0)	GP - G M	24. 90	NP	N P	2.1 3	70. 60	85. 50
48	3	0	24	MATER IAL DE RODAD URA	121+ 210	123+ 000	A-1- a (0)	G M	25	NP	N P	2.1 2	77. 70	93. 50
49	3	0	30	MATER IAL DE RODAD URA	130+ 820	132+ 150	A-1- a (0)	G W- G M	25	NP	N P	2.1 4	74. 70	94. 40
50	3	0	21	MATER IAL DE RODAD URA	158+ 240	160+ 600	A-1- a (0)	G W- G M	22. 60	18. 70	3. 9	2.1 4	84. 50	100 .30
51	3	0	22	MATER IAL DE RODAD URA	160+ 600	162+ 100	A-1- a (0)	G W- G M	24. 90	NP	N P	2.1 2	75. 60	97. 50
52	3	0	20	MATER IAL DE RODAD URA	162+ 250	162+ 800	A-1- a (0)	G W- G M	23	21. 40	1. 6	2.1 6	80. 40	95. 80
53	3	0	25	MATER IAL DE RODAD URA	162+ 800	166+ 870	A-1- a (0)	G M	35. 20	32. 70	2. 5	2.1 5	79. 40	92. 70
54	3	0	25	MATER IAL DE RODAD URA	162+ 800	166+ 270	A-1- a (0)	G M	35. 70	33. 40	2. 3	2.1 5	73. 10	87. 80
55	3	0	25	MATER IAL DE RODAD URA	174+ 050	174+ 700	A-1- a (0)	G W- G M	25. 30	NP	N P	2.1	76. 80	93. 80

Fuente: Conalvias contrucciones SAS sucursal Perú

### 4.3.2 Análisis realizado

El material de la estructura del pavimento existente en estos sectores varía entre gravas bien gradadas y gravas limosas, identificándose en general baja plasticidad en dichos materiales.

De acuerdo a lo anterior, y en consecuencia con las intervenciones previstas se consideraron los siguientes análisis:

#### 4.4.2.1 Estabilización con asfalto espumado.

En la estabilización de la capa granular de la estructura del pavimento con asfalto espumado, la porción de asfalto contenida en la espuma, migra hacia la fracción fina del agregado al transcurrir la vida media de la burbuja, generando así una matriz cementante que aglomera todos los áridos de la mezcla.

Bajo dicho principio la aptitud granulométrica de un agregado para ser estabilizado con asfalto espumado, puede ser evaluada a través de las siguientes distribuciones granulométricas:

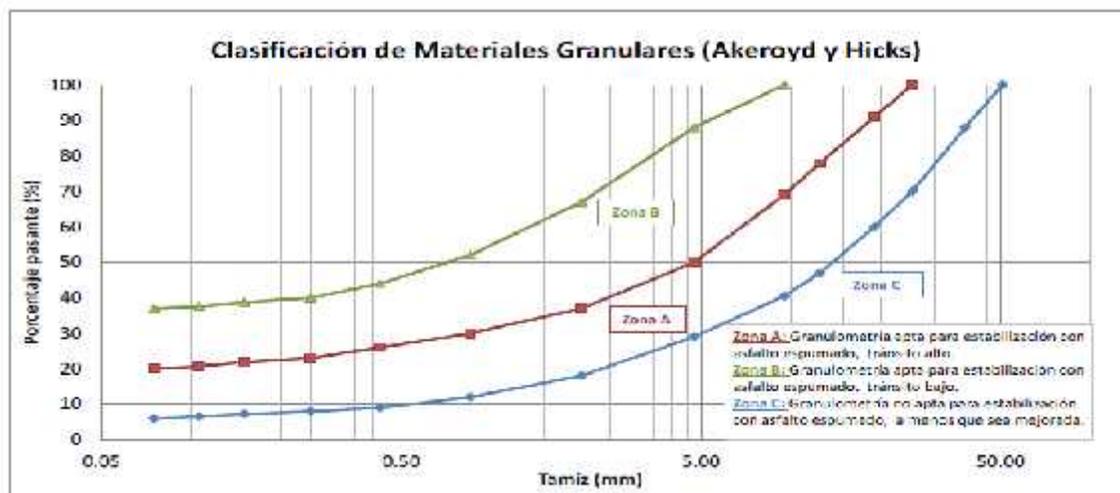


Figura 18: Clasificación de Materiales para Estabilización con Asfalto Espumado

Fuente: Diseño de mezcla con asfalto espumado

Tabla 25

*Cantidades de Cemento Recomendadas para Materiales Estabilizados con Asfalto Espumado*

<b>Índice De Plasticidad Cantidad De Cemento (% En Peso Del Agregado)</b>	
IP<10	DE 1 A 1.5%
10<IP<16	2%
IP>16	3%

Fuente: Tecnología de asfalto espumado y diseño de mezcla

Contenido de humedad recomendado: Entre 70 % y 80 % de la humedad óptima para alcanzar la densidad máxima de laboratorio.

Contenido de asfalto recomendado: Entre 2 % y 3,5 % referido al peso del agregado.

#### ***4.4.2.2 Diseño de material granular estabilizado con asfalto espumado.***

Se ha realizado el diseño para una capa granular estabilizada con asfalto espumado con la finalidad de proporcionar la dosificación de los componentes que se utilizaran en la preparación de la misma, empleando las normas de ensayos ASTM D5581/ASTM D1559 – Método Marshall, así como las Especificaciones Técnicas del proyecto.

El informe del Diseño de Mezcla para Estabilización con Asfalto Espumado fue realizado en el laboratorio Mota-Engil Perú S.A. en Agosto 2016 y se encuentra incluido en el Anexo E, del cual se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 26

*Resumen de Resistencias a la Tracción Indirecta*

contenido (%) de asfalto espumado	densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	resistencia tracción indirecta		resistencia conservada (%)
		condición seca (kpa)	condición húmeda (kpa)	
1.5	2.177	181.13	31.09	17
2.0	2.186	376.22	107.96	29
2.5	2.199	449.63	199.35	44
3.0	2.170	265.68	95.69	36

Fuente: Diseño de mezcla para estabilización con asfalto espumado, Anexo 3

El porcentaje de asfalto espumado a inyectarse se calculó en función del peso seco del material agregado más 1% de cemento portland utilizado en la mezcla.

Evaluando los resultados obtenidos, se determina que 2,5% es el contenido óptimo de asfalto espumado a utilizar en el diseño, donde la densidad de la mezcla sería 2,199 gr/cm<sup>3</sup>, la resistencia a la tracción indirecta 449,63 kPa (para probetas secas), 199,35 kPa (para probetas húmedas).

Los resultados anteriores de acuerdo al diseño de mezcla presentado en el Anexo E, pueden ser obtenidos con asfalto espumado a temperaturas entre 160°C y 180°C, condición que debe cumplirse durante la ejecución de los trabajos en obra.

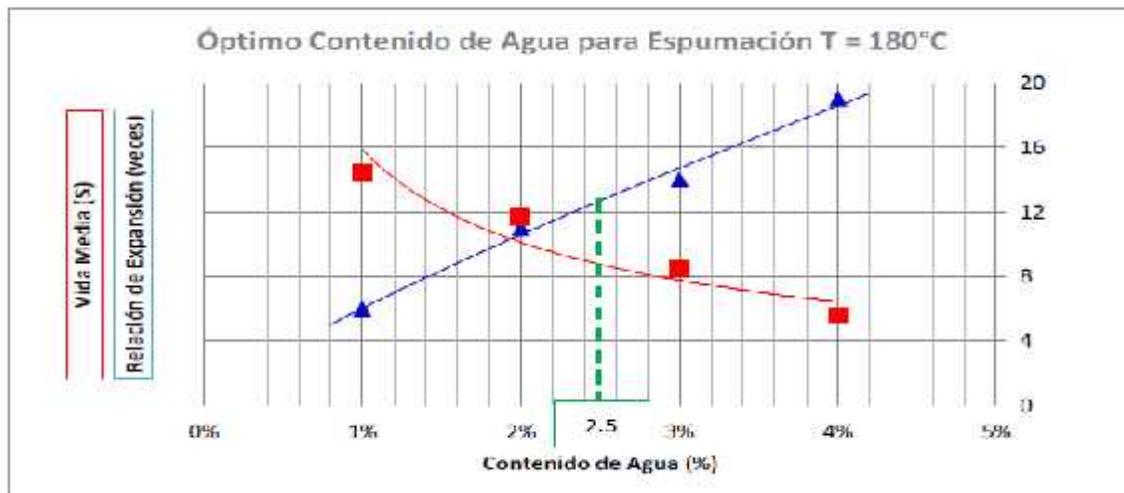


Figura 19: Determinación de Óptimo Contenido de Agua Espumación para T= 160 °C

Fuente: Diseño de mezcla para estabilización con asfalto espumado

En los siguientes gráficos se presenta los contenidos óptimos de agua para la relación de expansión de vida media de espuma tanto de 160° como de 180°C, con los cuales en todos los casos siempre la relación de expansión promedio es mayor a 10 veces, y la vida promedio es mayor a 8 segundos, valores que se consideran como condiciones mínimas para espumación.

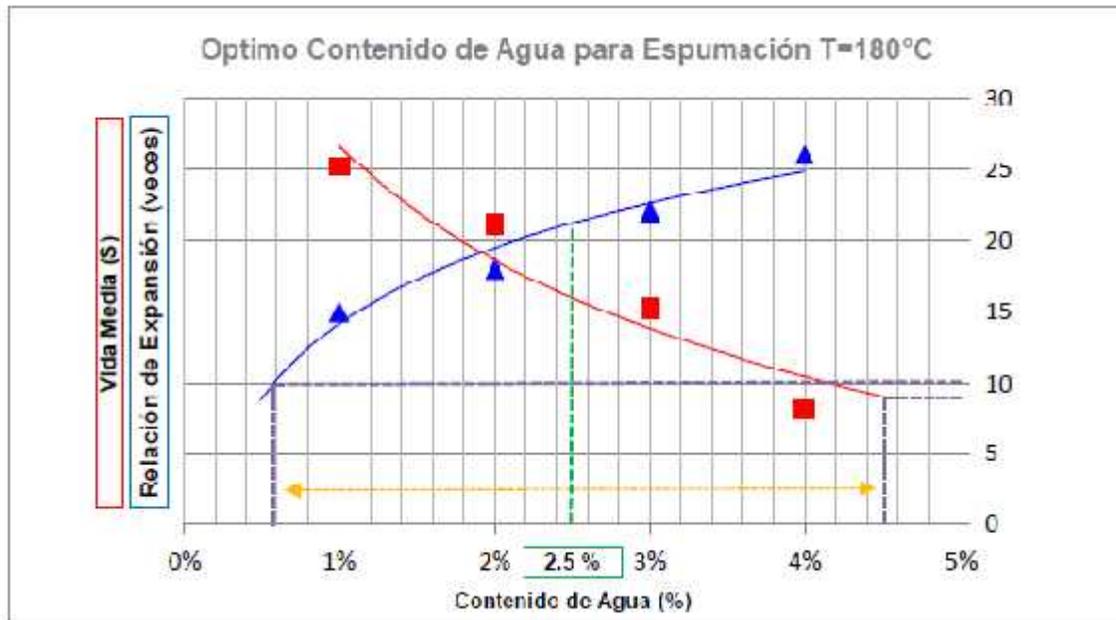


Figura 20: Determinación de Óptimo Contenido de Agua de Espumación para T=180°C

Fuente: Diseño de mezcla para estabilización con asfalto espumado

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		
<b>COEFICIENTES ESTRUCTURALES DESPUÉS DE LA ESTABILIZACIÓN</b>											
<b>RANGOS REPRESENTATIVOS DE RIGIDEZ</b>											
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		
<b>CARACTERÍSTICAS ESPERADAS DEL MATERIAL (DESPUÉS DE LA ESTABILIZACIÓN)</b>											
Nota: 1. Para un tráfico de diseño mayor a 300.000 ESALs la resistencia a la tracción indirecta (ITS) 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)											
<b>CLASIFICACIÓN AASHTO DE MATERIAL NATURAL ANTES DE LA ESTABILIZACIÓN</b>											
								A - 1 - a			
							A - 1 - b				
							A - 2 - 4	A - 2 - 5			
						A - 2 - 6	A - 2 - 7				
							A - 3				
								A - 4			
									A - 5		
										A - 6	
											A - 7 - 5
											A - 7 - 6

Figura 21: Coeficientes Estructurales Sugeridos para Materiales Estabilizados con Asfalto Espumado – Valor CBR Saturado a la Densidad Especificada

Fuente: Wirtgen, Manual de Reciclado en Frio, pág. 201 Para determinar el valor del Coeficiente

Estructural de la capa granular estabilizada con asfalto espumado se utilizó el valor de la resistencia a la tracción indirecta para probetas húmedas, mediante la siguiente figura, obteniendo un coeficiente de 0.21/pulg, sin embargo, de manera conservadora para el diseño de la estructura del pavimento se consideró un valor de 0.20/pulg.

## **4.5 Diagnostico y evaluación**

### **4.5.1 Diseño de pavimentos.**

Consiste en la modelación de una estructura de una o varias capas, mediante la cual se pretende generar una superficie uniforme que sea estable en el tiempo para atender la demanda de solicitudes de cargas de tránsito, evitando que estas produzcan deterioros o deformaciones permanentes sobre la subrasante y a su vez de las propias capas que lo constituyen.

La metodología de diseño AASTHO 93 se basa en invariantes originales, concebidos a partir de ensayos viales desarrollados por la AASHO en pistas de prueba con repeticiones de carga controladas durante un tiempo determinado, en el cual permanentemente se verificó la serviciabilidad, concepto introducido y cuantificado a través de la experiencia del usuario, relacionado con el estado de deterioro del pavimento. Estas medidas, permitieron calibrar curvas de serviciabilidad presente y estimar el número de repeticiones de carga para llevar la estructura a un determinado nivel. En años posteriores el método fue incorporando muchas otras variables como la confiabilidad y estableciendo y ampliando su espectro al diseño de pavimentos rígidos.

De acuerdo a las necesidades establecidas, las características del parque automotor habitual previsto para los diferentes tramos y a las cargas propias para dicho tránsito, se requiere una estructura de rodadura que otorgue al usuario la comodidad y la seguridad necesaria, que sea compatible con las características geométricas y que se conserve durante un lapso de tiempo aceptable, de manera que no se afecte la transitabilidad.

#### 4.5.2 Comportamiento de un pavimento asfáltico.

El pavimento es concebido como un sistema multicapa, cuyo funcionamiento está gobernado por criterios de fatiga asociados a la tensión en la fibra inferior de las capas asfálticas y compresión en la superficie de la subrasante, sus magnitudes están

directamente relacionadas con las cargas aplicadas y las características de elasticidad de los materiales (módulos elásticos y relación entre las deformaciones longitudinales y transversales más conocidas como relación de Poisson).

Adicionalmente, el comportamiento y variación en la respuesta estructural del pavimento, está influenciado de manera considerable por variables climáticas como la temperatura. De igual manera puede atribuirse a la lluvia influencia en el comportamiento de la subrasante y capas granulares ante la ausencia de estructuras de drenaje, lo que produce mermas en la resistencia y ocasiona contaminación del paquete granular y expulsión de finos en el momento en que se produce cierto fisuramiento. El agrietamiento por fatiga se produce por deformaciones radiales de tracción excesivas a nivel de la base de la carpeta asfáltica por la acción de las cargas de tránsito, mientras que el ahuellamiento se produce por lo general por deformaciones verticales excesivas a nivel de suelo de fundación (subrasante). El fenómeno de ahuellamiento puede ser originado por dos causas diferentes:

- Concreto asfáltico inestable, con lo que el material "fluye" bajo la acción del tránsito.

