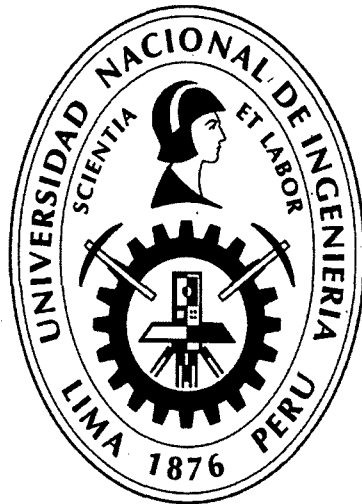


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**CRITERIOS DE ANÁLISIS Y DISEÑO DE UNA MEZCLA
ASFÁLTICA EN FRÍO CON PAVIMENTO RECICLADO Y
EMULSIÓN ASFÁLTICA**

TESIS

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO CIVIL

LUIS MIGUEL GALVÁN HUAMANÍ

Lima- Perú

2015

Digitalizado por:

**Consortio Digital del
Conocimiento MebLatam,
Hemisferio y Dalse**

**“En la pugna entre el río y la roca,
siempre triunfa el río... no porque
sea más fuerte, sino porque
persevera”**

A mi familia, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, brindándome su apoyo incondicional y compartiendo conmigo los buenos y malos momentos.

Al Dr. Teófilo Vargas, por todas las enseñanzas impartidas, que me ayudaron a lo largo de este proyecto.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por ser mi guía y darme la oportunidad de cumplir mis metas

A mis padres, Paulina Huamaní Ccencho y Salatiel Galván Huarcaya, por darme su apoyo incondicional para cumplir todas mis metas, proporcionándome la mejor educación y lecciones de vida, enseñándome que con esfuerzo, trabajo y constancia todo se consigue.

A mi hermano, Edward Galván Huamaní, y a Mercedes Gallegos Galván, por sus palabras de aliento y confianza que me ayudaron a seguir adelante y ser siempre perseverante.

A mi asesor de tesis, M. Sc. Ing. Wilfredo Gutiérrez Lazares, por su esfuerzo y orientación. Sus conocimientos y manera de trabajar han sido fundamentales para mi formación como investigador.

Al Dr. Teófilo Vargas Saavedra, por sus enseñanzas y consejos para poder iniciar y realizar este proyecto.

Al Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Civil (IIFIC) y a la empresa CONCAR, por darme la oportunidad de poder desarrollar la presente investigación.

A todas aquellas personas, que sin esperar nada a cambio, compartieron sus conocimientos y estuvieron apoyándome durante el desarrollo de este trabajo.

ÍNDICE

RESUMEN	3
LISTA DE CUADROS	4
LISTA DE FIGURAS	6
LISTA DE TABLAS	8
LISTA DE SIMBOLO Y SIGLAS	9
INTRODUCCIÓN	11
CAPÍTULO I: GENERALIDADES	13
1.1 ANTECEDENTES	13
1.2 OBJETIVOS	15
1.3 ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN	16
1.4 ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO	16
CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE	17
CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO	22
3.1 MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO	22
3.1.1 Reciclado de pavimentos	22
3.1.1.1 <i>Ensayos realizados al RAP</i>	25
3.1.1.2 <i>Especificaciones técnicas para RAP</i>	26
3.1.2 Emulsión asfáltica	27
3.1.2.1 <i>Componentes de la emulsión</i>	29
3.1.2.2 <i>Tipos de emulsiones</i>	31
3.1.2.3 <i>Nomenclatura para emulsiones asfálticas</i>	34
3.1.2.4 <i>Ensayos de laboratorio para emulsión asfáltica</i>	34
3.1.2.5 <i>Especificaciones para emulsiones asfálticas</i>	36
3.2 DISEÑO DE MEZCLA MARSHALL MODIFICADO	37
3.2.1 Metodología de diseño	38
3.2.1.1 <i>Selección y control de calidad de materiales</i>	39
3.2.1.2 <i>Contenido de ligante asfáltico tentativo</i>	39

3.2.1.3	<i>Contenido total de agua en la mezcla</i>	40
3.2.1.4	<i>Preparación de muestras</i>	41
3.2.1.5	<i>Ensayos y análisis de diseño final</i>	41
3.2.1.6	<i>Determinación del contenido óptimo de asfalto</i>	46
3.2.2	Especificación técnica	47
CAPÍTULO IV: EVALUACIÓN E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS		48
4.1	APLICACIÓN DE METODOLOGÍA PARA DISEÑO	48
4.1.1	Evaluación de componentes	48
4.1.2	Cálculo del contenido teórico de asfalto	56
4.1.3	Cálculo del contenido total de agua en la mezcla	58
4.1.4	Cálculos y resultados de ensayos en probetas de diseño	60
4.2	ANÁLISIS DE PROPIEDADES EN LA MEZCLA ASFÁLTICA	69
4.3	CÁLCULO DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO	74
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		77
5.1	CONCLUSIONES	77
5.2	RECOMENDACIONES	79
BIBLIOGRAFÍA		80
ANEXOS		83

RESUMEN

El consumo desmedido que se hace de los recursos naturales para la construcción y rehabilitación de carreteras, ha obligado a establecer sistemas de gestión y producción más eficientes, que permitan conseguir un proceso de evolución sostenible en base a técnicas de construcción que estén encaminadas a minimizar el impacto generado sobre el medio ambiente.

En los últimos años, el desarrollo de técnicas basadas en el empleo de reciclado de pavimentos y emulsiones asfálticas, ha permitido estudiar diferentes alternativas como posible solución a esta problemática.

En este contexto, surge la investigación desarrollada en la presente tesis, cuyo objetivo es analizar el diseño de una mezcla asfáltica en frío con el empleo de material procedente del reciclado de pavimento y una emulsión asfáltica.

El documento recoge los ensayos realizados durante el desarrollo de la investigación, los cuales contemplan la caracterización de la mezcla asfáltica y de cada uno de sus componentes.

Los resultados obtenidos a nivel de laboratorio ponen de manifiesto la posibilidad de reutilizar el agregado reciclado como sustituto parcial de los agregados naturales y, junto a la emulsión asfáltica, participar en la elaboración de mezclas asfálticas en frío.

LISTA DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 3.1. Ensayos para agregados	26
Cuadro 3.2 Nomenclatura para Emulsión asfáltica	34
Cuadro 3.3 Ensayos de laboratorio a Emulsión Asfáltica	35
Cuadro 3.4 Ensayos de laboratorio al asfalto residual	36
Cuadro 3.5 Ensayos para probetas con mezcla asfáltica	42
Cuadro 4.1 Caracterización del Agregado recuperado	49
Cuadro 4.2 Especificación para granulometría tipo A	50
Cuadro 4.3 Granulometría RAP y Huso Granulométrico Tipo A	50
Cuadro 4.4 Caracterización del Agregado de Cantera Huillque	51
Cuadro 4.5 Mezcla "A" 50% RAP + 50% Agregado nuevo	52
Cuadro 4.6 Mezcla "B" 60% RAP + 40% Agregado nuevo	53
Cuadro 4.7 Mezcla "C" 40% RAP + 60% Agregado nuevo	54
Cuadro 4.8 Caracterización de Emulsión asfáltica	56
Cuadro 4.9 Contenido de agua de premezcla	59
Cuadro 4.10 Contenido de agua total en la mezcla	59
Cuadro 4.11 Resultados Densidad Bulk	61
Cuadro 4.12 Resultados del contenido de humedad	62

Cuadro 4.13 Resultados % Humedad Absorbida	63
Cuadro 4.14 Resultados Densidad Seca Bulk	63
Cuadro 4.15 Resultados del Máximo total de vacíos	64
Cuadro 4.16 Resultados del % Contenido de vacíos de aire	65
Cuadro 4.17 Resultados del % Contenido de vacíos en agregado mineral	66
Cuadro 4.18 Resultados de Estabilidad y Flujo	67
Cuadro 4.19 Resultados de Estabilidad corregida	68
Cuadro 4.20 Resultados de la Pérdida de Estabilidad	69
Cuadro 4.21 Resultados Estabilidad vs. Asfalto residual (%)	71
Cuadro 4.22 Resultados Vacíos totales (%) vs. Asfalto residual (%)	72
Cuadro 4.23 Resultados Humedad absorbida (%) vs Asfalto residual (%)	73
Cuadro 4.24 Resultados Densidad Seca Bulk vs Asfalto residual (%)	74
Cuadro 4.25 Resumen de resultados variando asfalto residual (%)	75
Cuadro 4.26 Comparación con parámetros del MS-14	75
Cuadro 4.27 Diseño de mezcla con emulsión y material reciclado	76

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 Costo y energía en la producción	15
Figura 3.1 Componentes de una mezcla asfáltica	22
Figura 3.2 Fresadora de pavimento	23
Figura 3.3 Tipos de reciclado	24
Figura 3.4 Esquema de una emulsión	28
Figura 3.5 Emulsión directa, inversa o múltiple	28
Figura 3.6 Flujo de componentes en fabricación de una emulsión asfáltica	29
Figura 3.7 Composición del asfalto	30
Figura 3.8 Agente emulsionante	31
Figura 3.9 Tipo de emulsión según carga eléctrica	32
Figura 3.10 Proceso de rotura de la emulsión	33
Figura 3.11 Flujo para Diseño de mezcla	38
Figura 3.12 Probetas de mezcla asfáltica	41
Figura 3.13 Estabilidad vs Contenido de asfalto residual	43
Figura 3.14 Pérdida de Estabilidad vs asfalto residual	43
Figura 3.15 Densidad Seca Bulk vs asfalto residual	44
Figura 3.16 Humedad Absorbida vs asfalto residual	44

Figura 3.17 Vacíos totales vs asfalto residual	45
Figura 4.1 Curva granulométrica resultante de la combinación de agregados	55
Figura 4.2 Probeta para ensayo	58
Figura 4.3 Gráfica Estabilidad vs % Cont. humedad para compactación	60
Figura 4.4 Gráfica Estabilidad Húmeda y Seca vs. Contenido Asfalto (%)	69
Figura 4.5 Gráfica Pérdida Estabilidad (%) vs Asfalto Residual (%)	70
Figura 4.6 Resultado Gráfico Vacíos totales (%) vs Asfalto Residual (%)	71
Figura 4.7 Resultado Gráfica Humedad Absorbida (%) vs Asfalto Residual (%)	72
Figura 4.8 Resultado Gráfica Densidad Seca Bulk vs Asfalto residual (%)	73

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1 Porcentaje de reciclado en frío para Europa y América (2008-2009)	20
Tabla 2.2 Porcentaje de reciclado en frío para Europa y América (2010-2012)	21
Tabla 3.1 Granulometría para una base granular	27
Tabla 3.2 Especificaciones para emulsión asfáltica catiónica	37
Tabla 3.3 Parámetros de control de calidad - Mezclas emulsionadas	47
Tabla 4.1 Factor de corrección	67

LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

SÍMBOLOS

°C	:	Grados Centígrados
°F	:	Grados Fahrenheit
=	:	Igual
+	:	Más
+/-	:	Más o menos
>	:	Mayor
>=	:	Mayor o igual
<	:	Menor
<=	:	Menor o igual
N°	:	Número
%	:	Porcentaje
"	:	Pulgadas
Asf.	:	Asfalto
cm.	:	Centímetros.
d	:	Diámetro de la briqueta
etc.	:	Etcétera
G.E.	:	Gravedad Específica
gr.	:	Gramos
gr./cm ³ .	:	Gramos sobre centímetros cúbicos
h	:	Horas
In.	:	Inches (Pulgadas)
Kg.	:	Kilogramos
Kg-f	:	Kilogramo fuerza
Kg./m ³ .	:	Kilogramos sobre metros cúbicos
Kgf./cm ²	:	Kilogramos fuerza por centímetro cuadrado
Km.	:	Kilómetro
Lb.	:	Libras
m ²	:	Metros cuadrados
m ³ .	:	Metros cúbicos
Máx.	:	Máximo
Mín.	:	Mínimo

min.	:	Minutos
mm.	:	milímetros
mm./min.	:	Milímetro por minuto
m.s.n.m.	:	Metros sobre el nivel del mar
N.	:	Newtons
Prom.	:	Promedio
Pulg.	:	Pulgadas
s	:	Segundos
Ssf.	:	Segundos Saybolt Furol
T°	:	Temperatura
TM	:	Tamaño máximo
TMN	:	Tamaño máximo nominal
µm	:	Micrómetro
VS.	:	Versus

SIGLAS

AASHTO	:	American Association of State Highway and Transportation Officials.
ARRA	:	Asphalt Recycling & Reclaiming Association.
ASTM	:	American Society for Testing and Materials.
CILA	:	Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto
CONCAR	:	Concesiones de Carreteras
EAPA	:	Asociación Europa de Pavimentos asfálticos
MS-14	:	Manual Series 14 del Instituto del Asfalto
MTC	:	Ministerio de Transporte y Comunicaciones
NTP	:	Norma Técnica Peruana
ODOT	:	Oregon Department of Transportation (Departamento de transportes de Oregon)
RAP	:	Reclaimed Asphalt Pavement
SDHT	:	Departamento de carreteras y transportes de Saskatchewan, Canadá.

INTRODUCCIÓN

Una de las actividades que mayor cantidad de residuos genera es la construcción, dentro del cual se encuentra el rubro de carreteras.

En la búsqueda de alternativas para reducir este impacto ambiental, han ido generándose nuevos conceptos y principios dentro de un marco denominado "sostenibilidad", cuyo principio de las "3 erres" (Reducir, Reciclar y Reutilizar), ha contribuido a reducir la producción y acumulación de residuos mediante tecnologías constructivas que emplean materiales reciclados.

Las técnicas de reciclado se desarrollaron a partir de la tecnología existente en el campo de mezclas asfálticas. Cuando la técnica de reciclado se aplica a mezclas asfálticas en frío, campo a investigar desde un punto de vista medioambiental, los beneficios son mucho mayores que las técnicas de reciclado en caliente.

Por ello, el objetivo principal de la tesis es analizar el diseño de una mezcla asfáltica en frío, empleando pavimento reciclado y emulsión asfáltica como componentes de la mezcla.

En el Capítulo I se mencionan antecedentes que han dado lugar al desarrollo de la tesis, los objetivos que se busca alcanzar al realizar la investigación y la organización del trabajo de laboratorio para lograrlos.

En el capítulo II se realiza un estudio del estado del arte sobre lo que ha sido los inicios y el desarrollo a lo largo de los años de esta técnica como parte de una gestión de residuos en algunos países.

Para el capítulo III se desarrolla el marco teórico, en el cual se desarrollan los fundamentos básicos que deben conocerse para el entendimiento de los temas que abarca el estudio, y se explica la metodología de diseño seguida para la investigación, especificando cada una de las etapas a desarrollar y los ensayos a realizar para la consecución de los objetivos propuestos. En primer lugar se detallarán los pasos para la caracterización de los materiales para su incorporación en la mezcla. Posteriormente, se describirá el proceso de diseño de la mezcla asfáltica.

Conociendo la metodología de diseño, en el capítulo IV se desarrollan y analizan los resultados obtenidos en base a ensayos realizados al material reciclado, a la emulsión asfáltica y a la mezcla asfáltica final, haciendo uso del diseño de mezcla Marshall modificado. En base a estos resultados, podrá valorarse si es posible o no el cumplimiento de los objetivos propuestos en la tesis.

Las conclusiones obtenidas en la investigación se exponen en el capítulo V y se proponen recomendaciones para el manejo de los resultados obtenidos y proyectos futuros.

CAPÍTULO I: GENERALIDADES

1.1. ANTECEDENTES

En los últimos años, el creciente deterioro del medio ambiente ha llevado a convertir el tema de la preservación de los recursos naturales en una preocupación general de todos los sectores productivos del mundo. El rubro de transportes ha desarrollado técnicas para la reutilización de residuos, producto de la eliminación de pavimentos asfálticos por construcción o rehabilitación. El material retirado de los pavimentos asfálticos puede ser reciclado y reutilizado, bajo ciertas condiciones.

El reciclado de pavimentos asfálticos se inicia en los Estados Unidos desde 1915 y no es hasta principios de los años 70, donde toma importancia debido a la crisis del petróleo, generando aumento de precios y al mayor interés por la conservación de energía y medio ambiente. Estados Unidos pasó de 50 mil toneladas de mezcla reciclada en el año 1975 a 25 millones toneladas en 1980. Canadá estableció una serie de especificaciones y el Ministerio de Transportes de Ontario definió parámetros a cumplir en las mezclas recicladas. La técnica de reciclado llegó a Europa a fines del 70. Numerosos países europeos, como Alemania, Austria, Holanda y Dinamarca, utilizaron con regularidad las mezclas recicladas con un comportamiento equivalente a mezclas convencionales. España presentó, a principios de los 80, interés por el reciclado e impulso, en los años 90, el reciclado in situ en frío.

Se observa que, en obras a rehabilitar, se presentan grandes problemas que están vinculados a los impactos negativos al medio ambiente que generan las soluciones planteadas para la rehabilitación del pavimento y a la administración y manejo de los excedentes, producto de la remoción de capas.

Otro punto son las mezclas asfálticas en caliente empleadas como solución en los distintos proyectos y técnicas de rehabilitación. Las mezclas asfálticas en caliente, otorgan al pavimento propiedades mecánicas y de adhesión, sin embargo cuando las temperaturas de mezcla y calentamiento de asfalto se incrementan, los pavimentos se exponen a problemas de fisuramiento, deformaciones, y otras fallas, mucho antes de lo previsto; estos problemas requerirán entonces nuevos trabajos de reconstrucción o rehabilitación.

En la mayoría de los casos se deberán realizar trabajos de remoción de la carpeta o de tratamiento de fisuras, bacheos, tratamientos superficiales, slurry seal, entre otras, ocasionando malestares a los usuarios y a la transitabilidad de la vía. Al intervenir las estructuras de pavimentos mediante el uso de mezclas asfálticas en caliente, en la mayoría de los casos ya no se logran satisfacer los requerimientos técnicos y ambientales necesarios para el correcto desempeño del pavimento. El empleo de las mezclas asfálticas en caliente no logra corregir la aparición de fallas prematuras y genera problemas ambientales y de bajos rendimientos para la rehabilitación. En cuanto a los problemas ambientales, se presentan elementos nocivos, como el kerosene que se utiliza para rebajar los asfaltos y que en su proceso de fabricación se liberan al medio ambiente, con la consecuente contaminación. A todo esto se le debe sumar los problemas del elevado uso de energía para la producción de los asfaltos en caliente, la acumulación de desperdicios y botaderos para el material que es retirado del pavimento, con el correspondiente perjuicio técnico y económico para el sector transportes.

Desde el punto de vista ambiental y de aprovechamiento de materiales, las técnicas de reciclado son altamente interesantes y beneficiosas, sin embargo, en el Perú, se tiene la necesidad de hacer estudios de alguna metodología de diseño empleando el material reciclado del pavimento asfáltico ya que están poco desarrolladas. La mayoría de proyectos que utilizan técnicas de reciclado de pavimentos exigen que las mezclas cumplan con las mismas especificaciones que se piden a las mezclas convencionales y que presenten un comportamiento similar en campo. Para este caso sería necesario investigar métodos específicos para el diseño y control de calidad de los pavimentos que contemplan este tipo de mezclas y tomen en cuenta, para el diseño, factores que pueden ser muy importantes en el comportamiento, tales como, la vida útil que se puede alcanzar, el posible envejecimiento prematuro del ligante asfáltico, la excesiva rigidez de la mezcla que se puede presentar debido al endurecimiento del ligante envejecido que contiene el material reciclado, entre otros.

Se decidió realizar una serie de estudios en relación a la mezcla asfáltica en frío, la cual es una alternativa en contraposición al empleo de mezclas asfálticas en caliente y se puede emplear en condiciones ambientales diversas. Se emplea una gran variedad de agregados y de emulsiones asfálticas que tiene

características diferentes en sus propiedades reológicas, en comparación a un asfalto convencional. Además de la mejora de propiedades, se aprecia menor costo del proceso y menos impacto ambiental. Este tipo de tecnología reduce el consumo energético durante su producción y aplicación, sin afectar al entorno por liberación de elementos nocivos al medio ambiente. Las contribuciones a nivel ambiental son mayores cuando se producen mezclas con material reciclado, pues se está reutilizando un material que normalmente, en el país, se considera un desecho. La reducción de costos y la escasa energía necesaria para su producción, se puede observar en la figura.

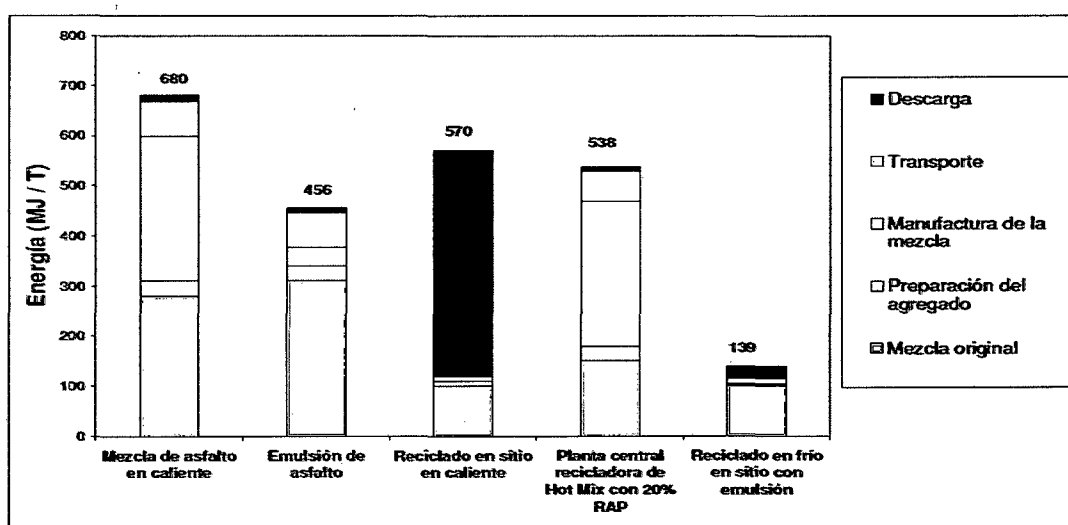


Figura N° 1.1 Costo y energía en la producción

Fuente: HERNÁNDEZ ZAMORA, GABRIEL. "Diversificación en el uso de emulsiones de asfalto modificado (PME) para rehabilitación de pavimentos". XVI Congreso Ibero – Latinoamericano del Asfalto. Río de Janeiro – Brasil, 2011.