Estructura de pavimento débil, con las consiguientes deformaciones verticales por compresión excesiva en las diferentes capas del pavimento especialmente el suelo a nivel de subrasante debido a las cargas de tránsito, produciendo ahuellamiento. De esta manera se infiere que la estructura de pavimento debe tener la capacidad de evitar la deformación permanente de los

suelos de fundación, y a su vez estar configurada de forma tal que resista durante un periodo de tiempo determinado los esfuerzos de tracción en la fibra inferior de la capa bituminosa.

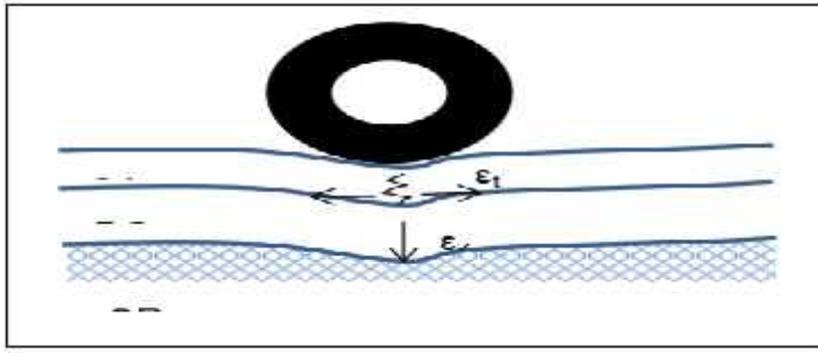


Figura 22: Leyes de Fatiga Pavimento Asfáltico

Fuente: Elaboración propia

En el caso de tratamientos superficiales, sobre capas granulares no tratadas, es importante considerar los efectos de la compresión y el ahuellamiento en dicha capa granular. Si bien la solución superficial es afín con la aquí planteada, el paquete de base considera la estabilización con emulsión asfálticas, por lo cual el comportamiento de esta capa pasa a ser gobernado por criterios de deformación y tensión en la fibra inferior de dicha capa de base estabilizada.

#### 4.5.3 Subrasante.

Las características de los suelos de subrasante, referidas a su Clasificación, Índices de Consistencia, Densidad Máxima Seca y Resistencia, son presentados y ítem 2.3.1.

En la Tabla 3-1 se presentan los valores del Módulo Resiliente  $M_r$  calculados con base en el CBR de diseño, para lo cual se empleó la siguiente relación, recomendada en el Manual de Carreteras – Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos – Sección Suelos y Pavimentos, vigente a la fecha.

$$MR \text{ (psi)} = 2555 * CBR^{0.64}$$

Tabla 27

*Valores de Módulo Resiliente (MR) Utilizados*

<b>Tramo</b>	<b>Progresiva inicial</b>	<b>Progresiva final</b>	<b>CBR al 95% de MDS subrasante</b>	<b>Mr (PSI)</b>
tramo 3	121+210	123+000	19.3	16988

Fuente Conalvias construcciones SAS sucursal Perú

Como factor de diseño que caracteriza la resistencia de la subrasante, se adoptó el Módulo Resiliente obtenido a partir de ensayos de CBR. Se realizó un análisis empleando la solución con el Estudio de tránsito Año 2016 (con cantidad de camiones actualizada por Minera Las Bambas), los resultados de dicho análisis son mostrados en la siguiente tabla:

Tabla 28

*Longitud de Sectores que Cumplen Estructuralmente para El periodo de Diseño, según Estudio de Tránsito*

<b>tramo</b>	<b>Longitud de espesores que cumplen estructuralmente para el año 2017 (m)</b>			<b>Longitud de sectores que cumplen estructuralmente para el año 2018 (m)</b>		
	<b>Cumple</b>	<b>No Cumple</b>	<b>Total General</b>	<b>Cumple</b>	<b>No Cumple</b>	<b>Total General</b>
1	150	6,335	6,485		6,485	6,485
2	1,790	30,225	32,015	1,210	30,805	32,015
3		20,005	20,005		20,005	20,005
4		24,894	24,894		24,894	24,894
Total	1,940	81,459	83,399		82,189	83,399
general						

Fuente: Conalvias construcciones SAS sucursal Perú

En donde se puede apreciar que sólo una longitud de 1,940 m cumpliría estructuralmente en el año 2017. Por otro lado, para el año 2018 se tiene que sólo cumple 1,210 m del total.

Con los resultados de las evaluaciones realizadas, se concluye que, bajo la condición de tránsito real esperado, según actualización de vehículos pesados (camiones 3S3 a partir del año 2017) entregado por Minera Las Bambas, la solución de pavimento establecida en los

términos de referencia no llegará a tener una aceptable serviciabilidad para el periodo de diseño o garantía establecido para el proyecto (Año 2017). Con lo cual queda fundada la necesidad de plantear nuevas alternativas de pavimento.

#### **4.5.4 Alternativa de solución para la sub razante.**

Considerando:

- 1) El tráfico real
- 2) Llevar la capa de material granular de rodadura del pavimento existente a un espesor mínimo de 30 cm, toda vez que se verifica que el espesor existente no provee una estructura adecuada para el volumen actual de tráfico de la vía.

A continuación, se describe la solución planteada para la estabilización:

Esta solución permite que la carretera cumpla estructuralmente, según el análisis realizado, durante todo el año 2017.

Esto representa que la estructura de diseño planteada cubre el Número Estructural requerido para dicho año (SNreq 2017). Adicionalmente se propone la construcción de una superficie de rodadura que permita mitigar las emisiones de polvo que causa el tránsito minero en el área de influencia de los centros poblados.

Se consideran las siguientes intervenciones según la necesidad de cada sector:

Aporte de material granular en espesores indicados + Estabilización con asfalto espumado de 15 cm + Micropavimento  $e = 1$  cm, para sectores con espesor de capa de material granular existente menor a 30 cm.



Figura 23: Solución Alternativa 1 - para Cumplimiento Estructural Hasta 2017

Fuente: Conalvias contrucciones SAS sucursal Perú

## 4.6 Diseño de mezcla para la estabilización con asfalto espumado

### 4.6.1 Objetivo general.

El presente informe tiene la finalidad de alcanzar la dosificación de los componentes que se usarán en la preparación de la base estabilizada con asfalto espumado, empleando las normativas de ensayos ASTM D5581 / ASTM D1559 – MÉTODO MARSHALL, así como las especificaciones técnicas del proyecto.

#### 4.6.2 Introducción a la tecnología de estabilización con asfalto espumado.

En el caso de la estabilización con Asfalto Espumado, ninguna reacción química está involucrada; únicamente las propiedades físicas del asfalto son temporalmente alteradas. El proceso de espumación es un fenómeno físico regido por las leyes básicas de la termodinámica el cual consiste en la dispersión de asfalto virgen a altas temperaturas (160 - 180 °C), al contacto con agua a temperatura ambiente (20 - 25 °C) y aire comprimido inyectados a presiones determinadas, en una misma cámara. Cuando el agua fría entra en contacto con el asfalto caliente, se convierte en vapor, el cual es atrapado por miles de diminutas burbujas de asfalto. Esta unión produce un shock de temperaturas que genera súbitamente una expansión de gas en forma de espuma. Sin embargo, este no es un estado permanente: después de algunos minutos, el asfalto retoma sus propiedades originales:



Figura 24: Izquierda - Simulación del Proceso de Espumación - Muestra de Asfalto Espumado

Fuente: Laboratorio MOTA-ENGIL PERÚ S.A

#### 4.6.3 Consideraciones para el diseño de mezclas con asfalto espumado.

En esta sección se presenta un resumen de los aspectos más importantes que fueron considerados en los diseños de mezclas con asfalto espumado

**a) Elección del tipo de asfalto:** Se utilizó Cemento Asfáltico PEN 85/100 para espumar, descartándose asfaltos blandos por su mayor susceptibilidad al envejecimiento prematuro y asfaltos duros debido a que producen espuma de mala calidad, generando una dispersión pobre. En el Anexo N°01 se evidencia la ficha técnica del cemento asfáltico utilizado en el presente estudio.

**b) Determinación de la calidad de la espuma de asfalto:** En esta fase se analizaron como posibles variables, el asfalto recomendado por sus mejores cualidades en materia de espumación (PEN 85/100), proveniente de Petroperú; asimismo se bosquejó un abanico (12 combinaciones con 3 medidas c/u); es decir, 36 ensayos con las siguientes variables:

- 1.- “Temperatura (entre 160° C. y 180 ° C)”
- 2.- “Porcentaje de agua de espumación (entre 1.5 % y 3.0 %)”

Para entender mejor en qué consisten los ensayos de espumación, revisaremos algunos conceptos importantes:

**Razón de Expansión:** Es la medida de la viscosidad del asfalto espumado y está definida como la relación entre el máximo volumen logrado en el estado de espuma y el volumen de asfalto original. Indica la trabajabilidad de la espuma y su capacidad de cubrimiento y mezclado con los agregados. Dicha razón se mide en número de veces.

**Vida Media:** Es la medida de la estabilidad del asfalto espumado, calculada como el tiempo tomado en segundos en que la espuma decae a la mitad de su volumen máximo

expandido. Brinda una idea del tiempo aproximado disponible para mezclar el asfalto espumado con los agregados antes de que colapse la espuma.

La Razón de Expansión y la Vida Media son propiedades que dependen de muchos factores, siendo los principales, la temperatura del asfalto y la dosis de agua de espumación. A mayores temperaturas del asfalto y mayor cantidad de agua se incrementa la Razón de Expansión, pero a su vez disminuye la Vida Media; sin embargo, la mejor espuma es generalmente considerada como aquella que optimiza tanto la Razón de Expansión como la Vida Media; es decir, que consigue el mejor balance entre ambas propiedades. Para llevar a cabo dicha optimización es necesario graficar ambas propiedades en un mismo gráfico, 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.

Las propiedades de espumación mínimas aceptables para una estabilización efectiva son:

- 1.- “Razón de Expansión: 10 veces”
- 2.- “Vida Media: 8 segundos”

**Índice de Espumación:** Se define como el área bajo la curva de Razón de Expansión y Tiempo de Colapso. La curva que se obtiene de ésta gráfica corresponde a la curva de colapso, la cual es un indicador del tiempo disponible para el mezclado. El área formada por la intersección de la curva con el eje de las ordenadas y la recta correspondiente a una razón de expansión de 4.0 se conoce como índice de espumación. La razón de expansión 4.0 es considerada como la mínima para obtener mezclas con propiedades consideradas como aceptables.

A continuación, en la tabla N° 27 se presentan los resultados de Razón de Expansión y Vida Media obtenidos en la investigación, haciendo combinaciones de temperaturas (160 – 180° C.) de asfalto con diversos contenidos de agua (1.5 – 3.0 %), a fin de encontrar el mejor índice de espumación.

Tabla 29

Resumen de Ensayos de Espumación - Medida de la Razón de Expansión y Vida Media

Contenido de Agua (%)	T = 160° C		T = 170° C		T = 180° C		T = 190° C	
	Expansión	Vida Media						
1.0%	6	14.5	12	15	15	25.23	16	29.68
2.0%	11	11.7	18	12.25	18	21.14	19	23.32
3.0%	14	8.5	20	9.52	22	15.2	23	15.21
4.0%	19	5.6	26	5.68	26	8.12	30	9.3

Fuente: Laboratorio MOTA-ENGIL PERÚ S.A

Nota: Cada color corresponde a una temperatura.

Como se evidencia en la figura N° 25, el índice de espumación demuestra un crecimiento acentuado hasta los 180°C. A partir de los 180°C no se verifican aumentos significativos de este índice, razón por la cual se escoge esta temperatura para la espumación del asfalto.

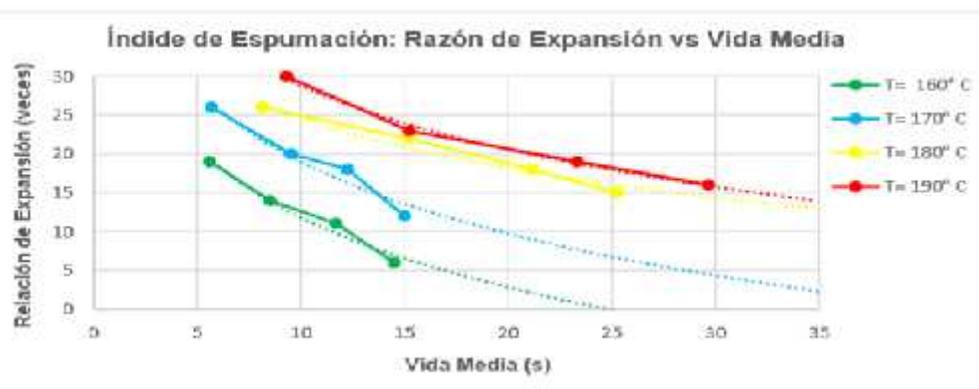


Figura 25: Determinación de Índice de Espumación Vs Vida Media

Fuente: Laboratorio MOTA-ENGIL PERÚ S.A

En la siguiente figura se muestra la determinación del óptimo contenido de agua de espumación para la mejor espuma obtenida a 180° C. El valor determinado es de 2.5 % de contenido de agua.



Figura 26: Determinación de óptimo Contenido de Agua de Espumación para T= 180°C

Fuente: Laboratorio MOTA-ENGIL PERÚ S.A

Finalmente, en la siguiente tabla tenemos los resultados de las condiciones idóneas de espumación:

Tabla 30

### Resumen de Condiciones Óptimas de Espumación

Condiciones óptimas de espumacion	
Asfalto	Petroperu PEN 85/100
Temperatura	180° C
% agua de espumacion	2.5%
Razón de expansión promedio	22>10 veces
Vida media promedio	15>8 segundos

Fuente: Laboratorio MOTA-ENGIL PERÚ S.A

Para el asfalto definido por el cliente, el mejor índice de espumación se detiene para una temperatura de asfalto de 180° C, y el porcentaje de agua que produce la mejor espuma es de 2.5 %. Estos parámetros son usados en el procedimiento del Diseño de Mezclas.

**c) Requisitos de los agregados:**

El agregado utilizado en este diseño es procedente de la siguiente ubicación

- Material Granular - Km 48+850 - Tramo II

Se utilizó el huso granulométrico desarrollado en Sudáfrica – TG2 (Zona A), siendo adecuado para tratamientos con materiales de amplia variabilidad en su gradación (ver Gráfico N° 27), su aplicación en los distintos tramos del presente proyecto es factible y verificable en base a los resultados de los ensayos de laboratorios obtenidos de los materiales muestreados.