Ante la falta de normativas de mezclas recicladas, es importante profundizar en el conocimiento de esta tecnología, generando metodología de diseño siguiendo recomendaciones técnicas existentes, las cuales requieren ser contrastadas con ensayos a escala real. Con los ensayos de laboratorio se logra la caracterización de la mezcla, tanto para los componentes, como para la combinación de éstos.

1.2. OBJETIVOS

Dada la importancia de realizar estudios sobre las características finales de una mezcla asfáltica al ser elaboradas incorporando agregado reciclado y emulsión asfáltica, el objetivo general de la presente tesis es determinar criterios de

análisis y diseño del comportamiento de una mezcla asfáltica en frío, producida con pavimento reciclado y emulsión asfáltica.

1.3 ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN

Para poder alcanzar el objetivo general de la investigación, se deben cumplir una serie de objetivos específicos que se describen a continuación:

- ✓ Evaluación de emulsión asfáltica en el reciclado de pavimentos en frío.
- ✓ Análisis comparativo del comportamiento de mezclas recicladas y mezcla convencional.
- ✓ Diseño de una mezcla asfáltica en frío de pavimento reciclado con emulsión.

1.4 ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO

Este trabajo busca aportar información que ayude a impulsar el empleo de emulsión asfáltica en la elaboración de mezcla en frío con pavimento reciclado, lo cual podría evitar problemas al medio ambiente mediante la administración adecuada de los excedentes, y apoyar el desarrollo de esta línea de investigación, logrando ampliar el conocimiento de la técnica para su aplicación en un mayor número de casos.

La investigación se desarrolla mediante un programa de laboratorio en el cual se trabajará con material reciclado. Se realizarán estudios del material con ayuda del Laboratorio de Mecánica de Suelos y la Planta de emulsión asfáltica (PEA) de la empresa Concar. El material reciclado será ensayado para obtener su granulometría. Posteriormente se realiza el lavado del asfalto de la mezcla reciclada. Se estudiará las propiedades de cada componente por separado. Teniendo esta información se procede a realizar el diseño de mezcla reciclada en frío, en el cual calculamos un contenido teórico de emulsión. Se prepara varias porciones idénticas de muestras, mezclándolas con diferentes cantidades de emulsión. Para el desarrollo de esta última etapa, las muestras serán preparadas en probetas que serán sometidas a diferentes ensayos hasta obtener el diseño definitivo de la mezcla asfáltica. Los ensayos realizados se utilizan para el diseño y control de calidad de mezclas convencionales, tal es el caso del Marshall. Los resultados de los ensayos son graficados respecto al contenido asfáltico de cada mezcla. El contenido que permite lograr las propiedades deseadas es considerado el contenido óptimo de emulsión.

CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE

La técnica se inició durante la década de 1980, tenía como principales impulsores la necesidad de conservación del medio ambiente y el problema energético, el cual ocasionaba aumento en los precios de productos derivados del petróleo. Las investigaciones buscaban demostrar la viabilidad de la técnica y el ahorro de recursos que se lograba con un proceso de construcción ambientalmente responsable.

EEUU empezó su proyecto de investigación en las ciudades de Oregón y Nuevo México. El Departamento de Transportes de Oregón (ODOT) realizó en 1984 su primer proyecto sobre la Región N° 4, lugar donde las temperaturas extremas y la oxidación del asfalto eran un serio problema para los pavimentos. Los resultados de la evaluación a 52 proyectos indicaron que 47 tenían un desempeño bueno o muy bueno y, de este modo, decidieron utilizar esos datos para la revisión del diseño de mezcla y las operaciones de construcción. Para 1990, más de 450 millas de mezcla reciclada fueron colocadas en Oregón. En Nuevo México, evaluaron el desempeño de 45 proyectos construidos en 1984 y concluyeron que más del 90% de pavimentos se encontraban en excelentes condiciones. En Indiana la evaluación de ciertas vías, un año después de su construcción (1986), indicaba un mejor desempeño para secciones con mezcla reciclada en frío en comparación con un pavimento rehabilitado de manera convencional.

Para 1985, la Unión Europea impulsa proyectos donde se desarrolle las técnicas de reciclado, para de esta manera elaborar especificaciones técnicas en base a los resultados. En la República Checa iniciaron trabajos desde 1989, encontrando obstáculos iniciales como la falta de inversión para nuevos estudios y una política de Estado orientada al mantenimiento de carreteras con técnicas tradicionales. Para los primeros años de los 90, España inicia la aplicación de la técnica en la rehabilitación de pavimentos, logrando emplear 2.4 millones de metros cuadrados de superficie reciclada. Se empleó en la provincia de Huesca, primero en 1 Km experimental de pavimento y luego se extendió a otros 45 Km que se realizarían en 1993 con éxito, resultando una técnica apropiada para iniciar la conservación de caminos agrícolas. Entre los años de 1990 y 1998, España recicló alrededor de 5 millones de metros cuadrados y para el 2001 aprobaron una Orden Circular 8/2001 sobre normativa para reciclado de

pavimentos el cual, en su artículo 20, desarrolla el Reciclado de pavimentos con emulsión. En Portugal los trabajos datan de 1998 teniendo como principal obra la vía IP8, donde rehabilitaron 126 mil metros cuadrados de pavimento, extendidos en 17.8 km de la carretera que va del distrito de Serpa a V.V. Ficalho. A nivel de toda Europa, los proyectos de investigación más importantes fueron Paramix (2001), Score (2002) y Fénix (2007).

Entre los países asiáticos se encuentra Malasia como el primero en usar el reciclado en frío en el año 1993, seguido por Japón el mismo año y en 1995 por Tailandia. La tecnología se extendió a Indonesia en 1997, y para 1998 a las Filipinas y China. Gracias a la experiencia que para ese momento ya existía en el mundo, los procesos de reciclado tuvieron rápida aceptación y se justificaban en términos de ahorro de costos y beneficios ambientales.

En la década de 1990, Brasil inicia con la investigación del reciclado en frío in situ, incorporando emulsiones para homogenizar mezclas. El primer tramo se realizó en noviembre de 1993 en la carretera BR-393/RJ, sección entre Além Paraíba y Sapucaia. En Canadá, el Departamento de Carreteras y Transportes de Saskatchewan (SDHT) era responsable del mantenimiento de 10 mil km de carretera de bajo volumen por eso, en 1999, emprendieron proyectos de reciclado de pavimento empleando la emulsión asfáltica cuyo objetivo era evaluar la estabilización de las mezclas. Para el caso argentino, las rutas de la red primaria fueron concesionadas (aproximadamente 13 mil Km) y, como consecuencia de ello, las administraciones consideraron alargar el ciclo de vida útil de los materiales de los pavimentos como nueva alternativa de rehabilitación. El 2001 realizaron el reciclado del pavimento en la Ruta Provincial 5 de la provincia de Santa Cruz y observaron con los resultados obtenidos que era posible el aumento en la producción, ya que lograron producir unas 200 ton/hora frente a los sistemas tradicionales con producción de 50 ton/hora. Los estudios en Chile se realizaron desde el año 1999, resaltando artículos publicados por Guillermo Thenoux Z., catedrático de la Pontificia Universidad Católica de Chile, en la Revista Ingeniería de la Construcción del mismo país. Fueron tres artículos donde los dos primeros detallaron el marco teórico de la técnica y el tercero presentó resultados de un estudio enfocado a investigar en laboratorio una metodología de dosificación de mezcla reciclada con emulsión. El material reciclado utilizado fue del pavimento existente en el aeropuerto internacional de Santiago de Chile. Para el 2007, el Ministerio de la Construcción en Cuba

adquiere maquinaria para el reciclado en frío e inicia el proyecto de aplicación en la carretera Holguín-Guardalavaca. En julio del 2008 se realizaron las pruebas de reciclado y en octubre de ese año iniciaron oficialmente sus trabajos.

Durante la década del 90, un 70% de la Red Vial Pavimentada del Perú fue reconstruida, rehabilitada y/o mejorada con periodos de diseño de 10 años. Posteriormente, la mayoría de ellos solo han recibido mantenimiento de tipo rutinario. Por esta razón, el Ministerio de Transportes y Comunicaciones realizó un Plan de Desarrollo Vial denominado "Proyecto Perú", en el cual, impulsaban el uso de nuevas tecnologías como el reciclado de pavimentos para caminos de acuerdo al volumen de tránsito. La alternativa de reciclado con emulsión asfáltica fue ejecutada en la obra de conservación Vial de la carretera Puno – Desaguadero, Tramo: Puno – llave. En la ejecución de estos trabajos emplearon el método Marshall Modificado – Método Illinois para el diseño.

En la tabla 2.1 y tabla 2.2 se observan los datos recogidos por la Asociación Europea de Pavimentos Asfálticas (EAPA) durante los años del 2008 al 2012 donde se indican porcentajes de empleo de reciclado de pavimentos en frío para diferentes países.

Tabla 2.1 Porcentaje de reciclado en frío para Europa y América (2008-2009)

País	2008		2009	
	Reciclado asfáltico disponible (miles de ton.)	% empleado para reciclado en frío	Reciclado asfáltico disponible (miles de ton.)	% empleado para reciclado en frío
Austria	350		400	5
República Checa	1500	30	1500	30
Croacia			13	100
Francia	6500	< 2	7053	
Hungría	27560	18	3	
Luxemburgo				
Holanda	3500	0.5	4500	
Noruega	720	10	763	12
Portugal				
Rumania	18	10	13	15
Eslovaquia				
Eslovenia	25.6	49	15.36	50
España	1150	18	1850	15
Suecia	1000	10	1000	10
Suiza	1100	50	1200	50
Turquía	1168		1069.6	
Estados Unidos	100000	95 (entre reciclado en caliente y en frío)		
Canadá				
Venezuela	345	100		

Fuente: Asphalt in Figures 2008-2009, EAPA

Tabla 2.2 Porcentaje de reciclado en frío para Europa y América (2010-2012)

País	2010		2011		2012	
	Reciclado asfáltico disponible (miles de ton.)	% empleado para reciclado en frío	Reciclado asfáltico disponible (miles de ton.)	% empleado para reciclado en frío	Reciclado asfáltico disponible (miles de ton.)	% empleado para reciclado en frío
Austria	500	8	550	5	750	3
República Checa	1650	35	1500	35	1400	30
Croacia	75	35				
Francia	7080		7080		6500	
Hungría	44.58	15	64.882		100.777	7
Luxemburgo	200		190	5	210	5
Holanda	4000		4000	15	4000	15
Noruega	750	12	726		787	2.9
Portugal	2.1	5	2	5		
Rumania	40	20	13	15	20	30
Eslovaquia					33	5
Eslovenia	26.16	20	10	20	10	20
España	1590	16	1350	10	368	11
Suecia	1100	5	1100	5	1000	5
Suiza	1450	18	1750	19	1575	17
Turquía	2420		2809		3816	5
Estados Unidos	66500		71400		64000	
Canadá	4000		4000		3500	3

Fuente: Asphalt in Figures 2010-2012, EAPA.

CAPÍTULO III : MARCO TEÓRICO

3.1. MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO

Una mezcla asfáltica es el producto que se obtiene de incorporar y distribuir uniformemente un ligante asfáltico sobre un material pétreo en proporciones determinadas de acuerdo a un diseño. Estas proporciones determinan las propiedades físicas de la mezcla resultante y se emplean ensayos de laboratorio para lograr la caracterización, tanto para los componentes como para la combinación de éstos. En la Figura 3.1 se visualizan los componentes de una mezcla asfáltica.

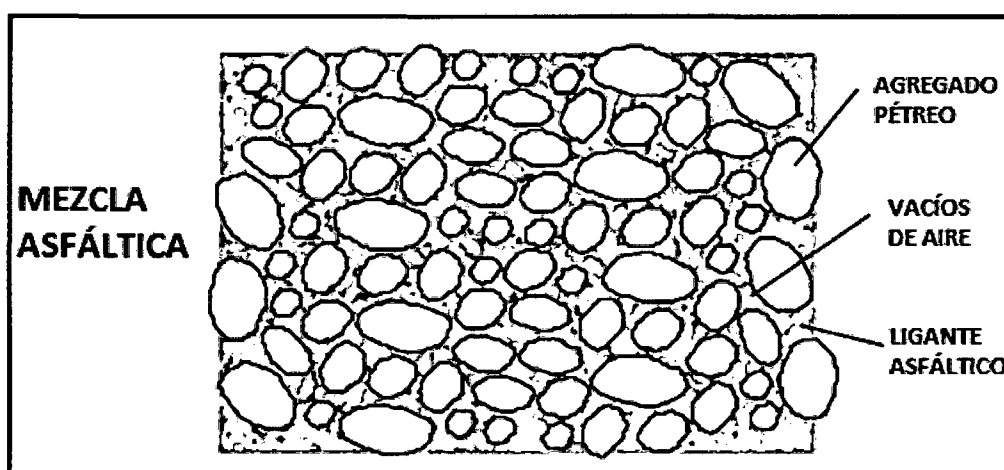


Figura 3.1 Componentes de una mezcla asfáltica

Fuente: HUAMÁN G., NÉSTOR. "Manual Básico de Pavimentos Asfálticos"- Perú, 2011.

Un factor importante a conocer es el valor de la temperatura, que depende del empleo final de la mezcla en obra. De acuerdo a este parámetro, se producen las mezclas en caliente o mezclas en frío. Las mezclas asfálticas en frío son aquellas que se colocan en obra a una temperatura ambiente, empleando una gran variedad de agregados, de canteras o material reciclado, y emulsiones asfálticas.

3.1.1. Reciclado de Pavimentos

Es una técnica que se presenta como alternativa de rehabilitación para pavimentos asfálticos deteriorados. Consiste en la reutilización del material de un pavimento que, al presentar daños funcionales o estructurales, es reciclado y

sometido a un procesamiento y tratamiento, sin aplicación de calor, para producir una capa de pavimento restaurado.

El pavimento puede ser retirado por un equipo fresador, como se observa en la Figura 3.2, el cual disgrega el material de modo tal que pueda ser reutilizado en el mismo lugar o bien transportado a una planta para ser utilizado o almacenado para otro proyecto vial. Cuando no se dispone de una fresadora, el pavimento puede ser removido con métodos convencionales, transportado a una planta trituradora/seleccionadora y utilizarse en la preparación de mezclas en planta.

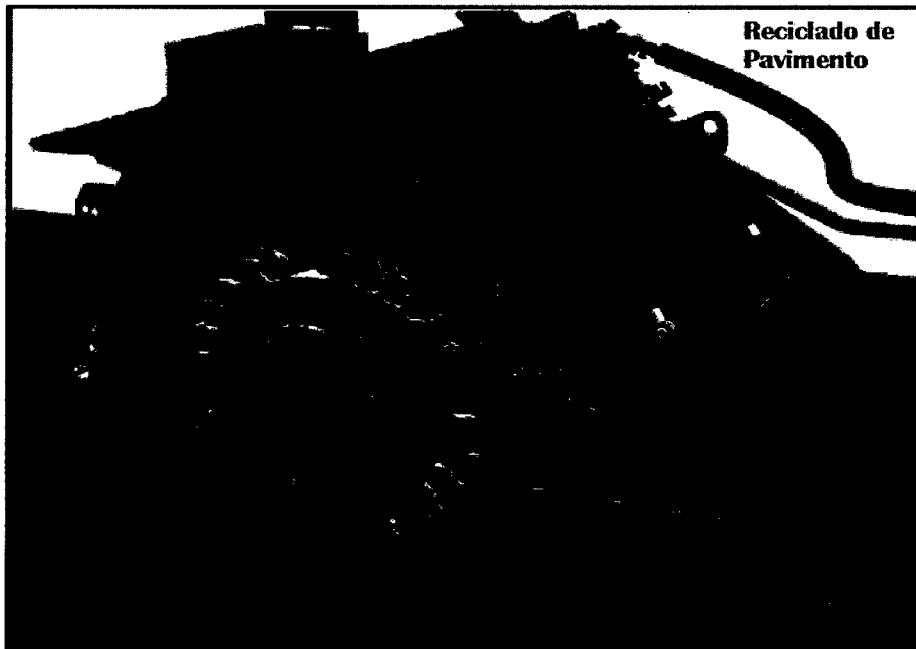


Figura 3.2 Fresadora de pavimento

Fuente: WIRTGEN GMBH. “Wirtgen Manual de Reciclado en Frío”. Alemania, 2010.

El proceso y tratamiento del reciclado se logra mediante el mezclado del pavimento recuperado, RAP en sus siglas en inglés por Reclaimed Asphalt Pavement, con asfalto y agregado nuevo. Como resultado se dan diversos tipos de reciclado de pavimentos en frío, establecidos de acuerdo a ciertos elementos como el lugar de realización del tratamiento, la adición o no de agregado nuevo, la profundidad de fresado del pavimento y el uso de algún ligante asfáltico. En la Figura 3.3 se señalan los aspectos que dan origen a las diferentes formas de reciclado.

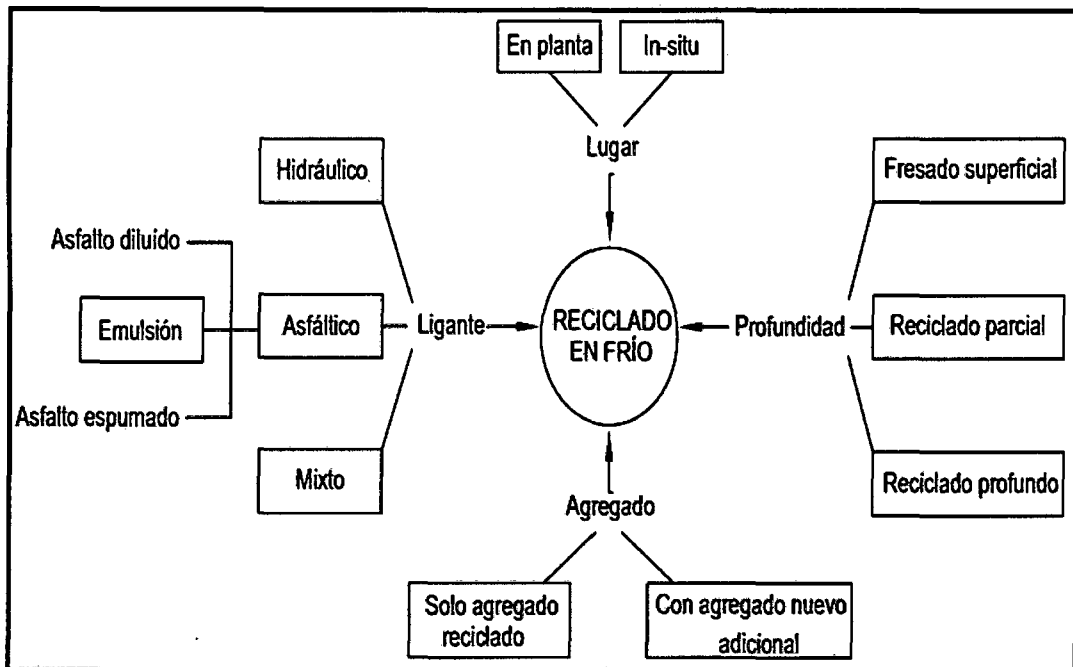


Figura 3.3 Tipos de reciclado

Fuente: THENOUX, G. Y GARCIA G. (1999), Estudio de Técnicas de Reciclado en Frio: Primera Parte. Revista Ingeniería de Construcción N° 20, Santiago, Chile

Existen diferencias tanto en la finalidad como en el proceso constructivo entre algunos tipos mostrados, tal es el caso entre un fresado superficial y un reciclado profundo, y muchas similitudes entre otros, como un reciclado parcial con emulsión o uno con asfalto espumado.

- a) Según el lugar en que se realice, puede desarrollarse una mezcla in-situ, donde todo el fresado y procesamiento para el mezclado del RAP se realiza sobre la superficie misma en que se colocará, disminuyendo de esta manera los costos de transporte del material a una planta. De realizarse la mezcla en planta, el RAP fresado es transportado para ser acopiado y evaluado, logrando producir mezclas de mejor calidad al otorgar el reforzamiento adecuado específico para un determinado proyecto.
- b) El estado de deterioro del pavimento determina la profundidad de reciclado. El Reciclado Superficial es el fresado controlado del pavimento para restaurar la superficie, donde rugosidad, ahuellamiento y otras irregularidades pueden ser removidas, dejando una textura superficial uniforme y con una resistencia al deslizamiento mejorada. Cuando se necesita actuar sólo sobre capas

asfálticas, sin llegar a la base granular, se realiza un Reciclado Parcial como medio para eliminar agrietamientos severos y calidad de rodadura, siendo utilizado como técnica de corto o mediano plazo y ejecutado hasta profundidades que varían normalmente entre 80 mm y 150 mm. Cuando el pavimento sufre daños estructurales que se extienden más allá de la carpeta asfáltica y comprometen la estabilidad de la base, se realiza un reciclado profundo o total, conocido como "full depth reclamation", técnica en la cual la totalidad de la carpeta asfáltica y buena parte del espesor de la base son reciclados. Pueden corregirse secciones transversales débiles, incrementar la capacidad soportante de las base, y utilizar el 100% del material existente. Se considera una estrategia de mediano o largo plazo, siendo realizado este tipo de reciclado a una profundidad mayor a los 150 mm.

- c) Las mezclas con material reciclado podrán requerir la adición de agregado cuando sea necesario corregir la granulometría del RAP.
- d) Los ligantes para el reciclado son utilizados con el objetivo común de unir partículas individuales entre sí, incrementando la resistencia del material y hacerlo más resistente al agua. Puede emplearse un material asfáltico, hidráulico o uno mixto. Debido a las ventajas que presenta frente a otros, el uso de emulsiones asfálticas como aditivo asfáltico es cada vez más generalizado, resultando su empleo, junto al material reciclado, una buena forma de reducir efectos dañinos sobre el medio ambiente.