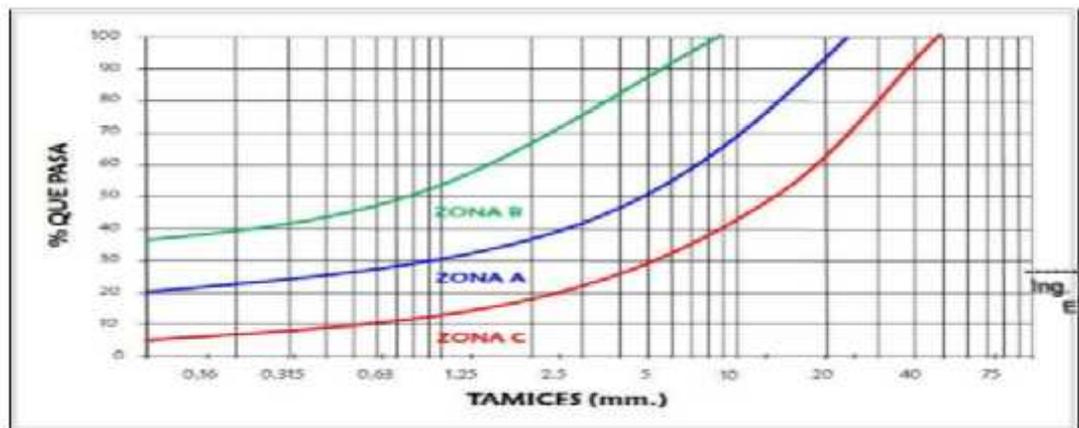


Figura 27: Bandas Granulométricas Sudafricanas - TG2

Fuente: Clasificación de materiales granulares (Akeroyd y Hicks, 1988)

De manera específica el contenido de finos es un parámetro de gran importancia y en general debe encontrarse sobre un 5% para asegurar la dispersión del asfalto espumado en la mezcla. Los ensayos de granulometría realizados en todas las muestras ensayadas evidencian que el material pasante de la malla N° 200 es superior a 5%. En el Anexo N°02 se presentan los resultados de los ensayos de caracterización realizados al agregado estudiado:

Tabla 31

*Descripción de la Designación N° Muestra y N° de Informe de los Diferentes Agregados Ensayados*

Designación	Muestra N°	Informe N°
Material granular – km 121+850	A1157/16	0978/16

Fuente: Laboratorio MOTA-ENGIL PERÚ S.A

**d) Contenido óptimo de asfalto:** El contenido de asfalto espumado se optimizó utilizando la curva Resistencia a la Tracción Indirecta (ITS) vs el contenido de asfalto inyectado; se moldearon probetas Marshall 100mm y fueron cargadas en la prensa Marshall y cabezal Lottman, para la condición seca y saturada, siendo la prueba más adecuada para caracterizar el material estabilizado en términos de resistencia y durabilidad. Para el cálculo de la resistencia a la tracción indirecta se utiliza la fórmula siguiente:

$$ITS = (2 \times P) / (\pi \times h \times d) \times 10000$$

ITS = resistencia a la tracción indirecta [kPa]

P = carga máxima aplicada [kN]

h = altura promedio de la probeta [cm]

d = diámetro de la probeta [cm]

**e) Contenido de humedad:** el contenido de humedad en la mezcla de asfalto espumado tiene un rol multifuncional en el comportamiento y performance de producto final, muchos investigadores la consideran como el principal criterio de diseño. Bajos contenidos de agua impide la dispersión de la espuma, su trabajabilidad y compactación, mientras que el exceso de humedad incrementa el tiempo de curado, reduce la densidad y la resistencia mecánica de la mezcla.

Para la elaboración de la mezcla en laboratorio se estableció en 80% del contenido óptimo de humedad (OCH) para mezclar e inyectar la espuma, a este punto de humedad se le conoce como “fluff point” que es la que logra la máxima densidad suelta del agregado y es la mínima que permite la mezcla de los agregados con el asfalto espumado, luego de la dispersión se completó el 20% de contenido de humedad para alcanzar la máxima densidad de compactación.

### Anexo 1: Ficha Técnica del Documento del Cemento Asfáltico (Petro Perú PEN 85/100)

Tabla 32

Ficha Técnica del Documento del Cemento Asfáltico (PetroPerú PEN 85/100)



PETRÓLEOS DEL PERÚ - PETROPERÚ S.A.

#### ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PETROPERÚ

CLASE DE PRODUCTO				
ASFALTO SÓLIDO				
TIPO DE PRODUCTO				
CEMENTO ASFÁLTICO				
NOMBRE DE PRODUCTO				
ASFALTO SÓLIDO 85/100 PEN				
ENSAYOS	ESPECIFICACIONES (a)		MÉTODO	
	MIN.	MÁX.	ASTM	AASHTO
PENETRACIÓN a 25°C, 100 g, 5 s, 0.1mm	85	100	D-5	T-49
VOLATILIDAD				
Prueba de inflamación Cleveland, copa abierta, °C	232		D-92	T-48
Gravedad específica a 15.6/15.6°C	Reportar		D-79	T-228
DUCTILIDAD a 25°C, 5 cm/min, cm	100		D-113	T-51
SOLUBILIDAD EN TRICLOROETILENO, % masa	99.0		D-2062	T-44
SUSCEPTIBILIDAD TÉRMICA				
Prueba de calentamiento sobre película fina, 3.2 mm, 163°C, 5 horas:			D-1754	T-179
Pérdida por calentamiento, % masa		1.0		
Penetración retenida, % del original	47+		D-5	T-49
Ductilidad a 25°C, 5 cm/min, cm	75		D-113	T-51
Índice de susceptibilidad térmica	-1.0	+1.0		Franco RLB
FLUJES				
Viscosidad cinemática a 100°C, cSt	Reportar		D-2170	T-201
Viscosidad cinemática a 135°C, cSt	170		D-2170	T-201
REQUERIMIENTO GENERAL:				
El cemento asfáltico deberá ser homogéneo, libre de agua, y no deberá formar espuma al ser calentado a 175°C.				
OBSERVACIONES:				
(a) En concordancia con la Norma Técnica Peruana NTP 321.051 y con los estándares ASTM D 946 y AASHTO M-20.				

Fuente: Laboratorio MOTA-ENGIL PERÚ S.A

## Anexo 2: Caracterización de Espumado, Análisis Granulométrico de Agregado Fino y Grueso (ASTM C136/C136M14) y Límites de Consistencia de Suelos ASTM D4318-10

Tabla 33

*Caracterización de Agregados para Diseño de Mezcla para la Estabilización con Asfalto Espumado/ Material Granular KM 121+850*

ENSAYO	MÉTODO	RESULTADO [Incertidumbre si aplica]	REPORTE DE ENSAYO N.º	
02.01 - Análisis Granulométrico de Agregado Fino y Grueso	ASTM C136/C136M-14	T# 1½" = 100% T# 1" = 93% T# ¾" = 82% T# ½" = 65% T# ¼" = 57% T# ¼" = 50% T# No.4 = 43%	T# No.8 = 43% T# No.15 = 40% T# No.30 = 35% T# No.50 = 30% T# No.100 = 21% T# No.200 = 14%	4317.15
02.07/02.08 - Densidad, Gravedad Específica y Absorción de los Agregados	ASTM C127-15 / ASTM C128-15	Material Retenido en el Tamiz ¾" p <sub>od</sub> = 2580 kg/m <sup>3</sup> p <sub>ssd</sub> = 2300 kg/m <sup>3</sup> p <sub>aparente</sub> = 2640 kg/m <sup>3</sup> WA = 0.9%		4318.15
01.04 - Ensayo de Compactación Proctor con corrección para Suelos que contienen partículas de sobre tamaño	ASTM D698-12 / ASTM D1557-12 / ASTM D4718-87 (reaprobado 2007)	γ <sub>Máx. Seco</sub> = 2.228 g/cm <sup>3</sup> W <sub>opt</sub> = 5.9 % γ <sub>Máx. Seco Corregido</sub> = 2.286g/cm <sup>3</sup> W <sub>opt Corregido</sub> = 5.0%		4319.16
01.02 - Límites de Consistencia de Suelos	ASTM D4318-10	LL = 24% LP = 18% IP = 6%		4330.16

Fuente: Empresa MOTA ENGIL PERU SA

Nota: Los resultados presentados se refieren únicamente a la muestra ensayada..

Tabla 34

## Análisis Granulométrico de Agregado Fino y Grueso (ASTM C136/C136M14)

Masa Inicial de la Muestra,  $p_1$  (0.1g) = 10250.0  
 Masa Retenida en Tamiz No.4 (0.1g) = 5495.6  
 Masa Pasante en Tamiz No.4 (0.1g) = 4754.4  
 Masa de la muestra después del Lavado,  $p_2$  (0.1g) = 8679.1  
 Pérdidas en el Lavado,  $p_3$  (0.1g) = 1370.9

Muestra Seca al Aire  
 Muestra Seca en Horno (105-110°C)

Módulo de Fineza = 3.83

FRACCIÓN RETENIDA EN TAMIZ No. 4					
Porcentaje de Material Retenido en Tamiz No. 4 (0.1%) = 53.6					
Tamiz (Abertura)		Masa Retenida	Parcial Retenido	Acumulado Retenido	Acumulado Pasante
		$p_i'$	$N_i = \frac{p_i'}{p_1} \times 100$	$N_i'$	$N_i' = 100 - N_i'$
( $7N^*$ )	(mm)	(0.1 g)	(0.1 %)	(0.1 %)	(1 %)
5	125	0.0	0.0	0.0	100
4	100	0.0	0.0	0.0	100
3 1/2	90	0.0	0.0	0.0	100
3	75	0.0	0.0	0.0	100
2 1/2	63	0.0	0.0	0.0	100
2	50	0.0	0.0	0.0	100
1 1/2	37.5	0.0	0.0	0.0	100
1	25	737.8	7.2	7.2	93
3/4	19	1075.3	10.5	17.7	82
1/2	12.5	1812.0	17.7	35.4	65
3/8	9.5	761.5	7.4	42.8	57
1/4	6.4	699.6	6.8	49.6	50
4	4.75	409.4	4.0	53.6	46

FRACCIÓN PASANTE EN TAMIZ No. 4					
Porcentaje de Material Pasante en Tamiz No.4 (0.1%) = 46.4					
Masa a Ensayar (0.01g) = 301.30					
Tamiz (Abertura)		Masa Retenida	Parcial Retenido	Acumulado Retenido	Acumulado Pasante
		$p_i'$	$N_i = \frac{p_i'}{p_2} \times 100$	$N_i'$	$N_i' = 100 - N_i'$
( $N^*$ )	(mm)	(0.01 g)	(0.1 %)	(0.1 %)	(1 %)
8	2.360	20.21	3.1	56.7	43
16	1.180	22.24	3.4	60.2	40
30	0.600	26.67	4.1	64.3	36
50	0.300	37.50	5.8	70.0	30
100	0.150	55.54	8.6	78.6	21
200	0.075	49.35	7.6	86.2	14

Masa Retenida en el Fondo,  $p'_{200}$  (0.01g) = 2.91      Material Pasante en el Tamiz No. 200,  $p_{200} = p_3 + p'_{200}$  (0.01g) = 1373.84  
 Fuente: Laboratorio MOTA-ENGIL PERÚ S.A

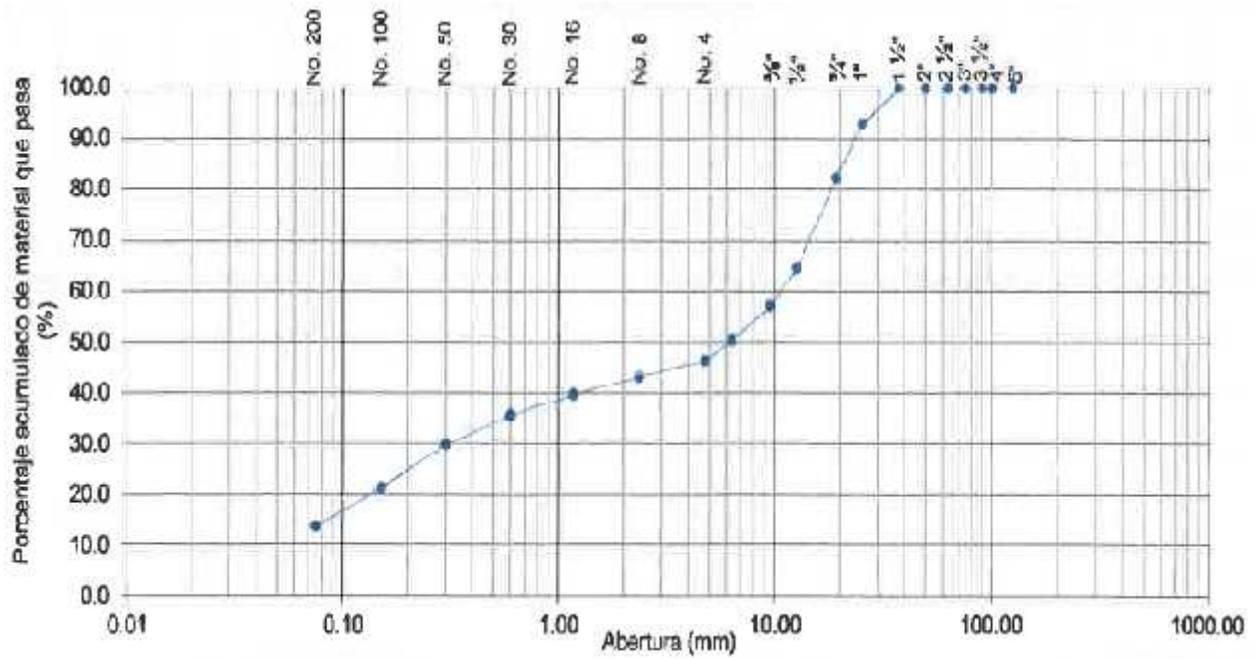


Figura 28: Curva Granulométrica

Fuente: Laboratorio MOTA-ENGIL PERÚ S.A

Tabla 35

*Límite de Consistencia de los Suelos ASTM D4318-10*

Preparación de la muestra			Equipo de ensayo utilizado			
Húmeda:	<input type="checkbox"/>	Lavado en tamiz #40	Limite Plástico:	Manual	X	
Secado al aire:	<input type="checkbox"/>	Tamizado en seco en tamiz #40		Mecánico		
Secado al horno:	<input checked="" type="checkbox"/>	Mecánicamente por tamiz #40	Limite Líquido:	Manual		
Mezcladas sobre plato de vidrio y retiradas las partículas medianas de arena				Mecánico	X	
Agua de Mezcla:			Espátula Casagrande:	Metálica	X	
Destilada	<input checked="" type="checkbox"/>	Desmineralizada		<input type="checkbox"/>	Plástica	
Otras:						

**Límite Líquido**

Número de la cápsula			34	25	23	12
Masa de la cápsula	$m_1$	(0.01g)	39.97	39.66	38.27	37.97
Masa de la cápsula + Suelo húmedo	$m_2$	(0.01g)	54.15	55.21	57.96	52.33
Masa de la cápsula + Suelo seco	$m_3$	(0.01g)	51.55	52.28	54.15	49.39
Masa del suelo seco	$w_s = m_2 - m_1$	(0.01g)	11.59	12.62	15.88	11.42
Masa del agua	$w_w = m_2 - m_3$	(0.01g)	2.59	2.94	3.81	2.94
Contenido de agua	$w = \frac{w_w}{w_s} \cdot 100$	(0.1%)	22.3	23.3	24.0	25.7
Número de golpes			36	27	23	15
Limite Líquido	(%)		24			

**Límite de Plasticidad**

Número de la cápsula			24	21
Masa de la cápsula	$m_1$	(0.01g)	13.26	13.48
Masa de la cápsula + Suelo húmedo	$m_2$	(0.01g)	19.80	19.71
Masa de la cápsula + Suelo seco	$m_3$	(0.01g)	18.79	18.75
Masa del suelo seco	$w_s = m_2 - m_1$	(0.01g)	5.53	5.27
Masa del agua	$w_w = m_2 - m_3$	(0.01g)	1.01	0.96
Contenido de agua	$w = \frac{w_w}{w_s} \cdot 100$	(0.1%)	18.2	18.1
Limite de Plasticidad	(%)		18	
Índice de Plasticidad	(%)		6	

Fuente: Laboratorio MOTA-ENGIL PERÚ S.A

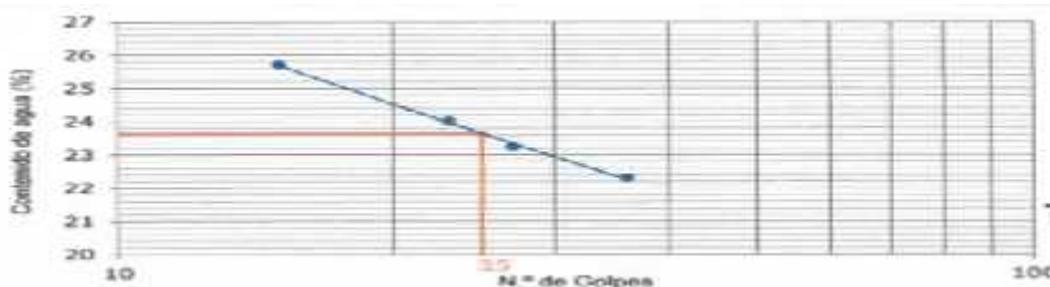


Figura 29: Límite de Consistencia de los Suelos ASTM D4318-10

Fuente: Laboratorio MOTA-ENGIL PERÚ S.A

#### 4.6.4 Diseño de mezcla con asfalto espumado.

Usualmente, la estabilización de suelos con asfalto espumado es realizada en combinación con una pequeña cantidad de filler activo (cemento portland TIPO I). En el Tabla N° 34 se muestran las tasas de aplicación sugeridas para la incorporación de filler.

Tabla 36

*Exigencias de Filler Activo Requerido*

ÍNDICE DE PLASTICIDAD < 10	ÍNDICE DE PLASTICIDAD 10 - 16	ÍNDICE DE PLASTICIDAD >16
agregar 1.0% cemento portland	agregar 1.0% de cal hidratada	tratar previamente con 2.0% de cal hidratada

Fuente: Laboratorio MOTA-ENGIL PERÚ S.A

Para el presente estudio y de acuerdo con los resultados de los ensayos de límites de consistencia obtenidos, indican que el material tiene un Índice de Plasticidad de 6%, por lo cual corresponde incorporar 1.0 % de Cemento Portland tipo I. El cemento y el agregado serán mezclados con la dosis de agua establecida, previo a la adición del asfalto espumado.

A continuación se detallan los pasos seguidos en laboratorio para la obtención de la mezcla:

- ✓ Ejecución de los ensayos de laboratorio a los materiales muestreados con la finalidad de verificar los requisitos de los agregados mencionados anteriormente.

Relación de Expansión y Vida media: Se verifico las propiedades de espumación del asfalto para la condición optima: temperatura de 180°C, presiones de 4 bares en aire y 4 bares para agua y 2.5 % de agua de espumación.

✓ Cemento Asfaltico Petroperú PEN 85-100

- Cálculo del caudal de asfalto en g/s.

$$Q_{Asf} = \frac{Q1+Q2+Q3+Q4}{4 / 5 \text{ seg.}} = \frac{533 + 512 + 550 + 517}{4 / 5 \text{ seg.}} = 108.60 \text{ g/s}$$

- Cálculo del tiempo de inyección para 108.60 g/s.

$$T = \frac{500 \text{ g}}{Q_{Asf}} = \frac{500 \text{ g}}{108.60 \text{ g/s}} = 4.60 \text{ s}$$

- Cálculo del caudal del agua en litros por hora

$$Q_{Asf} = 108.60 \text{ g/s}$$

$$Q_{Agua} = \frac{Q_{Asf} * \% \text{ Agua} * 3,600}{1000} = \frac{108.6 * 2.5\% * 3,600}{1000} = 9.77 \text{ l/h}$$

✓ Preparación de la mezcla

Porcentaje de Cemento Portland a incorporar – 1.0%

Humedad natural % - (Hnat) – 0%

Humedad óptima % - (OCH) – 5.0%

Peso húmedo Agregados (g) – 10,000

Peso seco Agregados (g) = 10,000

Peso seco Agregados (g) + Peso de Cemento Portland = 10,100

Se mezcló en seco los agregados con el cemento portland por un minuto en una mezcladora tipo Pug-Mill, a 60 r.p.m.

✓ Cálculo del contenido de humedad para mezclado e inyección.

$$W_{\text{agua (OCH)g}} = \frac{W_{\text{agreg + cem}} * (\% \text{ OCH} - \% \text{ Hnat})}{100} = \frac{10100 * (5.0\% - 0\%)}{100} = 505.0 \text{ g}$$

$$W_{\text{agua mezclado (g)}} = \frac{W_{\text{agua (OCH)g}} * (80\%)}{(1 + \% \text{ Hnat})} = \frac{505.0 * (80\%)}{1.0} = 404.0 \text{ g}$$

Se adicionó la cantidad de agua indicada en cálculo anterior mezclando el agregado y el cemento portland tipo I durante 2 minutos a una velocidad de 110 r.p.m. Para concluir el proceso se dejó reposar la mezcla por 2 minutos.

- ✓ Cálculo del tiempo de asfalto para variaciones de 0.5% desde 1.5% hasta 3.5%

Tabla 37

*Tiempos de Inyección para la Dosificación de Asfalto Espumado*

Porcentaje de asfalto a inyectarse = 1.5% – 3.5%

Porcentaje de pérdidas de asfalto = 1.0 % (Boquilla de inyección)

$$W_{Asf(g)} = \frac{W_{agreg + cem} * \% Asfalto * \% Desperdicios}{100}$$

$$T_{Inyección (s)} = \frac{W_{asf}}{Q_{Asf}}$$

% Asfalto	$W_{Asf(g)}$	$T_{Inyección (seg)} + \% Desperdicios$
1.5	151.2	1.47
2.0	201.6	1.97
2.5	252.0	2.46
3.0	302.4	2.95
3.5	352.8	3.44

Fuente: Laboratorio MOTA-ENGIL PERÚ S.A

El porcentaje de asfalto espumado a inyectarse se calculó en peso, en función del peso seco del material agregado más 1% de cemento portland utilizado en la mezcla.

Se introdujo el conducto de salida del inyector del laboratorio Wirtgen WLB10, a la ranura de ingreso de la mezcladora, se procedió a girar a las revoluciones máximas del equipo (150 r.p.m.) durante la inyección, se mantuvo girando durante 30 segundos adicionales.

✓ Ensayos de laboratorio – Compactación Marshall y Tracción Indirecta

Se procedió a retirar el material estabilizado de la mezcladora, posteriormente se elaboraron los testigos Marshall de 101.6 +/- 0.5 mm de diámetro y 87.3 +/- 1 mm de altura, con placa de base y collar de extensión.

El martillo de compactación empleado consiste en un dispositivo de acero formado por una base plana circular de 98.5 +/- 0.5 mm diámetro y un pisón deslizante de 4536 +/- 5 gr con una caída libre de 457 +/- 3 mm de 10 lbs. y 18" de altura, de acuerdo a lo establecido en el método de ensayo ASTM D5581 / ASTM D1559

Realizada la mezcla se elaboraron 06 briquetas, por cada porcentaje de asfalto inyectado, empleando la metodología de compactación Marshall, aplicando 75 golpes por cara. Para la compactación se utilizó el martillo de compactación automático

✓ Curado de la mezcla:

Luego de 24h de su fabricación se desmoldaron las 06 probetas, se midieron sus espesores y su volumen por desplazamiento en agua, para luego ser curados en horno por 72 horas a

40°C. Luego, 03 de las probetas fueron retiradas del horno para ser ensayadas a Tracción Indirecta en seco y las otras 03 fueron sumergidas en baño maría a 25°C para el curado en húmedo por 24 h más.



*Figura 30: Procesos Curado y Rotura Mediante Tracción Indirecta*

Fuente: Laboratorio MOTA-ENGIL PERÚ S.A

**Anexo 3: Resultado de Ensayos de Tracción Indirecta (Muestra N° A1189 16)**

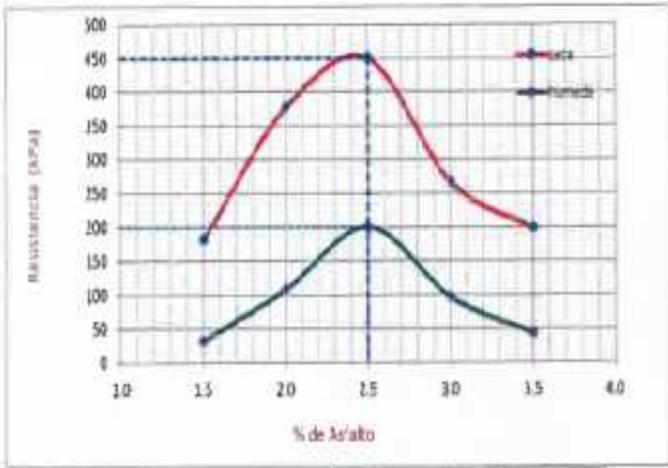
Tabla 38

Ensayo de Tracción Indirecta para Estabilizar (ASTM D 4867-AASHTO T 283)

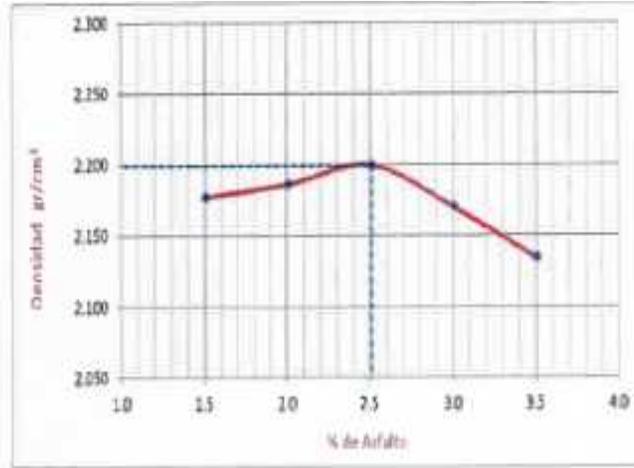
**PROGRESIVA:** 121+850      **TIPO DE CEMENTO ASFALTICO:** PEN 85/100    **% DE AGUA DE ESPUMACION:** 2.5%    **T°:**180

**%CEMENTO PORTLAND TIPO I:** 1.0%

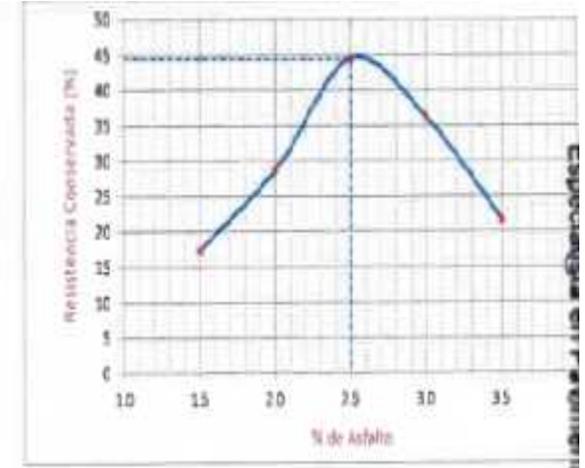
TRACCIÓN INDIRECTA															
N°	% ASFALTO INFECCIONADO	ESPESOR PROMEDIO (cm)	DIAMETRO PROMEDIO (cm)	PESOS (Gr.)				VOLUMEN (cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD (Gr/cm <sup>3</sup> )	HUMEDAD (%)	CARGA (kN)		RESISTENCIA (MPa)		RESISTENCIA CONSERVADA (%)
				AL AIRE (NUMERO)	AL AIRE (SECO)	NUMERICO	ESQ				SECA	HUMEDA	SECA	HUMEDA	
1	1.5	6.73	10.16	1192.34	1152.10	669.92	1204.99	535.07	2.153	3.493	2.017		187.792		
2		0.01	10.17	1167.24	1125.12	665.41	1183.00	517.59	2.174	3.744	1.898		174.655		
3		6.73	10.16	1191.66	1145.26	673.81	1201.66	528.05	2.174	3.790	2.485		201.305		
4		6.81	10.17	1175.62	1132.90	671.84	1189.51	518.07	2.187	3.780		0.369		33.919	
5		6.71	10.14	1192.78	1155.95	679.51	1209.51	530.00	2.181	3.186		0.302		29.257	
6		6.79	10.16	1159.66	1129.94	666.20	1182.11	515.91	2.190	2.648		0.333		35.344	
				<b>PROMEDIO</b>				<b>2.177</b>	<b>3.442</b>	<b>2.133</b>	<b>0.351</b>	<b>181.126</b>	<b>31.068</b>	<b>17</b>	
1	2.0	6.48	10.16	1147.26	1131.85	666.78	1163.19	496.41	2.280	1.361	4.032		389.881		
2		6.70	10.16	1198.64	1162.39	679.46	1215.08	535.59	2.170	3.119	3.898		359.715		
3		6.65	10.16	1199.62	1166.36	680.81	1207.96	513.89	2.107	4.540	4.023		379.056		
4		6.77	10.15	1212.24	1171.57	646.45	1224.50	578.05	2.027	3.471		1.205		111.536	
5		6.72	10.16	1198.32	1156.21	675.55	1205.78	530.23	2.181	3.642		1.170		109.385	
6		6.78	10.15	1186.57	1155.29	677.92	1202.85	514.85	2.200	4.300		1.115		103.146	
				<b>PROMEDIO</b>				<b>2.186</b>	<b>3.406</b>	<b>3.984</b>	<b>1.163</b>	<b>376.221</b>	<b>107.960</b>	<b>29</b>	
1	2.5	6.75	10.15	1201.86	1187.03	677.18	1215.66	538.48	2.204	1.249	5.038		468.132		
2		6.73	10.16	1191.62	1172.90	667.07	1201.33	534.26	2.195	1.596	4.488		417.854		
3		6.66	10.16	1187.02	1172.01	663.20	1198.99	535.79	2.187	1.332	4.920		462.889		
4		6.72	10.16	1195.90	1175.21	676.11	1206.13	530.02	2.217	1.761		2.334		217.530	
5		6.77	10.16	1193.89	1177.04	672.90	1206.59	533.69	2.205	1.432		1.930		175.854	
6		6.80	10.16	1200.84	1179.97	672.09	1211.37	536.28	2.188	1.769		2.220		204.565	
				<b>PROMEDIO</b>				<b>2.199</b>	<b>1.523</b>	<b>4.815</b>	<b>2.151</b>	<b>449.825</b>	<b>199.349</b>	<b>44</b>	
1	3.0	6.82	10.16	1182.32	1156.72	699.74	1209.07	509.33	2.271	2.213	2.998		275.444		
2		6.96	10.16	1202.36	1165.55	677.91	1221.69	543.78	2.143	3.158	2.872		258.815		
3		6.92	10.16	1198.56	1163.85	675.46	1218.94	541.48	2.149	2.979	2.902		262.771		
4		6.89	10.16	1176.32	1138.16	664.21	1191.11	526.90	2.160	3.351		0.368		90.761	
5		6.87	10.17	1193.85	1157.85	669.79	1211.48	541.69	2.137	3.109		1.056		96.494	
6		6.85	10.15	1174.51	1136.48	669.63	1186.33	526.80	2.157	3.346		1.097		95.804	
				<b>PROMEDIO</b>				<b>2.170</b>	<b>3.026</b>	<b>2.924</b>	<b>1.048</b>	<b>265.677</b>	<b>95.685</b>	<b>36</b>	
1	3.6	6.93	10.16	1214.66	1172.87	676.73	1226.60	549.87	2.133	3.588	1.931		173.346		
2		6.92	10.15	1197.21	1153.92	663.99	1200.20	636.21	2.152	2.885	2.216		200.853		
3		6.84	10.16	1201.86	1186.45	670.73	1218.26	547.53	2.130	3.036	2.357		215.846		
4		6.98	10.15	1176.38	1140.61	655.09	1194.61	539.52	2.114	3.118		0.537		48.254	
5		6.94	10.16	1195.76	1158.44	667.50	1213.02	545.52	2.124	3.222		0.403		36.385	
6		6.87	10.17	1190.88	1157.10	667.38	1206.27	538.97	2.147	2.919		0.458		41.732	
				<b>PROMEDIO</b>				<b>2.138</b>	<b>3.128</b>	<b>2.168</b>	<b>0.466</b>	<b>196.706</b>	<b>42.124</b>	<b>21</b>	