3.1.1.1. Ensayos realizados al RAP

Para la utilización del material reciclado, se realizan ensayos de laboratorio que permiten analizar las características que presenta y establecer las condiciones iniciales de ingreso del material en un diseño de pavimento. El material reciclado del pavimento, después de ser separado del asfalto envejecido, es sometido a los mismos ensayos empleados para un agregado nuevo, descritos en el Cuadro 3.1, y normados por organizaciones internacionales como la American Society for Testing and Materials (ASTM) o la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).

Cuadro 3.1 Ensayos para agregados

Tipo de Ensayo	Descripción	Normativa
Análisis Granulométrico	Determina, cuantitativamente, los tamaños de las partículas de agregados gruesos y finos del material, por medio de tamices normalizados, elaborando una curva granulométrica.	ASTM C136 AASHTO T 27 MTC E 204
Gravedad Específica y Absorción de agregados gruesos	Determina la relación entre el peso y el volumen del agregado grueso.	ASTM C127 AASHTO T85 MTC E206
Gravedad Específica y Absorción de agregados finos	Determina la relación entre el peso y el volumen del agregado fino.	ASTM C128 AASHTO T 84 MTC E 205

Fuente: Elaboración Propia

3.1.1.2. Especificaciones técnicas para RAP

Según las Especificaciones técnicas del MTC (EG-2000) Capítulo 3 (Sub-bases y bases) Sección 305 (Base Granular), establece los rangos de valores que debe cumplir la granulometría final de un agregado, indicados en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Granulometría para una base granular

Tamiz	Porcentaje que Pasa en Peso			
	Gradación A	Gradación B	Gradación C	Gradación D
50mm (2")	100	100	--	--
25 mm (1")	--	75 - 95	100	100
9.5 mm (3/8")	30 - 65	40 - 75	50 - 85	60 - 100
4.75 mm (N°4)	25 - 55	30 - 60	35 - 65	50 - 85
2.0 mm (N°10)	15 - 40	20 - 45	25 - 50	40 - 70
4.25 um (N°40)	8 - 20	15 - 30	15 - 30	25 - 45
75 um (N°200)	2 - 8	5 - 15	5 - 15	8 - 15

Fuente: MTC, EG-2000 Capítulo 3 Sub-bases y Bases

Para zonas con altitud igual o mayor a 3000 msnm se establece seleccionar la gradación "A".

3.1.2. Emulsión Asfáltica

Para que el asfalto pueda ser empleado en pavimentación es necesario fluidificarlo, bien sea calentándolo, diluyéndolo o emulsionándolo. La alternativa de emulsionar el asfalto con agua brinda mayor protección ambiental al emplear menor cantidad de energía para su producción y no producir contaminación durante su aplicación, ya que evapora agua en lugar del solvente utilizado en los asfaltos diluidos o el volátil presente en los asfaltos en caliente.

Desde un punto de vista físico químico, una emulsión es una dispersión, más o menos estable, de un líquido en otro, los cuales son no miscibles entre sí y están unidos por un agente emulsionante. Al tratarse de dos elementos parcial o totalmente inmiscibles, forman dos fases: la llamada fase continua (o dispersante) y la fase dispersa (o discreta). En la Figura 3.4, aparecen las dos fases que conforman la emulsión.

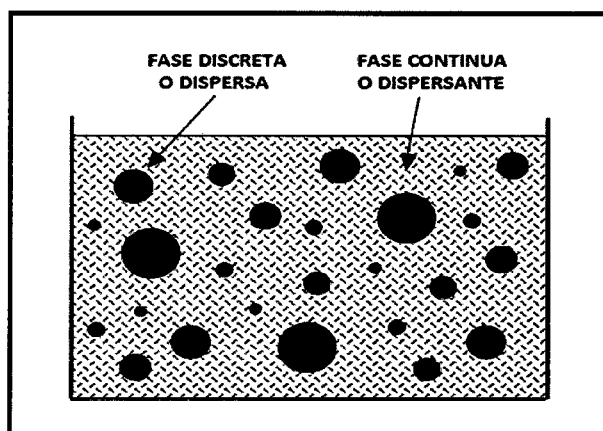


Figura 3.4 Esquema de una emulsión

Fuente: Urgiles G., Luis (2011), Diseño y evaluación de micropavimentos con emulsión asfáltica modificada. Tesis profesional, Sangolquí.

De acuerdo al tipo de líquido que conforma cada fase, las emulsiones pueden ser directas, inversas o múltiples, visualizadas en la Fig. 3.5. Las emulsiones directas, también llamadas **O/W** o **aceite en agua**, son aquellas donde la fase dispersa es una sustancia lipofílica (grasosa o aceitosa) y la fase continua es hidrofílica (normalmente agua). En las emulsiones inversas por el contrario, la fase dispersa es una sustancia hidrofílica y la fase continua es lipofílica, siendo denominadas **W/O** o **agua en aceite**. En las emulsiones múltiples o **W/O/W**, la fase dispersa contiene una emulsión inversa y la fase continua es un líquido acuoso.

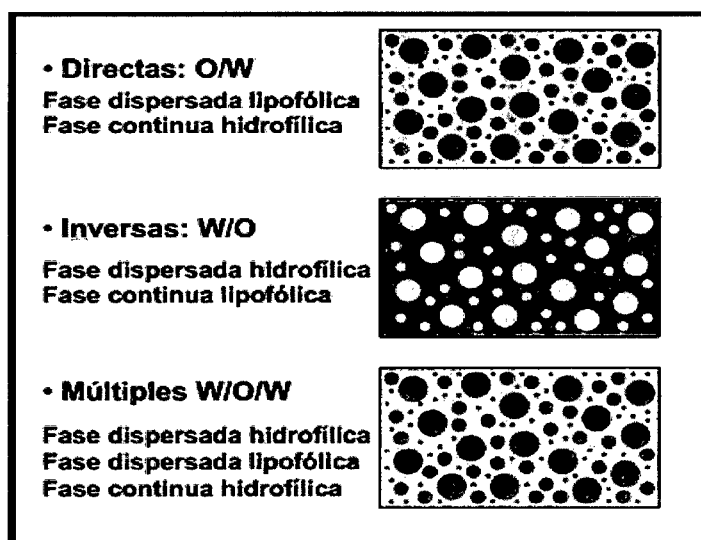


Figura 3.5 Emulsión directa, inversa o múltiple

Fuente: Rodríguez M., E. Formulación de emulsión tipo ECR-2P para aplicación en riegos de sello a baja temperatura. Tesis Universidad de las Américas Puebla, México 2013

Siendo la emulsión asfáltica una fina dispersión de partículas de asfalto (fase dispersa) en agua (fase continua), se clasifica como una emulsión del tipo directa (O/W), donde ambos líquidos se mantienen estables gracias a un agente emulsionante (surfactante) que al rodear la gota de asfalto proporciona la repulsión necesaria para conservar la estabilidad del sistema hasta su aplicación. Esta dispersión del asfalto se obtiene al aplicar una energía de cizallamiento mediante un molino coloidal, a través del cual se hace circular simultáneamente agua y asfalto en proporciones prefijadas.

La inalterabilidad de la dispersión se consigue a partir de la incorporación del agente emulsionante, que aporta una energía físico-química capaz de mantener el equilibrio de las partículas. Este componente se introduce en la fase acuosa y, de acuerdo a su composición y proporción, fija parámetros básicos que definen el comportamiento final de la emulsión, entre ellos la velocidad de rotura, la viscosidad, entre otros. En la Fig. 3.6 se representa el flujo de los componentes para lograr obtener una emulsión asfáltica.

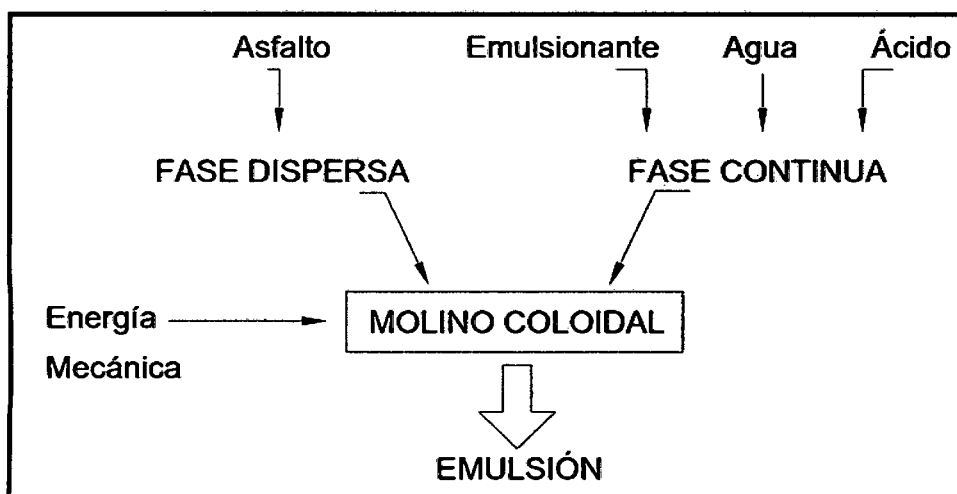


Figura 3.6 Flujo de componentes en fabricación de una emulsión asfáltica

Fuente: Elaboración Propia

3.1.2.1. Componentes de la emulsión

El asfalto, el agua y el agente emulsivo son los tres componentes básicos de una emulsión asfáltica, aunque para casos específicos de un proyecto podrían añadirse algunos aditivos, como estabilizadores, mejoradores de adherencia, mejoradores de recubrimiento, o agentes de control de rotura. El objetivo es lograr una dispersión del asfalto en el agua lo suficientemente estable para ser

bombeada, almacenada durante tiempo prolongado y mezclada. Más aún, la emulsión deberá romper al entrar en contacto con el agregado en un mezclador, o al ser distribuida sobre la superficie a trabajar. La rotura es la separación del agua del asfalto, conservando este último toda la capacidad adhesiva, la durabilidad, y la impermeabilidad propias del cemento asfáltico con el cual fue elaborado.

El asfalto es considerado un sistema coloidal complejo de hidrocarburos, en el cual es difícil establecer una distinción clara entre la fase continua y la dispersa, y constituye entre un 50% y un 75% de la emulsión. Los asfaltos más utilizados en el mundo son los derivados de petróleo, que se obtienen por medio de un proceso de destilación industrial del crudo. El modelo adoptado para configurar la estructura del asfalto se denomina modelo micelar, mostrado en la Figura 3.7, el cual provee una razonable explicación de dicha estructura, en el cual existen dos fases: una discontinua (aromática) formada por los asfaltenos y una continua que rodea y solubiliza a los asfaltenos, denominada maltenos. Estos maltenos y asfaltenos existen como islas flotando en el tercer componente del asfalto, los aceites.