	Seca	Húmeda
Resistencia (MPa)	449.63	199.35
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	2.5	2.5



Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	2.199
% de Asfalto	2.5



Resistencia Conservada (%)	44
% de Asfalto	2.5

Fuente: Laboratorio MOTA-ENGIL PERÚ S.A

#### 4.6.5 Resultados y conclusiones.

Podemos resumir que en el anexo 03 se presentan los resultados obtenidos relativos a las resistencias a la tracción indirecta realizados a la mezcla con asfalto espumado (Tabla N° 37):

Tabla 39

##### *Resumen de Resistencia a la Tracción Indirecta*

<b>contenido (%) de asfalto espumado</b>	<b>densidad (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>resistencia tracción indirecta</b>		<b>resistencia conservada (%)</b>
		condición seca (kpa)	condición húmeda (kpa)	
1.5	2.177	181.13	31.09	17
2.0	2.186	376.22	107.96	29
2.5	2.199	449.63	199.35	44
3.0	2.170	265.68	95.69	36
3.5	2.133	196.71	42.12	21

Fuente Conalvias contrucciones SAS sucursal Perú

Evaluando los resultados obtenidos, se determina que 2,5% es el contenido óptimo de asfalto espumado a utilizar en el diseño, donde la densidad de la mezcla sería 2,199 gr/cm<sup>3</sup>, la resistencia a la tracción indirecta 449,63 kPa (para probetas secas), 199,35 kPa (para probetas húmedas); y la resistencia conservada 44%.

## **4.7 Limpieza de calzadas y bermas**

### **4.7.1 Limpieza.**

Este trabajo consiste en la remoción de todo material extraño de la calzada y de las bermas, con herramientas manuales, de tal manera que permanezca libre de obstáculos, basuras y demás objetos que caigan y/o sean arrojados en ella. El objetivo es mantener la plataforma libre de materiales sueltos, y pueden ser:

1. "Materiales ajenos a la superficie, que rápidamente contaminarían la capa de rodadura: arcillas, lodo, tierra vegetal, vegetación, excrementos animales, basuras, desechos orgánicos."
2. "Materiales que podrán dañar a los vehículos: vidrios, fierros, piedras, ramas materiales acumulados varios y cualquier obstáculo extraño, que puedan afectar la seguridad de los usuarios de la vía."

### **4.7.2 Equipos y herramientas.**

Por lo general los equipos y herramientas necesarios para la ejecución de esta actividad son: camión volquete, lampas, picos, rastrillos, escobas, carretillas, entre otros.

### **4.7.3 Procedimiento de ejecución.**

El procedimiento general es el siguiente:

Colocar señales preventivas, dispositivos de seguridad y adoptar todas las medidas necesarias que garanticen la ejecución segura de los trabajos y el ordenamiento del tránsito sin riesgos de accidentes.

El personal debe contar con los uniformes, y todo el equipo de protección personal de acuerdo con las normas establecidas vigentes sobre la materia.

Tomar fotografías de casos sobresalientes y/o representativos.

Retirar de la calzada y de las bermas todos los materiales ya mencionados en la sección 1.1 de la presente, como las basuras, piedras, sedimentos, vegetación, y todo material extraño y colocarlas en sitios de acopio. Bajo ninguna circunstancia se deberán dejar rocas o piedras sobre las bermas.

Limpiar y depositar los materiales excedentes en los DME autorizados.

Al terminar los trabajos, retirar las señales y dispositivos de seguridad.



*Figura 31: Actividades de Conservación Rutinaria*

Fuente: Manual de carreteras

## **4.8 Metodología del trabajo**

### **4. 8.1 Descripción del trabajo de campo.**

- El ingeniero responsable antes de iniciar las actividades revisará el correcto llenado de los formatos relacionados a seguridad, salud y Medio Ambiente, con los colaboradores involucrados, resaltando las condiciones de trabajo que puedan generar peligros potenciales no identificados coordinados con el supervisor de seguridad para la retroalimentación.
- Adicionalmente se coordinará con la supervisión los permisos correspondientes para trabajos de riesgo si lo hubiera, una copia del permiso de trabajo deberá permanecer en el área de trabajo y el original deberá ser entregado al supervisor de seguridad.

Tabla 40

*Equipos, Herramientas y Materiales Utilizados*

<b>N</b>	<b>Equipos</b>	<b>Herramientas</b>	<b>Materiales</b>
1	Camión cisterna de agua.	Pala	Cemento Portland.
2	Recicladora de asfalto.	Pico	Cemento Asfáltico PEN 85/100.
3	Rodillo liso Vibratorio.	Comba	Agua.
4	Rodillo Neumático Pesado.	Barretas	Material Granular.
5	Motoniveladora.	Martillo	Cinta de seguridad.
6	Camión para la distribución del cemento.	Rastrillo	Kit anti derrame.
7	Caldera regadora portátil.	Termómetro	Conos de seguridad con cinta reflectiva.
8	Nivel topográfico.		Silbatos.
9	Planta calentadora de asfalto.		Señalización de advertencia.
10	Motoniveladora.		Barrera de seguridad.

Fuente: Elaboración propia

### **Preparación de la superficie existente**

La superficie existente no necesita ser escarificada antes de la adición del material granular, este proceso se realizará durante el reciclado.

Como se mencionó anteriormente la superficie será mejorada con una base de afirmado de 15cm de espesor.

#### **4.8.2 Distribución y mezcla del material.**

- El material de afirmado se descargará cuando se compruebe que la plataforma a la cual se va a reconformar tenga un levantamiento topográfico aprobado y en el cual se defina la adición o compensación de masas
- El afirmado adicionado se extenderá en una capa de espesor variable mediante control topográfico de tal modo que garantice obtener el nivel de rasante proyectada en la posterior fase constructiva denominada estabilización de afirmado con asfalto espumado
- Durante esta actividad se tomarán precauciones constructivas durante el extendido del material, evitando los derrames de material que pudieran contaminar fuentes de agua, suelos y flora cercana al lugar.
- El material conformado a nivel de rasante de afirmado esperará la estabilización e inyección de espumado.
- No es necesaria una compactación controlada, ésta actividad se realizará en el proceso de estabilizado del afirmado con asfalto espumado.

#### 4.8.3 Equipos de trabajo.

- a) El asfalto deberá ser incorporado mediante tanques móviles, los cuales deberán estar equipados con un termómetro que indique la temperatura de su contenido. Cada tanque deberá poseer un certificado de carga que contenga la identificación del tanque, el peso neto del producto, el nombre del proveedor, número de lote y fecha de elaboración, temperatura a la cual el producto fue cargado y fecha, hora y lugar de carga.
- b) El proceso de estabilización mediante la tecnología del asfalto espumado deberá ser ejecutado con una recicladora, la cual deberá cumplir como mínimo lo siguiente:
- “Un sistema de control en base a un microprocesador, que regule la aplicación de la dosis de agua de premezclado, dosis de agua para el proceso de espumado y dosis de asfalto en función de la velocidad de avance y profundidad de corte.”
  - “Un sistema apropiado para espumar asfalto en base a cámaras individuales de expansión. Este sistema deberá ser equipado con una boquilla de ensayo capaz de producir una muestra de asfalto espumado para evaluar sus propiedades.”
  - “Un tambor de fresado pulverizador y mezclador que gire de manera ascendente en la dirección de avance y que posea herramientas de corte para la fragmentación del material que se está reciclando.”
  - “Un sistema de calefacción eléctrica que permita licuar el asfalto contenido en el sistema de asfalto espumado con el objeto de evitar obstrucciones durante las interrupciones de la operación.”
- c) El equipo de compactación deberá estar constituido por rodillos lisos vibratorios y neumáticos pesados. El rodillo liso vibratorio será de amplitud y frecuencia variable y deberá tener a lo menos un peso de 10 toneladas y el rodillo neumático tendrá un peso

mínimo de 20 toneladas, todos ellos en perfectas condiciones mecánicas, en especial a lo que se refiere a la suavidad de los arranques, paradas e inversiones de marcha.

- d) Además, se requiere al menos de una motoniveladora y cisternas de agua para mantener la humedad óptima de compactación del material.

#### **4.8.4 Proceso de estabilización.**

- La aplicación de material granular deberá ser realizada esparciendo los áridos sobre la superficie del afirmado existente como una capa de espesor uniforme antes del reciclado. El espesor de la capa a estabilizar será de 0.15 m con una tolerancia de espesor de +/- 0.03 m.
- La cantidad de agua a adicionar al material reciclado, será de acuerdo al ensayo mediante el Proctor Modificado (ASTM D-1556) o (MTC E 115-2000). El aporte de agua será controlado en terreno por un microprocesador instalado en la maquina recicladora.
- Se adicionará Cemento Portland Tipo I según diseño en el área de trabajo.
- El cemento asfáltico deberá ser incorporado en el proceso de mezclado mediante el bombeo desde tanques móviles ubicados de acuerdo al sentido de avance de la máquina recicladora. Los tanques deberán estar equipados con termómetros para asegurar que la temperatura del cemento asfáltico sea la especificada en el diseño de mezclas con asfalto espumado, 180°C, permitiéndose una variación de +/- 5°C del rango óptimo obtenido en el diseño. Si el cemento asfáltico es sobrecalentado por el rango especificado, éste no podrá ser utilizado.
- Durante el proceso de estabilización también se deberán verificar propiedades para lo cual se deberán tomar muestras durante el proceso de reciclado. La cantidad de asfalto a emplear será expresada como porcentaje del material en peso seco a reciclar y

determinada en función de los diseños de mezclas realizados en laboratorio, el cual se alineará a las condiciones reales del campo. Se deberán evitar segregaciones de material grueso o fino durante el proceso de reciclado.

- El consumo de asfalto será obtenido desde la máquina recicladora el cual se comparará con la demanda teórica según diseño.
- Cuando se conecte un nuevo tanque al equipo reciclador, se deberá revisar la temperatura del asfalto en el tanque, usando el termómetro calibrado.
- Al descargar las últimas toneladas de asfalto desde el tanque distribuidor, deberá evitarse el bloqueo del sistema de reciclado por la presencia de pequeñas partículas sólidas residuales de asfalto. Este problema deberá ser resuelto observando algún incremento inusual en la presión, lo que indicará que el filtro requiere limpieza.
- Periódicamente deberá limpiarse el equipo de trabajo, como tuberías, filtros, etc. Ya que el descuido de la maquinaria puede afectar la calidad del trabajo.

### **8.5 Compactación y perfilado**

- Inmediatamente después de la colocación de la capa estabilizada esta debe ser compactada mediante el uso de rodillos neumáticos pesados y rodillos lisos vibratorios.
- La compactación inicial se realiza con rodillos vibratorios lisos, con vibración en el modo alta amplitud – baja frecuencia. Una vez terminada la compactación inicial, la superficie se perfilará con motoniveladora para darle el perfil establecido según secciones de pavimento.
- Una vez obtenido el perfil, se procederá a la compactación secundaria, compactando la mezcla hasta que alcance una densidad mínima de 98% de la Densidad máxima compactada seca, según proctor modificado (ASTM D-1556) o (MTC E 115-2000), para

este proceso se empleará los rodillos vibratorios con vibración a baja amplitud – alta frecuencia.

- La superficie de la capa terminada deberá estar libre de laminaciones superficiales, sectores que exhiban segregación y corrugaciones o algún otro defecto que pueda afectar el comportamiento de la capa.

#### **4.9 Obtención de resultados**

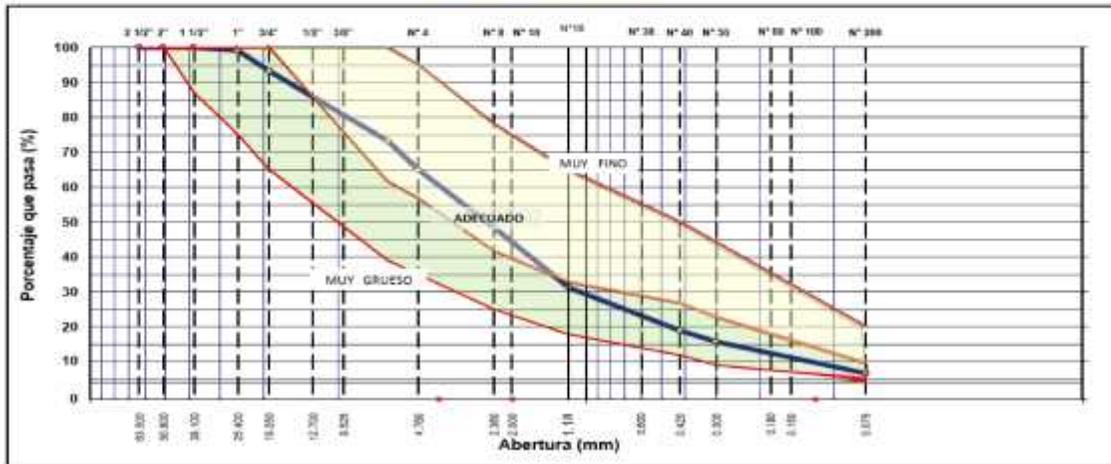
Una vez realizado la estabilización de la vía con asfalto espumado, se realizó los controles de calidad en tres tramos distintos de la vía Km 121+400, Km 122+080 y Km 122+400

Tabla 41

Análisis Granulométrico

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO						Fecha:							
MTC E107- 2000, ASTM D 422 , AASHTO T88													
PROYECTO: "MICROPAVIMENTACIÓN DEL HEAVY HAUL ROAD DE LAS BAMBAS"													
CONTRATISTA: CONALVIAS CONSTRUCCIONES S.A.S - SUCURSAL PERÚ				Fecha de Muestreo: 29/09/2016									
PROCEDENCIA: VIA ESTABILIZADA				Muestreado por:									
TRAMO: Km. 121+200 Km. 121+850				Fecha de Ensayo: 04/10/2016									
PROG. DE MUESTRA: Km. 121+400				Ensayado por:									
ESTRUCTURA: ESPUMADO				N° de Calicata: N/A									
LADO DEL CARRIL: PLATAFORMA COMPLETA				Prof. (m): 0.15									
TAMIZ	ABERT. mm.	PESO RET.	%RET. PARC.	%RET. AC.	% Q' PASA	HUSO A	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA						
3"	76.200						PESO TOTAL =	14.041.0	gr				
2 1/2"	63.500						PESO LAVADO =	13100.7	gr				
2"	50.800					100 - 100	PESO FINO =	011.9	gr				
1 1/2"	38.100				100.0	87 - 100	LÍMITE LÍQUIDO =	23	%				
1"	25.400	115.0	0.8	0.8	99.2	75 - 100	LÍMITE PLÁSTICO =	NP	%				
3/4"	19.050	815.0	5.8	6.6	93.4	65 - 100	ÍNDICE PLÁSTICO =	NP	%				
1/2"	12.700	544.0	3.9	10.5	89.5		CLASF. AASHTO =	A-2-6	(0)				
3/8"	9.525	836.0	6.0	16.4	83.6		CLASF. SUCCS =	SP - SM					
1/4"	6.350	1.440.0	10.3	26.7	73.3	39 - 02	Ensayo Malla #200	P.S. Seco	P.S. Lavado	% 200			
# 4	4.750	1.169.0	8.3	35.0	65.0	35 - 57		14041.0	13100.7	6.7			
# 8	2.380	231.1	16.5	51.5	48.5	25 - 42	% Grava =	35.0	%				
# 10	2.000	119.8	8.5	60.0	40.0		% Arena =	58.3	%				
# 15	1.180	121.0	8.6	68.7	31.3	10 - 33							
# 20	0.850	61.1	4.4	73.0	27.0		% Fino =	6.7	%				
# 30	0.600	70.0	5.0	78.0	22.0		% HUMEDAD =	P.S.H.	P.S.S.	% Humedad			
# 40	0.420	43.0	3.1	81.1	18.9	12 - 27		1116.7	1072.4	4.1%			
# 50	0.300	44.1	3.1	84.2	15.8	9 - 23	OBSERVACIONES:						
# 80	0.180	36.5	2.7	86.9	13.1		ESPUMADO DE PAVIMENTO						
# 100	0.150	30.2	2.2	89.1	10.9								
# 200	0.075	59.1	4.2	93.3	6.7	5 - 10							
# 200	FONDO	94.0	0.7	100.0	0.0								
FRACCIÓN		911.9					Coef. Uniformidad	33					
TOTAL		14.041.0					Coef. Curvatura	96.6					
Descripción suelo:	Arena pobremente gradada con limo						Pot. de Expansión	Bejo					

CURVA GRANULOMÉTRICA



Fuente: Conalvias contrucciones SAS sucursal Perú

Tabla 42

Límite Líquido, Límite Plástico e Índice de Plasticidad de los Suelos km 121 + 400

<b>LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO, E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE LOS SUELOS</b> <small>MTC F 110, 111 - 2000, ASTM D 4318, AASHTO T89, T90</small>		Fecha: 05/10/2016	
<b>PROYECTO: "MICROPAVIMENTACIÓN DEL HEAVY HAUL ROAD DE LAS BAMBAS"</b>			
CLIENTE: MMS LAS BAMBAS	Código de Muestra: IAD-ESP-002		
CONTRATISTA: CONALVIAS CONSTRUCCIONES S.A.S - SUCURSAL PERÚ	Fecha de Muestreo: 29/09/2016		
PROCEDENCIA: VIA ESTABILIZADA	Muestreado por:		
TRAMO: Km. 121+200 - Km. 121+350	Fecha de Ensayo: 01/10/2016		
PROG. DE MUESTRA: Km. 121+100	Ensayado por:		
ESTRUCTURA: ESPUMADO	Nº de Calicata: N/A		
LADO DEL CARRIL: PLATAFORMA COMPLETA	Prof. (m): 0.15		
<b>LÍMITE LÍQUIDO</b>			
Nº TARRO	20	26	16
TARRO + SUELO HÚMEDO	48.50	50.75	51.12
TARRO + SUELO SECO	44.30	46.75	46.66
AGUA	4.11	4.53	4.47
PLG DULLE TARRO	25.50	26.20	27.70
PLG DULLE SUELO SECO	18.09	18.53	18.95
% DE HÚMEDAD	22.72	23.15	23.81
Nº DE COLIFES	32	26	19
<b>LÍMITE PLÁSTICO</b>			
Nº TARRO	<b>NO PLASTICO</b>		
TARRO + SUELO HÚMEDO			
TARRO + SUELO SECO			
AGUA			
PLG DULLE TARRO			
PLG DULLE SUELO SECO			
% DE HÚMEDAD			
<b>DIAGRAMA DE FLUIDEZ</b>			
<b>CONSTANTES FÍSICAS DE LA MUESTRA</b>		<b>OBSERVACIONES</b>	
LÍMITE LÍQUIDO	23		
LÍMITE PLÁSTICO	N.P.		
ÍNDICE DE PLASTICIDAD			

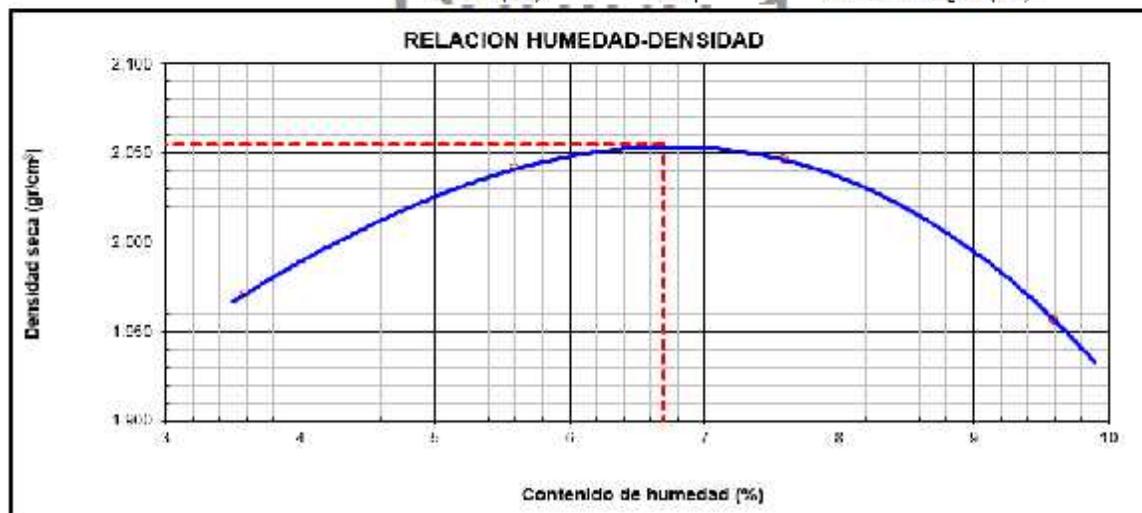
Fuente: Conalvias contrucciones SAS sucursal Perú

Tabla 43

## Proctor Modificado km 121 + 400

<b>COMPACTACIÓN DE SUELOS EN LABORATORIO UTILIZANDO UNA ENERGÍA MODIFICADA (ASTM D 1557)</b>		Fecha: 06/10/2016
<b>PROYECTO: "MICROPAVIMENTACIÓN DEL HEAVY HAUL ROAD DE LAS BAMBAS"</b>		
CONTRATISTA: CONALVIAS CONSTRUCCIONES S.A.S. (SUCURSAL PERÚ)		Fecha de Muestreo: 29/08/2016
PROCEDENCIA: VIA ESTABILIZADA		Muestreada por:
ITINERARIO: Km. 121+200 - Km. 121+850		Fecha de Ensayos: 01/10/2016
PROG. DE MUESTRA: Km. 121+400		Ensayada por:
ESTRUCTURA: LEJUMADO		Nº de Calicata: N/A
TARNO DEL CARRIL: PLATAFORMA COMPLETA		Prof. (m): 0.15

MÉTODO DE COMPACTACIÓN :	<b>C</b>				
Peso suelo + molde	g	10,600	10,833	10,930	10,811
Peso molde	g	6,364	6,364	6,364	6,364
Peso suelo húmedo compactado	g	4,236	4,469	4,566	4,447
Volumen del molde	cm <sup>3</sup>	2,074	2,074	2,074	2,074
Peso volumétrico húmedo	g/cm <sup>3</sup>	2,042	2,155	2,202	2,144
Recipiente	Nº	-	-	-	-
Peso del suelo húmedo + tara	g	1,286.0	1,345.2	1,420.8	1,425.4
Peso del suelo seco + tara	g	1,241.3	1,272.7	1,319.2	1,300.5
Tara	g				
Peso de agua	g	44.7	72.5	101.6	124.9
Peso del suelo seco	g	1,241.3	1,272.7	1,319.2	1,300.5
Contenido de agua	%	3.6	5.6	7.6	9.6
Peso volumétrico seco	g/cm <sup>3</sup>	1.971	2.041	2.046	1.968
	M.D.S. (g/cm <sup>3</sup> )	<b>2.055</b>		M.D.S. Corregida (g/cm <sup>3</sup> )	
	O.C.M. (%)	<b>6.70</b>		O.C.M. Corregida (%)	



Fuente: Conalvias construcciones SAS sucursal Perú

Tabla 44

## Ensayo de Tracción Indirecta km 121 + 400

ENSAYO DE TRACCION INDIRECTA										Fecha: 04/10/2016		
PROYECTO: "MICROPAVIMENTACIÓN DEL HEAVY HAUL ROAD DE LAS BAMBAS"												
CONTRATISTA: CONALVIAS CONSTRUCCIONES S.A.S. - SUCURSAL PERÚ								Fecha de Muestreo: 01/10/16				
PROCEDENCIA: V.A. ESTABILIZADA TRAMO: Km. 121+300 - Km. 121+050								Muestreado por:				
PROG. DE MUESTREO: Km. 121+400								Fecha de Ensayo: 04/10/16				
ESTRUCTURA: ESPIGADO								Ensayado por:				
LADO DEL CARRIL: PLATAFORMA COMPLETA								N° de Calicula: No.				
								Prof. (m): 0.15				
<b>Densidad, Resistencia - Ensayo de Tracción Indirecta y Resistencia Conservada</b>												
Ident.	N° Briqueta	% Acilato Anidado	Altura Promedio (cm)	Diámetro Promedio (cm)	Masa		Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Carga (kg)		Resistencia ITS (kPa)		Resistencia Conservada (%)
					húmeda (g)	seca (g)		Seca	Húmeda	Seca	Húmeda	
P	1	2.5	6.98	10.17	1226.7	1249.6	2.204	657.0		577.4		
P	2	2.5	6.89	10.15	1223.4	1247.6	2.238	742.0		651.9		
P	3	2.5	6.87	10.16	1226.1	1251.6	2.217	780.0		616.2		
P	4	2.5	6.75	10.17	1218.7	1233.4	2.236	330.0		300.0		
P	5	2.5	6.69	10.16	1199.4	1209.3	2.230	372.0		341.5		
P	6	2.5	6.76	10.15	1209.7	1238.1	2.261	390.0		320.3		
<b>PROMEDIO</b>							2.240	707.1	347.0	628.2	316.8	50.8
				$ITS = \frac{2 \times P}{\pi \times h \times d} \times 10.000$								
<b>PROMEDIO PISTA</b>							2.270			628.5	316.8	50.4
ITS - Resistencia a la Tracción Indirecta (kPa)								h - Altura promedio probeta (cm)				
P - Máxima Carga Aplicada (kg)								d - Diámetro de la probeta (cm)				

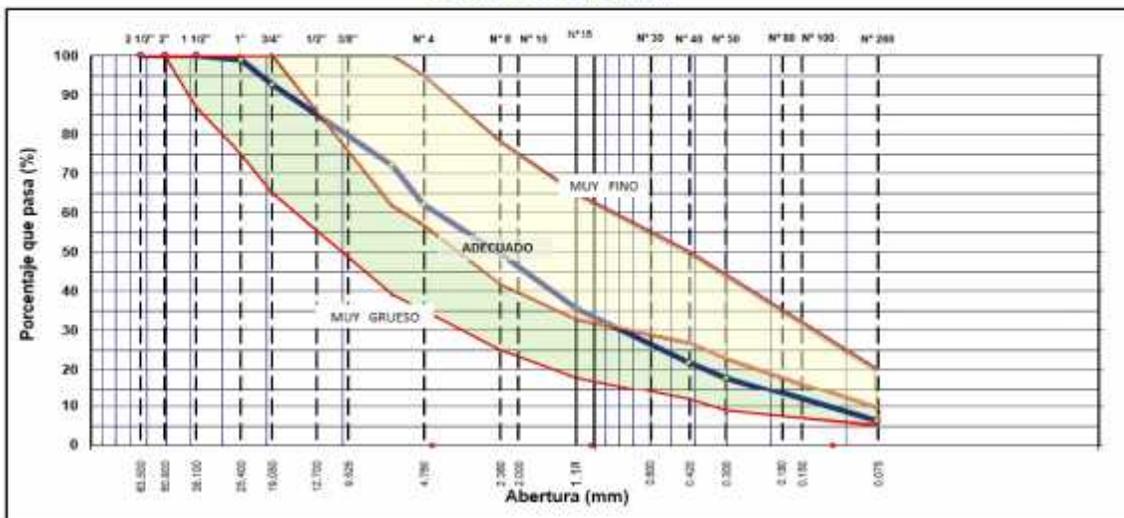
Fuente: Conalvias contrucciones SAS sucursal Perú

Tabla 45

Análisis Granulométrico km 122 + 080

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO						Fecha	06/10/2016		
MTC E107- 2000, ASTM D 422 , AASHTO T88									
PROYECTO: "MICROPAVIMENTACIÓN DEL HEAVY HAUL ROAD DE LAS BAMBAS"									
CONTRATISTA: CONALVIAS CONSTRUCCIONES S.A.S. - SUCURSAL PERÚ						Fecha de Muestreo: 04/10/2016			
PROCEDENCIA: VIA ESTABILIZADA						Muestreado por:			
TRAMO: Km. 121+850 Km. 122+250						Fecha de Ensayo: 05/10/2016			
PROG. DE MUESTRA: Km. 122+080						Ensayado por:			
ESTRUCTURA: ESPUMADO						N° de Calicata: N/A			
LADO DEL CARRIL: PLATAFORMA COMPLETA						Prof. (m): 0.15			
TAMIZ	ABERT. mm.	PESO RET.	%RET. PARC.	%RET. AC.	% Q' PASA	HUSO A	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA		
3"	75 200						PESO TOTAL = 22.622.0 gr		
2 1/2"	63 500						PESO LAVADO = 21201.1 gr		
2"	50 800					100 - 100	PESO FIJO = 700.5 gr		
1 1/2"	38 100		0.0	0.0	100.0	87 - 100	LÍMITE LÍQUIDO = 20 %		
1"	25 400	226.0	1.0	1.0	99.0	75 - 100	LÍMITE PLÁSTICO = NP %		
3/4"	19 050	1.402.0	6.2	7.2	92.8	65 - 100	ÍNDICE PLÁSTICO = NP %		
1/2"	12 700	880.0	3.8	11.0	89.0		CLASF. AASHTO = A-2-6 [0]		
3/8"	9 525	1.651.0	7.3	18.3	81.7		CLASF. SUCCS = SW - SM		
1/4"	6 350	2.172.0	9.6	27.9	72.1	39 - 62	Ensayo Malla #200 P.S. Seco. P.S. Lavado % 200		
# 4	4 750	2.263.0	10.0	37.9	62.1	35 - 57	22522.0	21201.1	6.3
# 8	2 360	142.0	12.6	50.5	49.5	25 - 42	% Grava = 37.9 %		
# 10	2 000	85.7	7.6	58.1	41.9		% Arena = 55.8 %		
# 16	1 180	71.0	6.3	64.4	35.6	18 - 33			
# 20	0 850	39.4	3.5	67.9	32.1				
# 30	0 600	70.0	6.2	74.1	25.9		% Fino = 6.3 %		
# 40	0 420	45.0	4.0	78.1	21.9	12 - 27	% HUMEDAD P.S.H. P.S.B % Humedad		
# 50	0 300	47.3	4.2	82.3	17.7	9 - 23	1116.7	1072.4	4.1%
# 80	0 180	55.5	4.9	87.2	12.8		OBSERVACIONES:		
# 100	0 150	29.3	2.6	89.8	10.2		ESPUMADO DE PAVIMENTO		
# 200	0 075	44.0	3.9	93.7	6.3	5 - 10			
# 200	FONDO	70.0	6.3	100.0	0.0				
FRACCIÓN		700.0					Coef. Uniformidad	39	
TOTAL		22.622.0					Coef. Curvatura	96.6	
Descripción suelo:	Arena bien gradada con limo						Pot. de Expansión	Bajo	