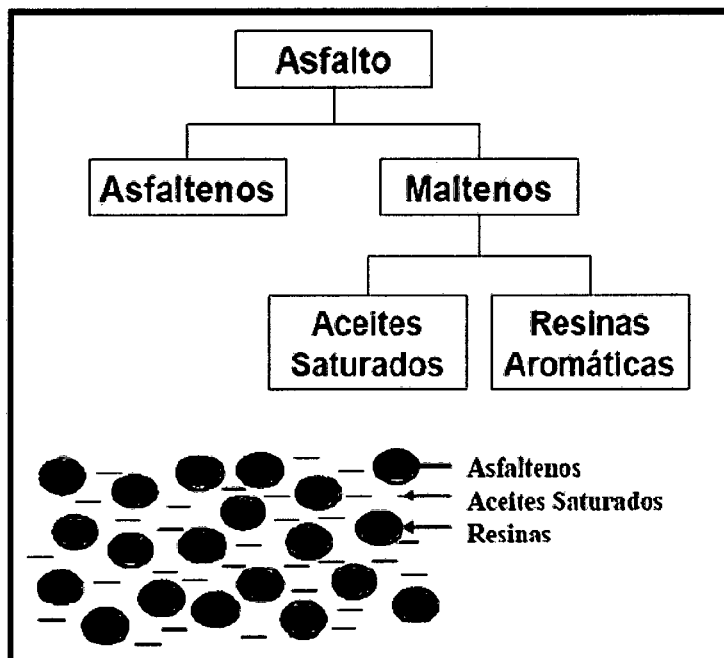


Figura 3.7 Composición del asfalto

Fuente: HUAMÁN G., NÉSTOR. "Manual Básico de Pavimentos Asfálticos"- Perú, 2011.

El agua es otro componente en la emulsión. Aunque el efecto del agua no ha sido completamente establecido, existen ciertos factores que deben ser tomados en cuenta para preparar una emulsión asfáltica. Como es bien sabido, el agua de suministro nunca es completamente pura. Contiene impurezas que se encuentran en forma de dispersiones coloidales o en solución y afectan en cierto grado la calidad de la emulsión resultante. Por tal motivo, siempre conviene determinar cantidades y tipos de impurezas que contiene el agua a usar.

Otro componente es el agente emulsivo o emulsionante, el cual se representa por un agente tensoactivo que tiene como finalidad mantener las gotitas de asfalto en suspensión estable y controlar el tiempo de rotura. Poseen una parte apolar y lipófila que tiene afinidad por el asfalto, y otra polar e hidrófila que tiene afinidad por el agua, esquematizado en la Figura 3.8. Su distribución, al fabricar la emulsión, permite que los glóbulos de asfalto tengan cargas eléctricas en superficie y suficiente repulsión entre ellos para un correcto transporte y almacenaje sin que se produzca su coalescencia.

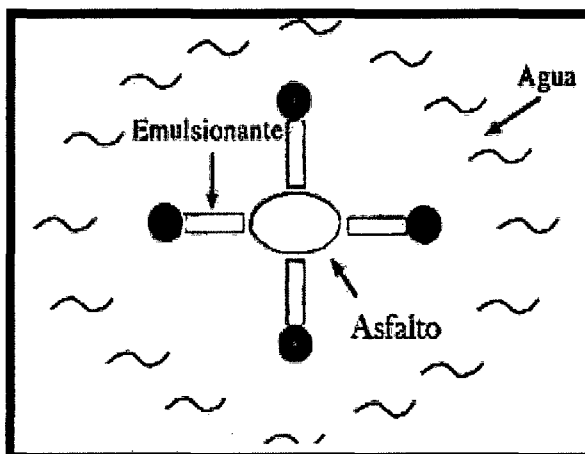


Figura 3.8 Agente emulsionante

Fuente: HUAMÁN G., NÉSTOR. "Manual Básico de Pavimentos Asfálticos"- Perú, 2011.

3.1.2.2. Tipos de emulsiones

Se divide en tipos según su carga eléctrica y según su velocidad de rotura.

De acuerdo a la carga eléctrica presente en las partículas de asfalto, como se muestra en la Figura 3.9, las emulsiones asfálticas pueden ser aniónicas, catiónicas o no iónicas cuando no poseen carga alguna. Cuando el glóbulo de asfalto, por la presencia del emulsionante en su superficie, adquiere carga

positiva se dice que la emulsión es Catiónica (+). Si por el contrario la carga eléctrica del glóbulo de asfalto es negativa, se estará en presencia de una emulsión aniónica (-).

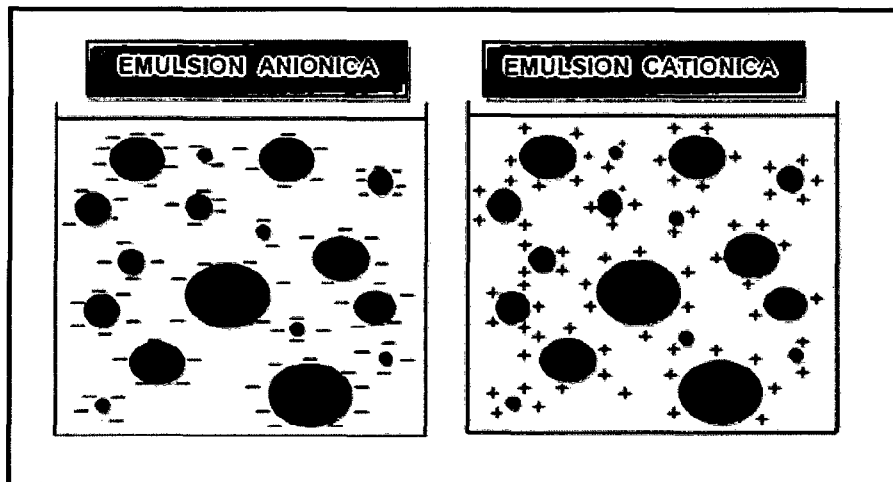


Figura 3.9 Tipo de emulsión según carga eléctrica

Fuente: GUEVARA P., MARLON (2010) Diseño de mezclas asfálticas densas en frío basado en el Método Marshall Modificado de la Universidad de Illinois. Tesis Profesional, El Salvador

En cuanto a la utilización de cada uno, fundamentalmente son el agregado y el clima los que definen la naturaleza de la emulsión a emplear, sea catiónica o aniónica, siendo estas últimas de muy reducida aplicación y requieren condiciones ambientales muy favorables. Las catiónicas se adaptan perfectamente a la mayor parte de los agregados de cualquier naturaleza y permiten trabajar en condiciones ambientales más desfavorables.

Cada uno de estos dos grandes grupos de emulsiones puede dividirse a su vez en función de su velocidad de rotura, es decir, la velocidad con que las gotas de asfalto coalescen (se juntan restaurando el volumen de asfalto), relacionado íntimamente con la rapidez con que la emulsión se vuelva inestable y rompa tras entrar en contacto con el agregado. El proceso de rotura es inminentemente necesario, debido a que se necesita que el material sea recubierto por el asfalto. La rotura de la emulsión se debe a la carga que tiene el agregado, el cual neutraliza la carga del asfalto en la emulsión. De esta manera la pequeña carga que tiene la emulsión se irá moviendo hacia el agregado que tiene carga opuesta y comenzará a formarse partículas de asfalto de gran tamaño, el mismo que

comenzará a recubrir el agregado, mientras el agua es eliminada del asfalto-agregado.

En la Figura 3.10 se observa el proceso que sigue la emulsión cuando se junta con el agregado, dando paso a la rotura de la emulsión de manera que sea el asfalto quien recubre al agregado. La rotura de una emulsión es un factor decisivo para definir la emulsión a usar en la obra según sea el tipo de tratamiento.

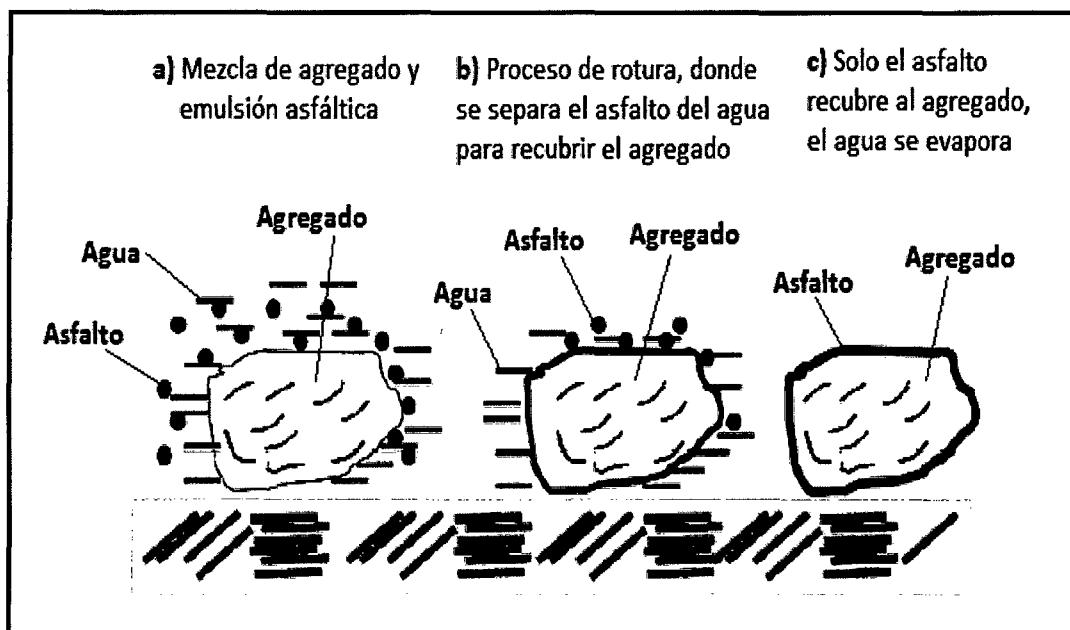


Figura 3.10 Proceso de rotura de la emulsión

Fuente: GUEVARA P., MARLON (2010) Diseño de mezclas asfálticas densas en frío basado en el Método Marshall Modificado de la Universidad de Illinois. Tesis Profesional, El Salvador

Las emulsiones de rotura rápida (RS), rompen en muy corto tiempo (usualmente algunos minutos), se utilizan en trabajos de riego y tratamientos superficiales. Tienen escasa o ninguna habilidad para mezclarse con un agregado que contenga finos, puesto que al ponerse en contacto con éstos, el rompimiento es casi de inmediato, por lo tanto el recubrimiento del material pétreo es insuficiente. Con las denominadas emulsiones de rotura media (MS) y la de rotura lenta (SS), es posible efectuar una amplia gama de mezclas en frío, según el tipo y granulometría del agregado o condiciones climáticas. Las emulsiones de rotura media mezclan bien con agregados gruesos, mientras que las de rotura lenta están diseñadas para mezclar con finos.

3.1.2.3. Nomenclatura para Emulsiones Asfálticas

La nomenclatura usada para la identificación de un determinado tipo de emulsión asfáltica, sean aniónicas o catiónicas, están detalladas en el cuadro 3.2, acorde a las normas AASHTO y ASTM.