CURVA GRANULOMÉTRICA



Fuente: Conalvias contrucciones SAS sucursal Perú

Tabla 46

Límite Líquido, Límite Plástico e Índice de Plasticidad de los Suelos km 122 + 080

LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO, E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE LOS SUELOS MTC E 110, 111 - 2000, ASTM D 4318, AASHTO T89, T90			Fecha: 06/02/2016
<b>PROYECTO: "MICROPAVIMENTACIÓN DEL HEAVY HAUL ROAD DE LAS BAMBAS"</b> CONTRATISTA: CONALVIAS CONSTRUCCIONES SAS - SUCURSAL PERÚ PROCEDENCIA: VIA ESTABILIZADA TRAMO: Km. 121+850 - Km. 122+250 PROC. DE MUESTRA: Km. 122+080 ESTRUCTURA: ESTIMADO LADO DEL CARRIL: PLATAFORMA COMPLETA			Fecha de Muestreo: 04/10/2015 Muestreado por: L. Espinoza Fecha de Ensayo: 05/10/2015 Ensayado por: JOJO/1/1500 N° de Calicata: N/A Prot. (m): 0.15
LÍMITE LÍQUIDO			
# TARRO	2b	2U	1b
TARRO + SUELO HÚMEDO	45.41	44.59	44.87
TARRO + SUELO SECO	47.31	41.44	41.81
AGUA	2.10	3.08	3.01
PESO DEL TARRO	28.29	28.30	27.72
PESO DEL SUELO SECO	18.11	15.14	14.11
% DE HUMEDAD	19.24	20.34	21.33
# DE COLPES	25	22	15
LÍMITE PLÁSTICO			
# TARRO	NO PLÁSTICO		1
TARRO + SUELO HÚMEDO			
TARRO + SUELO SECO			
AGUA			
PESO DEL TARRO			
PESO DEL SUELO SECO			
% DE HUMEDAD			
DIAGRAMA DE LIQUIDEZ			
CONSTANTES FÍSICAS DE LA MUESTRA		OBSERVACIONES	
LÍMITE LÍQUIDO	20		
LÍMITE PLÁSTICO	N.P		
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	N.P		

Fuente: Conalvias contrucciones SAS sucursal Perú

Tabla 47

## Proctor Modificado km 122 + 080

<b>COMPACTACIÓN DE SUELOS EN LABORATORIO UTILIZANDO UNA ENERGÍA MODIFICADA (ASTM D 1557)</b>		Fecha	06/10/2018		
<b>PROYECTO: "MICROPAVIMENTACIÓN DEL HEAVY HAUL ROAD DE LAS BAMBAS"</b>					
CONTRATISTA:	CONALVIAS CONSTRUCCIONES S.A.S. - SUCURSAL PERÚ	Fecha de Muestreo:	04/10/2018		
PROCEDENCIA:	VIA ESTABILIZADA	Muestreado por:			
TRAMO:	Km. 121+850 - Km. 122+250	Fecha de Ensayo:	05/10/2018		
PROC. DE MUESTRA:	Km. 122+080	Ensayado por:			
ESTRUCTURA:	ESPALMADO	Nº de Calicata:	N/A		
TIPO DE CARRIL:	PLATAFORMA COMPLETA	Prof. (m):	0.15		
METODO DE COMPACTACION :	<b>C</b>				
Peso suelo + molde	g	11,404	11,509	11,617	11,606
Peso molde	g	5,066	5,066	5,066	5,066
Peso suelo húmedo compactado	g	4,539	4,643	4,761	4,820
Volumen del molde	cm <sup>3</sup>	2,131	2,131	2,131	2,131
Peso volumétrico húmedo	g/cm <sup>3</sup>	2,130	2,179	2,241	2,262
Recipiente	Nº	-	-	-	-
Peso del suelo húmedo + tara	g	527.9	642.5	754.0	678.8
Peso del suelo seco + tara	g	514.0	616.1	700.6	623.9
Tara	g				
Peso de agua	g	13.9	26.5	45.1	51.9
Peso del suelo seco	g	514.0	616.1	700.6	623.9
Contenido de agua	%	2.7	4.3	6.4	8.3
Peso volumétrico seco	g/cm <sup>3</sup>	2,074	2,005	2,109	2,079
	M.D.S. (g/cm <sup>3</sup> )	2.109			
	Q.C.U. (%)	6.70			

**RELACION HUMEDAD-DENSIDAD**

Fuente: Conalvias contrucciones SAS sucursal Perú

Tabla 48

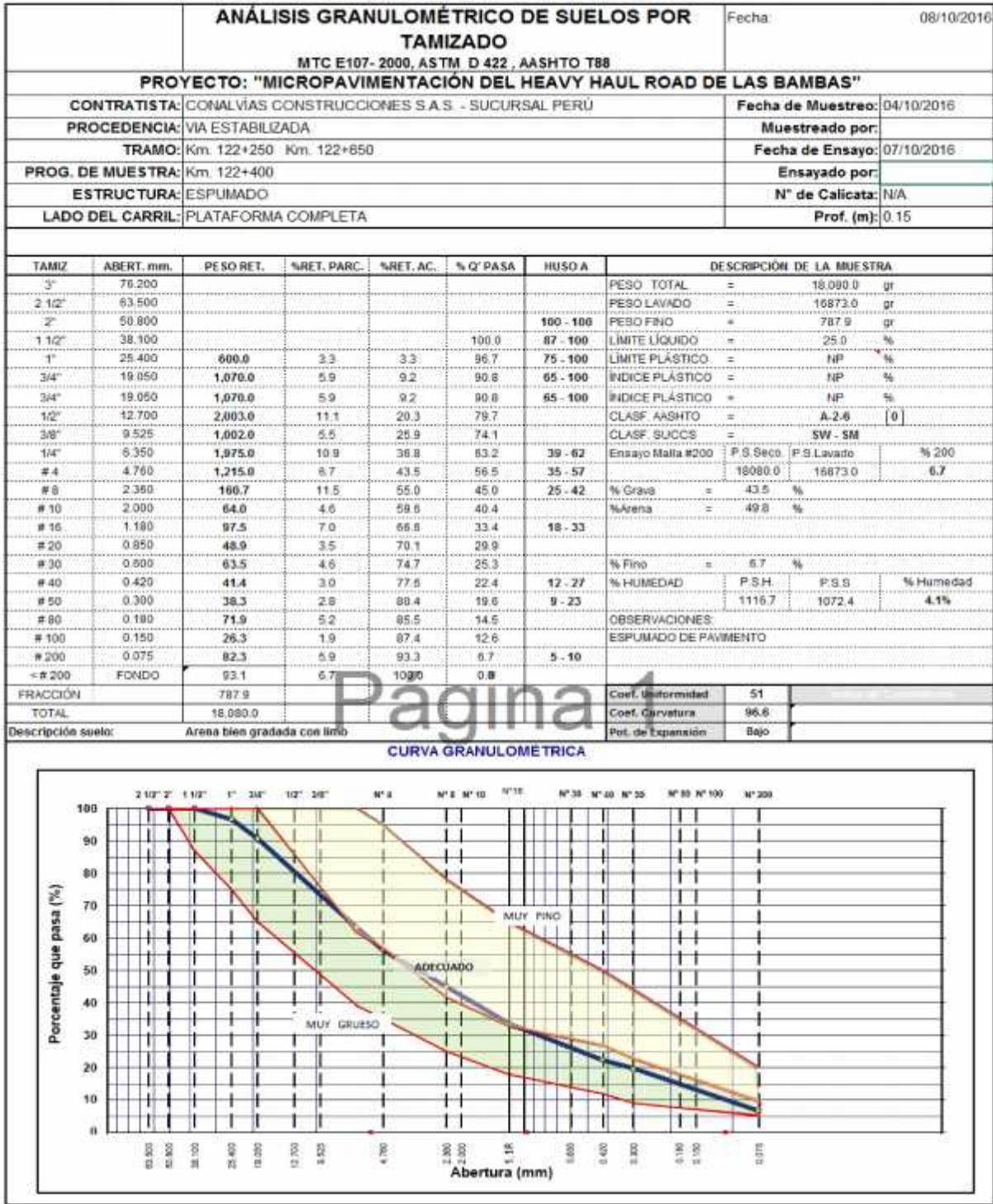
## Ensayo de Tracción Indirecta km 122 + 080

ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA												
Fecha: 08/10/2016												
<b>PROYECTO: "MICROPAVIMENTACIÓN DEL HEAVY HAUL ROAD DE LAS BAMBAS"</b>												
CONTRATISTA: CONALVIAS CONSTRUCCIONES S.A.S. - SUCURSAL PERÚ						Fecha de Muestreo: 04/10/2016						
PROCEDENCIA: VIA ESTABILIZADA						Muestreado por:						
TRAMO: Km. 121+300 Km. 122+250						Fecha de Ensayo: 07/10/2016						
PROG. DE MUESTRA: Km. 122+080						Ensayado por:						
ESTRUCTURA: ESQUEMADO						Nº de Calicata: N/A						
LADO DEL CARRIL: PLATAFORMA COMPLETA						Prof. (m): 0.15						
Densidad, Resistencia - Ensayo de Tracción Indirecta y Resistencia Compresión												
Ident.	Nº	% Asfalto	Altura Pírcola (cm)	Diámetro Pírcola (cm)	Masa húmeda (g)	Masa seca (g)	Densidad seca (g/cm³)	Carga (kg)		Resistencia ITS (kPa)		Resistencia Compresión (%)
								Secc	Húmeda	Secc	Húmeda	
	1	2.5	6.80	10.16	1251.6	1233.8	2.234	500.0		541.8		
	2	2.5	6.80	10.16	1257.6	1239.4	2.232	212.0		186.8		
	3	2.5	6.96	10.16	1268.2	1250.8	2.297	452.0		304.7		
	4	2.5	6.82	10.15	1219.7	1226.1	2.229		292.0		263.2	
	5	2.5	6.93	10.14	1258.1	1263.7	2.215		282.0		250.1	
	6	2.5	7.00	10.15	1269.8	1241.4	2.182		202.0		265.2	
					<b>PROMEDIO</b>		2.216	571.7	202.0	311.1	259.6	50.8
							$ITS = \frac{2 \times P}{\pi \times h \times d} \times 10,000$					
<b>PROMEDIO PISTA</b>								2.216	571.7	259.6	50.8	
						ITS = Resistencia a la Tracción Indirecta (kPa)			h = Altura promedio probeta (cm)			
						P = Máxima Carga Aplicada (kN)			d = Diámetro de la probeta (cm)			

Fuente: Conalvias contrucciones SAS sucursal Perú

Tabla 49

Análisis Granulométrico km 122 + 400



Fuente: Conalvias contrucciones SAS sucursal Perú.

Tabla 50

Límite Líquido, Límite Plástico e Índice de Plasticidad de los Suelos km 122 + 400

<b>LIMITE LIQUIDO, LIMITE PLASTICO, E INDICE DE PLASTICIDAD DE LOS SUELOS</b> MTC F 410, 411 2000, ASTM D 4318, AASHTO T99, T99		Fecha: 08/10/2016	
PROYECTO: "MICROPAVIMENTACIÓN DEL HEAVY HAUL ROAD DE LAS BAMBAS"			
CONTRATISTA:	CONALVIAS CONSTRUCCIONES S.A.S. - SUCURSAL PERÚ	Fecha de Muestreo:	07/10/2016
PROCEDENCIA:	MA ESTABILIZADA	Muestreado por:	
TRAMO:	Km. 122+200 - Km. 122+650	Fecha de Ensayo:	07/10/2016
PROG. DE MUESTRA:	Km. 122+400	Ensayado por:	
ESTRUCTURA:	ESTUMADO	Nº de Colicata:	N/A
LADO DEL CARRIL:	PLATAFORMA COMPLETA	Prof. (m):	0.15
<b>LÍMITE LÍQUIDO</b>			
Nº TARRI	28	7	10
TARRO + SUELO HÚMEDO	50.00	50.70	53.70
TARRO + SUELO SECO	15.00	15.50	16.00
AGUA		5.20	5.70
PESO DEL TARRO	25.00	24.00	25.00
PESO DEL SUELO SECO	15.00	15.80	17.00
% DE HUMEDAD	21.12	25.24	25.91
Nº DE GOLPES	32	24	10
<b>LÍMITE PLÁSTICO</b>			
Nº TARRI	<b>NO PLASTICO</b>		<b>1</b>
TARRO + SUELO HÚMEDO			
TARRO + SUELO SECO			
AGUA			
PESO DEL TARRO			
PESO DEL SUELO SECO			
% DE HUMEDAD			
<b>DIAGRAMA DE FLUIDEZ</b>			
<b>CONDICIONES FISICAS DE LA MUESTRA</b> LÍMITE LÍQUIDO: 25 LÍMITE PLÁSTICO: N.P. ÍNDICE DE PLASTICIDAD:		<b>CONDICIONES</b>	