Cuadro 3.2 Nomenclatura para Emulsión asfáltica

Emulsión aniónica	Emulsión catiónica
RS-1	CRS-1
RS-2	CRS-2
MS-1	----
MS-2	CMS-2
MS-2h	CMS-2h
HFMS-1	----
HFMS-2	----
HFMS-2h	----
SS-1	CSS-1
SS-1h	CSS-1h
QS-1h	CQS-1h

Fuente: Normas AASHTO M140-M208 Y ASTM D977-D2397

Donde:

- La letra C indica que es una emulsión catiónica. La ausencia de esta letra indica una emulsión aniónica.
- Las cifras 1 y 2 indican la viscosidad. Un valor igual a 1 indica una viscosidad baja y para un valor igual a 2 una viscosidad alta.
- La letra "h" incluida en algunos grados indica que la base asfáltica es más consistente (hard, dura). Quiere decir que en muchos casos en función del clima en obra, se necesitará que la emulsión tenga un residuo de mayor dureza. La letra "s" indicaría que la base es más blanda (soft).
- Las letras HF significa alta flotación.

3.1.2.4. Ensayos de laboratorio para emulsión asfáltica

La correcta interpretación de resultados de los ensayos de laboratorio puede ayudar en gran medida en la determinación de las características de una emulsión. Las propiedades de las emulsiones asfálticas son determinadas

mediante ensayos en conformidad a la norma ASTM D 244 o AASHTO T59. Estos ensayos, descritos en el Cuadro 3.3., fueron diseñados para medir cualidades relacionadas con la composición, consistencia, estabilidad, performance, entre otros.

Cuadro 3.3 Ensayos de laboratorio a Emulsión Asfáltica

Ensayo	Descripción	Normativa
Carga de partículas	Identifica si una emulsión es catiónica o aniónica.	ASTM D244 AASHTO T 59
Viscosidad Saybolt Furol	Mide viscosidad de la emulsión, expresado en segundos Saybolt Furol, a temperaturas de 25°C (77°F) o 50°C (122°F).	ASTM D244
Sedimentación y Estabilidad para Almacenamiento	Detecta la tendencia de los glóbulos de asfalto a sedimentar a lo largo de un período de tiempo.	ASTM D244
Mezcla con cemento	Indica la capacidad de una emulsión de rotura lenta para mezclarse, sin romper, con un material de alta superficie específica.	ASTM D244
Recubrimiento en campo	Realizado in-situ para determinar capacidad para recubrir al agregado, resistir los efectos del mezclado y resistencia al agua del agregado recubierto.	ASTM D244
Residuo asfáltico por destilación	Separación de agua y asfalto por destilación, obteniendo un residuo asfáltico. Sobre el residuo pueden realizarse ensayos adicionales, con el objeto de determinar propiedades físicas del asfalto de uso final	ASTM D244

Fuente: Elaboración Propia

Las mismas características deseables en el cemento asfáltico base deben manifestarse en el asfalto residual luego de la emulsificación y de la coalescencia. Los ensayos realizados al residuo están descritos en el cuadro 3.4

Cuadro 3.4 Ensayos de laboratorio al asfalto residual

Ensayo	Descripción	Normativa
Gravedad específica	Útil para hacer correcciones de volumen a diversas temperaturas.	ASTM D 070 / AASHTO T 228
Penetración	Es una medida de la dureza del residuo asfáltico a la temperatura especificada.	ASTM D 5 / AASHTO T 49
Ductilidad	Es la capacidad del asfalto para ser estirado formando un "hilo" delgado.	ASTM D 113 / AASHTO T 51
Flotación	Se realiza sobre el residuo obtenido de la destilación de emulsiones asfálticas de alta flotación. El ensayo es una medida de la resistencia a fluir a una elevada temperatura	ASTM D 139 / AASHTO T 50
Punto de ablandamiento. Ensayo anillo y esfera.	Es la temperatura para la cual unos discos de asfalto se ablandan lo suficiente para dejar caer unas esferas.	ASTM D 36 / AASHTO T 53

Fuente: Elaboración Propia

3.1.2.5. Especificaciones para emulsiones asfálticas

La tabla 3.2 muestra las especificaciones para emulsiones asfálticas catiónicas indicadas en el Manual de Carreteras EG-2013 Sección 415.04, basado en las especificaciones y ensayos estándar de la ASTM y AASHTO.

Tabla 3.2 Especificaciones para emulsión asfáltica catiónica

Tipo	Rotura Lenta			
Grado	CSS-1		CSS-1h	
	min	max	min	max
Prueba sobre Emulsiones				
Viscosidad Saybolt Furol a 25°Cs	20	100	20	100
Estabilidad de Almacenamiento, 24 h, %		1		1
Carga de partícula	Positivo		Positivo	
Prueba de tamiz %	-	0.10	-	0.10
Mezcla con cemento, %	2.0		2.0	
Destilación:				
% Residuo	57	-	57	-
Pruebas sobre el Residuo de destilación:				
Penetración, 25°C, 100 g, 5s	100	250	40	90
Ductilidad , 25°C, 5 cm/min, cm	40		40	
Solubilidad en Tricloretileno, %	97.5		97.5	

Fuente: Manual de Carreteras EG-2013

3.2. DISEÑO DE MEZCLA MARSHALL MODIFICADO

El diseño de mezcla es parte fundamental de las investigaciones sobre pavimentos y procedimientos de diseño. Tiene como objetivo determinar la combinación más efectiva de materiales que conformarán las capas asfálticas. Generalmente, el diseño adecuado es el más económico y el que cumple satisfactoriamente los criterios establecidos al inicio del proyecto.

Uno de los métodos de diseño más usado en la actualidad es el Marshall Modificado, basado en el método Marshall para diseño de mezclas en caliente el cual es modificado para adecuarse al diseño de mezclas preparadas a temperatura ambiente. Su propósito es proveer la cantidad adecuada de ligante asfáltico que estabilice el material granular con el fin de dar la resistencia o estabilidad requerida para soportar las aplicaciones de carga sin una deformación permanente excesiva o los efectos por cambios bruscos de temperatura. El diseño analiza la relación estabilidad-flujo en muestras compactadas y la relación densidad-análisis de vacíos.

La estabilidad y el flujo de un pavimento reflejan su capacidad de resistir desplazamientos y su deformación bajo las cargas del tránsito. En la relación densidad y contenido de vacíos, entre más alta la densidad menor es el porcentaje de vacíos en la mezcla, y viceversa. La durabilidad de un pavimento asfáltico es función del contenido de vacíos, a menor cantidad de vacíos menor será la permeabilidad de la mezcla y un contenido alto proporciona aberturas donde puede entrar agua y aire, deteriorando el pavimento.

3.2.1. Metodología de Diseño

La Figura 3.11 indica el flujo de procesos de la metodología Marshall Modificado para mezclas en frío, inicia con la evaluación y caracterización de los materiales mediante ensayos de laboratorio, llegando al cálculo del contenido tentativo de ligante asfáltico requerido, estableciendo la humedad para compactación, continua con el ensayo de probetas que contienen un contenido de asfalto variado y concluye con la selección del contenido óptimo de ligante asfáltico que satisface de la mejor manera todos los criterios de diseño.

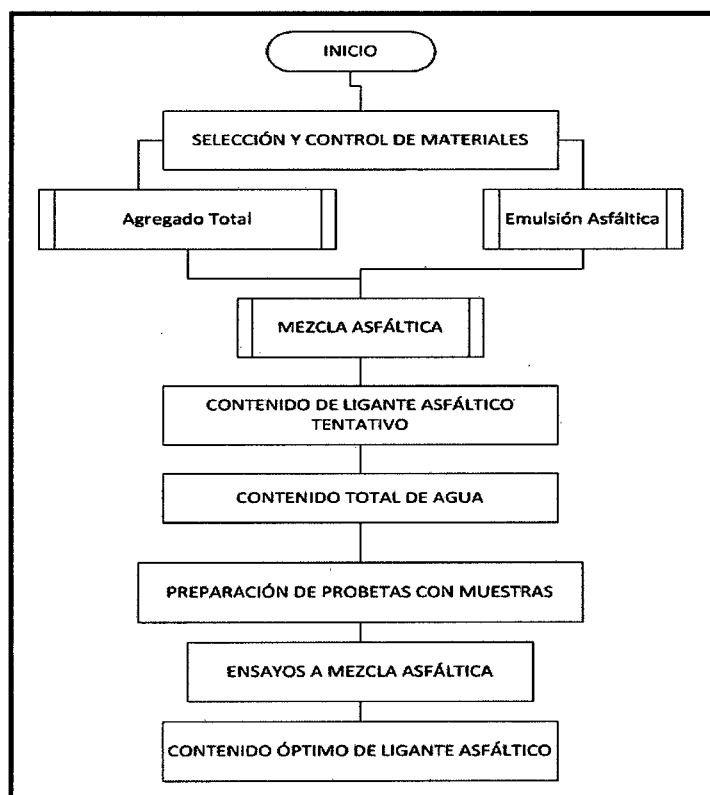


Figura 3.11 Flujo para Diseño de mezcla

Fuente: Elaboración Propia

3.2.1.1. Selección y control de calidad de materiales

La evaluación se realiza a través de ensayos de laboratorio de los agregados a utilizar y de la emulsión asfáltica seleccionada.

Los agregados para mezclas asfálticas se emplean en combinación con el asfalto o derivados de este, y constituyen el 90% en peso de dichas mezclas, siendo sus propiedades de gran influencia sobre el producto terminado. Los agregados más utilizados son la piedra, grava chancada o natural, arena chancada y arena natural. El cuadro 3.1 describió los ensayos de laboratorio a los que es sometido el agregado pétreo y en la tabla 3.1 aparecen las especificaciones técnicas para el mismo.

Para la selección del ligante se toma en cuenta la compatibilidad con la naturaleza y la granulometría de los agregados, con el cual debe tener buena adherencia y una consistencia acorde a las condiciones de clima de la zona de trabajo. Las propiedades de las emulsiones son evaluadas mediante ensayos de laboratorio descritos en el cuadro 3.3 y deben cumplir los valores proporcionados en la tabla 3.2 de especificaciones técnicas.

Así mismo, en las mezclas en frío toma mucha importancia el contenido de agua. Un alto contenido de agua favorece el mezclado pero perjudica las propiedades mecánicas de la mezcla, afectando negativamente a la densidad final y a la distribución del ligante respectivamente.

3.2.1.2. Contenido de ligante asfáltico tentativo

El contenido de asfalto residual tentativo se determina en base al análisis granulométrico del agregado o de la mezcla de agregados y de la capacidad de absorción de estos.

Existen varios métodos para determinar el contenido óptimo de emulsión, siendo el método del Instituto del Asfalto el más empleado.

a) Método del Instituto del Asfalto (USA)

El método busca determinar un porcentaje de asfalto residual por peso de la mezcla, iniciando con la aplicación de una fórmula empírica basada en las características granulométricas del agregado:

$$P = (0.05 \times A + 0.1 \times B + 0.5 \times C) \times 0.7 \quad (1)$$

Donde:

P = Porcentaje (*) por peso de emulsión asfáltica, basado en el peso de agregado seco.

A = Porcentaje (*) de agregado retenido en la malla N°8

B = Porcentaje (*) de agregado que pasa la malla N°8 y es retenido en la malla N°200.