Fuente: Conalvias contrucciones SAS sucursal Perú

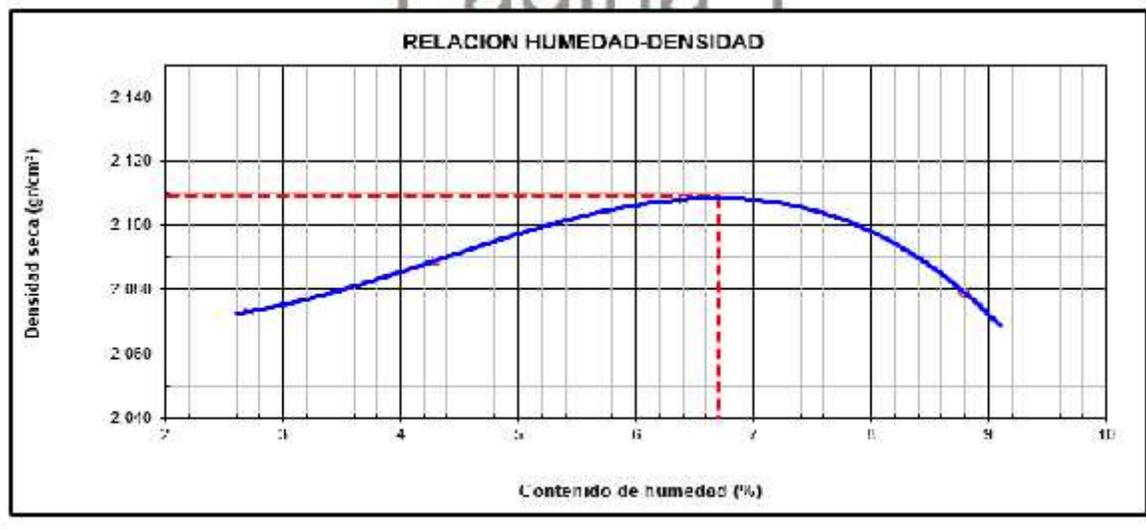
Tabla 51

## Proctor Modificado km 122 + 400

<b>COMPACTACIÓN DE SUELOS EN LABORATORIO UTILIZANDO UNA ENERGÍA MODIFICADA (ASTM D 1557)</b>		Fecha:	08/10/2016
<b>PROYECTO: "MICROPAVIMENTACIÓN DEL HEAVY HAUL ROAD DE LAS BAMBAS"</b>			
CONTRATISTA: CONALVIAS CONSTRUCCIONES S.A.S. SUCURSAL PERÚ		Fecha de Muestreo:	04/10/2016
PROCELENCIA: VÍA ESTABILIZADA		Muestreado por:	
TRAMO: Km. 122+250 - Km. 122+650		Fecha de Ensayo:	04/10/2016
PROG. DE MUESTRA: Kil. 122+400		Ensayado por:	
ESTRUCTURA: ESPUMADO		Nº de Calicata:	N/A
LADO DEL CARRIL: PLATAFORMA COMPLETA		Prof. (m):	0.15

METODO DE COMPACTACION :	<b>C</b>
--------------------------	----------

Peso suelo + molde	g	11,404	11,509	11,647	11,606
Peso molde	g	6,066	6,066	6,066	6,066
Peso suelo húmedo compactado	g	4,538	4,643	4,781	4,820
Volumen del molde	cm <sup>3</sup>	2,131	2,131	2,131	2,131
Peso volumétrico húmedo	g/cm <sup>3</sup>	2,130	2,179	2,244	2,262
Recipiente	Nº	-	-	-	-
Peso del suelo húmedo + tara	g	671.7	590.7	695.9	660.0
Peso del suelo seco + tara	g	654.0	574.0	654.0	614.0
Tara	g				
Peso de agua	g	17.7	24.7	41.9	54.0
Peso del suelo seco	g	654.0	574.0	654.0	614.0
Contenido de agua	%	2.7	4.3	6.4	8.8
Peso volumétrico seco	g/cm <sup>3</sup>	2,073	2,089	2,108	2,079
	M.D.S. (g/cm <sup>3</sup> )	2,100			
	O.C.M. (%)	6.70			



Fuente: Conalvias construcciones SAS sucursal Perú

Tabla 52

## Ensayo de Tracción Indirecta km 122 + 400

		Fecha:		08/10/2016								
<b>ENSAYO DE TRACCION INDIRECTA</b>												
<b>PROYECTO: "MICROPAVIMENTACIÓN DEL HEAVY HAUL ROAD DE LAS BAMBAS"</b>												
CONTRATISTA:	CONALVIAS CONSTRUCCIONES S.A.S. - SUCURSAL PERÚ	Fecha de Muestreo:	04/10/2016									
PROCEDENCIA:	VIA ESTABILIZADA	Muestreado por:										
TRAMO:	Km. 122+250 Km. 122+650	Fecha de Ensayo:	07/10/2016									
PROG. DE MUESTRA:	Km. 122+400	Ensayado por:										
ESTRUCTURA:	ESPUMADO	Nº de Calicata:	N/A									
LADO DEL CARRIL:	PLATAFORMA COMPLETA	Prof. (m):	0.15									
<b>Densidad, Resistencia Ensayo de Tracción Indirecta y Resistencia Conservada</b>												
Ident.	Nº	%	Altura	Diametro	Masa	Masa	Densidad	Carga		Resistencia ITS		Resistencia
			Promedio	Promedio	humeda	seca	seca	(kg)		(kPa)		Conservada
	Briqueta	Añadido	(cm)	(cm)	(g)	(g)	(g/cm³)	Seca	Húmeda	Seca	Húmeda	(%)
✓	15	2.5	7.15	10.16	1310.0	1273.1	2.202	805.9		692.3		
✓	14	2.5	6.75	10.16	1239.0	1202.8	2.193	713.8		649.4		
✓	14	2.5	6.75	10.16	1239.0	1202.8	2.193	713.8		649.4		
✓	15	2.5	6.82	10.17	1240.0	1205.0	2.197	811.7		676.2		
✓	16	2.5	6.82	10.17	1240.0	1205.0	2.197		385.0		318.2	
✓	17	2.5	6.71	10.15	1211.8	1205.0	2.211		382.0		318.1	
✓	18	2.5	6.78	10.15	1218.8	1194.5	2.185		377.0		318.7	
<b>PROMEDIO</b>							2.195	756.5	380.5	672.6	344.9	51.3
$ITS = \frac{2 \times P}{\pi \times h \times d} \times 10.000$												
<b>PROMEDIO PISTA</b>							2.195			672.6	344.9	51.3
						ITS = Resistencia a la Tracción Indirecta (kPa)	h = Altura promedio probeta (cm)					
						P = Máxima Carga Aplicada (kN)	d = Diámetro de la probeta (cm)					

Fuente: Conalvias contrucciones SAS sucursal Perú

Tabla 53

*Análisis de Precios Unitarios Estabilización de Afirmado con Asfalto Espumado*

<b>Partida</b>	<b>Estabilización de Afirmado con Asfalto Espumado (e=0.15m).</b>					
Rendimiento	m3/DI	MO.Y	220.0		Costo unitario directo	S/.
o	A	EQUIPO	00		por : m3	<b>352.18</b>
H.H.	H.M.					
<b>Código</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cuadrilla</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio S/.</b>	<b>Parcial S/.</b>
	<b>Recurso</b>					
	<b>Mano de Obra</b>					
014701001	CAPATAZ	hh	1.0000	0.0455	42.81	1.95
014701002	OPERARIO	hh	6.0000	0.2727	34.24	9.34
014701003	OFICIAL	hh	4.0000	0.1818	28.42	5.17
014701004	PEON	hh	20.000	0.9091	25.53	23.21
						<b>S/.</b>
						<b>39.66</b>
	<b>Materiales</b>					
20400009	FILLER-CEMENTO	bls		0.6212	32.64	20.28
22001009	CEMENTO ASFALTICO PEN 85/100	gln		20.5761	6.63	136.42
02320006	FLETE CEMENTO ASFALTICO	gal		20.5761	1.73	35.60
						<b>S/.</b>
						<b>192.29</b>
	<b>Equipos</b>					
33701001	HERRAMIENTAS MANUALES	%mo		5.0000	39.68	1.98
34838003	TANQUE TERMICO DE AFALTO - 10,000 GLN	hm	2.0000	0.0909	57.80	5.25
349050040	CALENTADOR DE ACEITE 1500 KW	hm	2.0000	0.0909	75.62	6.87
909701070166	MOTONIVELADORA 140 H	hm	1.0000	0.0455	295.80	13.46
909701070173	CAMION CISTENA DE 3500 - 5000 GAL	hm	1.0000	0.0455	163.20	7.43
	CISTERNA DE ASFALTO 8.000 Galones	hm	1.0000	0.0455	230.61	10.49
940101030254	RECICLADORA	hm	1.0000	0.0455	1,302.88	59.28
940102020846	RODILLO VIBRATORIO LISO 10-12 TN	hm	2.0000	0.0909	170.00	15.45
						<b>S/.</b>
						<b>120.22</b>

Fuente: Conalvias contrucciones SAS sucursal Perú

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **5.2 Conclusiones**

1. La técnica de estabilización de suelos con asfalto espumado no es una actividad complicada, debido a que se utiliza una recicladora computarizada que se encarga de las dosificaciones.
2. Los materiales utilizados en esta actividad son muy comunes en nuestro medio, por lo que no tendremos problemas de abastecimiento.
3. Se vio que el costo unitario de la estabilización de suelos con asfalto espumado a nivel de afirmado no es muy costoso, por lo que se puede utilizar esta técnica en siguientes estabilizaciones en nuestras vías de la provincia de Andahuaylas.
4. Los datos de las deflexiones obtenidas con el equipo fueron procesados y corregidos por carga a 16 KN, se aprecian deflexiones de menor magnitud que tienen promedios que van entre los 200 y 500 micrones; estos valores nos permiten evaluar los sub tramos con buen comportamiento de la estructura de pavimento existente. Los sub tramos con deflexiones altas dan indicios posibles problemas entre los que se tiene: espesores insuficientes como estructura, drenaje inadecuado, problemas por geometría de la vía (curvas de volteo o fuertes pendientes), entre otros.

5. Para obtener el mejor índice de espumación se utiliza el Cemento Asfáltico PENT 85/100.
6. Una línea importante de la investigación consistió en generar una dosificación de mezcla suelo – asfalto espumado que cumplió con los requisitos establecidos, es decir a temperatura de 180° C y el porcentaje de agua de 2.5 %, se obtiene la mejor espuma, lo cual cumple con el estándar de calidad para el diseño de mezclas.
7. De manera específica el contenido de finos es un parámetro de gran importancia y en general debe encontrarse sobre un 5% para asegurar la dispersión del asfalto espumado en la mezcla. Los ensayos de granulometría realizados en todas las muestras ensayadas evidencian que el material pasante de la malla N° 200 es superior a 5%.
8. Evaluando los resultados obtenidos, se determina que 2,5% es el contenido óptimo de asfalto espumado a utilizar en el diseño, donde la densidad de la mezcla sería 2,199 gr/cm<sup>3</sup>, la resistencia a la tracción indirecta 449,63 kPa (para probetas secas), 199,35 kPa (para probetas húmedas); y la resistencia conservada 44%.
9. Para la elaboración de la mezcla en laboratorio se estableció en 80% del contenido óptimo de humedad (OCH) para mezclar e inyectar la espuma, a este punto de humedad se le conoce como “fluff point” que es la que logra la máxima densidad suelta del agregado y es la mínima que permite la mezcla de los agregados con el asfalto espumado, luego de la dispersión se completó el 20% de contenido de humedad para alcanzar la máxima densidad de compactación.
10. De acuerdo a los resultados, se puede inferir que después de los ensayos de laboratorio, llamase caracterización de agregados para el diseño de mezclas, análisis granulométrico de agregado fino y grueso y límites de consistencia de suelos, indican que el material tiene un Índice de Plasticidad de 6%, por lo cual corresponde incorporar 1.0 % de Cemento Portland tipo I.

## 5.2 Recomendaciones

1. Se recomienda no realizar la estabilización de suelos con asfalto espumado cuando tengamos indicios de lluvias.
2. Debido a que se trabaja con altas temperaturas del asfalto, es recomendable para el personal que se encarga de esta actividad contar con todos sus implementos de protección personal, de esta manera evitaremos posibles accidentes.
3. La superficie de la sub rasante deberá estar completamente limpia antes de la intervención con el asfalto espumado, de lo contrario se tendrá que realizar una limpieza de la vía. El afirmado adicionado se extenderá en una capa de espesor variable mediante control topográfico de tal modo que garantice obtener el nivel de rasante proyectada en la posterior fase constructiva denominada estabilización de afirmado con asfalto espumado.
4. Durante la construcción de cada tramo reciclado debe llevarse, eventualmente a cabo controles al asfalto como la obtención de la Vida Media y Razón de Expansión para controlar la calidad de la espuma.
5. Es importante obtener una granulometría continua, en mejor de los casos con el tamaño del agregado menor a 2" y el contenido de finos del agregado sobre un 5%, debido a la dispersión del asfalto espumado y a la facilidad en la compactación, ya que se reducen los vacíos y por lo tanto la susceptibilidad al ingreso de agua.
6. Tener en cuenta que a bajos contenidos de agua impide la dispersión de la espuma, su trabajabilidad y compactación, mientras que el exceso de humedad incrementa el tiempo de curado, reduce la densidad y la resistencia mecánica de la mezcla.
7. Durante el proceso de estabilización también se deberán verificar propiedades para lo cual se deberán tomar muestras durante el proceso de reciclado. Adicionalmente se propone la construcción de una superficie de rodadura que permita mitigar las emisiones de polvo que causa el tránsito minero en el área de influencia de los centros poblados.

## Referencias Bibliográficas

AASHTO M 145. (n.d.). *Association of State Highway Officials*.

Atterberg, A. M. (1846-1916).

Bañon B, B. L. (2000). *Caracterización de los suelos*.

Bañon, B. L. (2000). *Manual de Carreteras*.

Borja, m. (2013). *Metodología de la Investigación científica para ingenieros*. Chiclayo.

Fernández Machado, J. M. (2010). Estudio definitivo y ejecución de la carretera Conococha – Yanacancha reciclado con asfalto espumado. Lima, Perú: Tesis Universitaria.

Fuente: Manual de carreteras, s. g.-A.-2.-M. (2013).

García, H. F. (n.d.). *Diseño de una Base Estabilizada con Asfalto Espumado*.

GEOSLOPE. (2018). *Slope stability analysis*.

Gonzales Remond, M. H. (2017). Propuesta para la mejora de los pavimentos asfálticos utilizando el método del asfalto espumado. Arequipa, Perú: Tesis Universitaria.

Instituto Mexicano del Transporte. (2016). *Evaluación de las Propiedades Mecánicas de una Base Reciclada mediante la Técnica del Asfalto Espumado*.

Matteis, A. F. (2015, agosto). Geología y Geotecnia . *estabilidad de taludes* .

Montejo, F. A. (2002). *Ingeniería de Pavimentos de Carretera*.

Paez, P. M. (2011). *Ecured*. Retrieved from Ecured:

[https://www.ecured.cu/index.php?title=Ingenier%C3%ADa\\_Geot%C3%A9cnica&oldid=1162532](https://www.ecured.cu/index.php?title=Ingenier%C3%ADa_Geot%C3%A9cnica&oldid=1162532)

Robles Diaz, R. A. (2009). Guía para diseñar la rehabilitación de una ruta mediante el uso de asfalto espumado; reciclando el pavimento asfáltico existente. Valdivia, Chile: Tesis Universitaria.

- Rojas, R. M. (2013). *Aplicación de la Tecnología del Asfalto Espumado Reciclado de Pavimentos Asfálticos*. Lima.
- Rosales Castañeda, V. A. (2011). Rehabilitación de carreteras utilizando asfalto espumado, reciclando el pavimento asfáltico existente. Tegucigalpa, Guatemala: Tesis Universitaria.
- Santamarial, M. P. (2000). Determinación de Modulos Dinámicos de Mezclas con Asfalto Espumado.
- Thenoux, Z. G. (2011). *Tecnología del Asfalto Espumado y Diseño de Mezcla*. Chile.
- Vargas. (2016). *Wordpress*. Retrieved from Wordpress:  
<https://zeppvargas.files.wordpress.com/2016/08/documentacion.pdf>
- Wirtgen Manual de Reciclado en Frío*. (n.d.).

**Anexo 4: Registro fotográfico**

**CONTEO E1 – QUEHIRE**



CONTEO E3 - VELILLE



# CENSO DE CARGA YAURI