C = Porcentaje (*) de agregado que pasa la malla N°200.

(*) Expresado como un número entero.

Con este valor calculado, se obtiene el "Contenido Estimado de Asfalto residual" (CA) con la expresión:

$$CA = \frac{P \times CARE}{100} \quad (2)$$

Donde:

CARE = Contenido de asfalto residual en la emulsión (%)

CA = Contenido de asfalto residual total por peso de mezcla (%)

El CA es un punto de partida para la aplicación del método de diseño, con el cual se calcula el porcentaje de contenido tentativo de ligante asfáltico en torno al cual se van haciendo variaciones que pueden ser cada 0.5% o 1% ($\pm 0.5\%$ o $\pm 1.0\%$) y así, dentro de ese rango, se podrá encontrar el contenido óptimo de emulsión.

3.2.1.3. Contenido total de agua en la mezcla

El contenido total de agua en la mezcla comprende la suma de los contenidos de agua en la emulsión, humedad natural y agua de premezcla

El contenido de humedad natural, calculado del material mezclado, es la relación que existe entre el peso de agua de una muestra del material y el peso sólido del mismo, expresado en porcentaje.

El contenido de agua de premezcla funciona como el medio para que la emulsión pueda recubrir el agregado y puede ser visualizada mediante un ensayo de recubrimiento.

Adicionalmente se calcula el contenido de agua para la compactación. Es necesario optimizar el contenido óptimo de agua en la compactación para maximizar las propiedades de la mezcla deseada, debido a que este contenido de agua define las propiedades de densificación de las muestras compactadas. Su cálculo se determina mediante una curva de valores de Estabilidad vs Contenido de Agua de compactación obtenidos al ensayar unas muestras preparadas con cada contenido de agua de compactación a ser evaluado, donde el valor óptimo es determinado como el punto más alto de la curva.

3.2.1.4. Preparación de muestras

Tomando como base el contenido de asfalto teórico calculado, se prepara varias porciones idénticas de muestras con diferentes contenidos de asfalto, como se observa en la Figura 3.12. Emplea las mismas probetas, martillo y equipo utilizados en el diseño de mezclas asfálticas en caliente con el método Marshall, preparando tres probetas por cada contenido de emulsión a ensayar. La temperatura de mezclado, compactación y ensayo utilizada normalmente es de 25 °C; sin embargo, esta temperatura puede adecuarse a las temperaturas probables de encontrar en los lugares donde se empleará la mezcla.

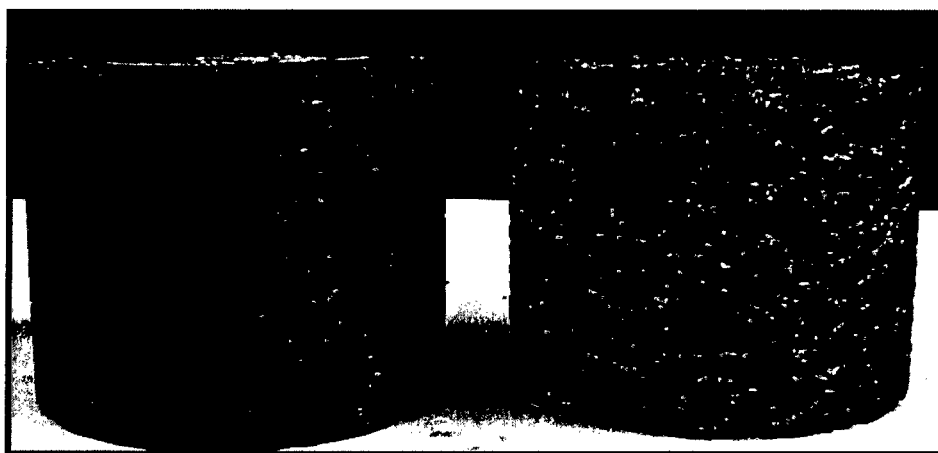


Figura 3.12 Probetas de mezcla asfáltica

Fuente: Laboratorio de Emulsiones asfálticas de CONCAR

3.2.1.5. Ensayos y análisis de diseño final

Después del curado, las probetas son sometidas a varios ensayos para evaluar sus propiedades de ingeniería. Para determinar el contenido óptimo de asfalto residual, los resultados de los ensayos son graficados con respecto al contenido

de asfalto residual de cada mezcla. El contenido de asfalto residual que permite lograr las propiedades deseadas, es considerado como el contenido óptimo de asfalto. Las pruebas y análisis que se realizan con el fin de obtener ciertos datos de las probetas compactadas se encuentran en el cuadro 3.5.

Cuadro 3.5 Ensayos para probetas con mezcla asfáltica

Ensayo	Descripción	Normativa
Densidad Bulk	Relación entre el peso de una probeta en el aire y su volumen incluyendo vacíos permeables. Útil para cálculo de % de vacíos de aire.	ASTM D2726
Estabilidad modificada (en modo seco y saturado)	Determina la resistencia a la compresión diametral de la mezcla asfáltica, mediante el aparato Marshall, reflejando que tan estable es la mezcla.	ASTM D-1559
Pérdida de Estabilidad	Determina la pérdida de cohesión de la mezcla acción del agua.	ASTM D-1559
Flujo o Fluencia	Determina la deformación de la mezcla por efectos de esfuerzos de compresión diametral y es medido mediante un dial de deformación vertical.	ASTM D-1559
Humedad absorbida	Determina el peso específico aparente y la cantidad de agua que la mezcla puede absorber.	ASTM D-1559
Análisis de densidad y vacíos	Determina la cantidad de bolsas de aire que se encuentra entre las partículas de agregado cubiertas con asfalto, luego de compactada la mezcla.	ASTM D-3203

Fuente: Elaboración Propia

Los datos obtenidos son representados en gráficas donde cada uno de dichos datos es conectado con una curva suave que proporciona el mejor ajuste para todos los valores.

- a) Estabilidad modificada seca vs contenido de asfalto residual y Estabilidad modificada húmeda vs contenido de asfalto residual, gráficas representadas en la Figura 3.13.

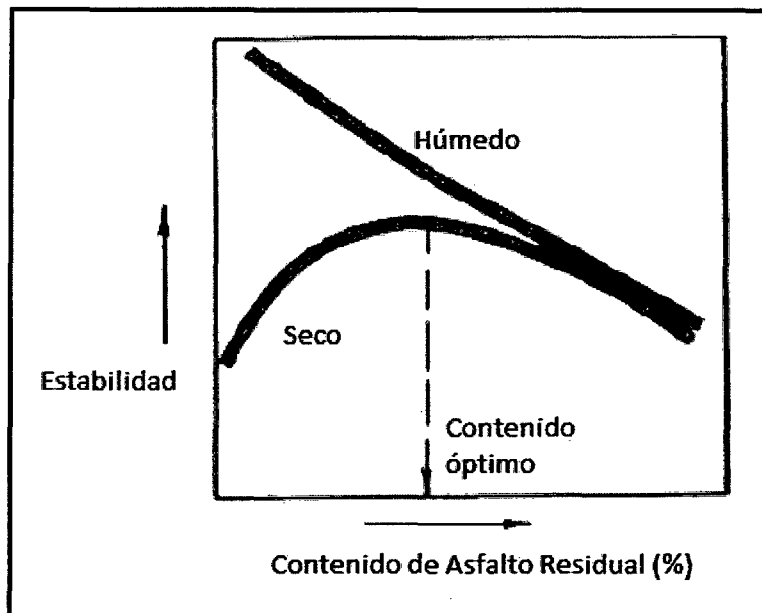


Figura 3.13 Estabilidad vs Contenido de asfalto residual

Fuente: Manual Series N°14 - Instituto del Asfalto

- b) Pérdida de estabilidad (%) vs contenido de asfalto residual, gráfica representada en la Figura 3.14.

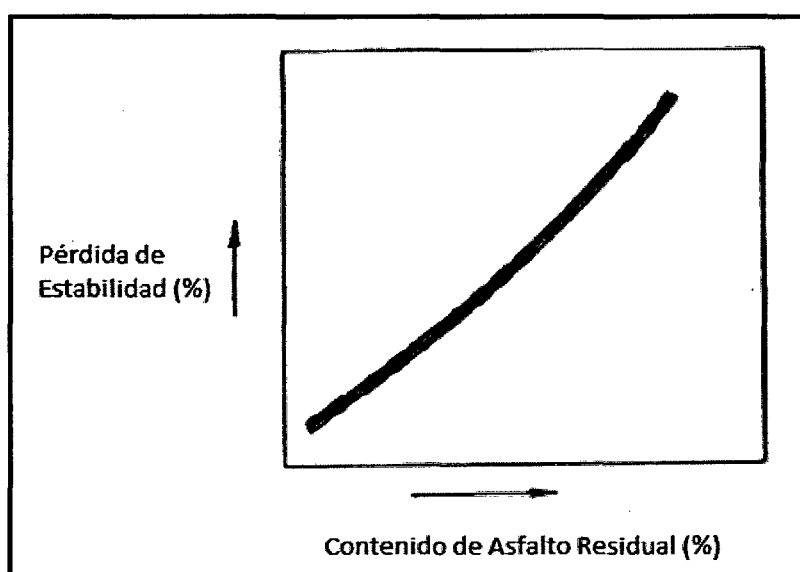


Figura 3.14 Pérdida de Estabilidad vs asfalto residual

Fuente: Manual Series N°14 - Instituto del Asfalto

- c) Densidad seca Bulk (corregida por humedad) vs contenido de asfalto residual, gráfica representada en la Figura 3.15.

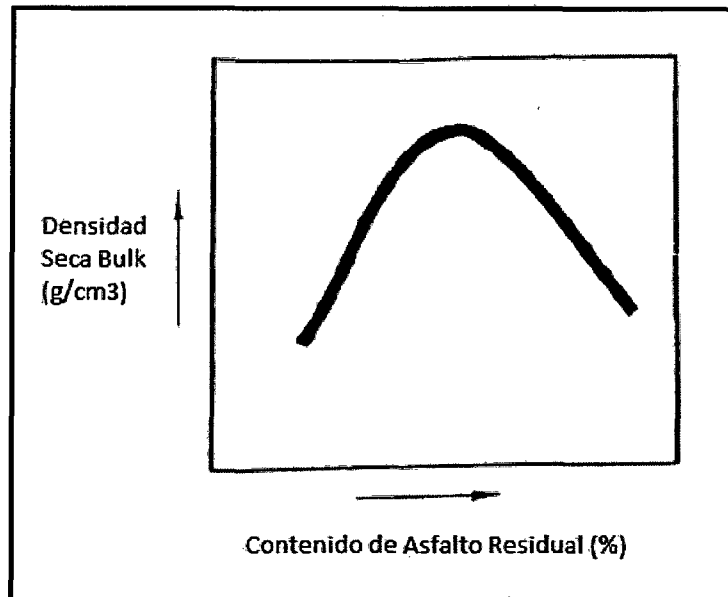


Figura 3.15 Densidad Seca Bulk vs asfalto residual.

Fuente: Manual Series N°14 - Instituto del Asfalto

- d) Humedad absorbida (%) vs contenido de asfalto residual, gráfica representada en la Figura 3.16.

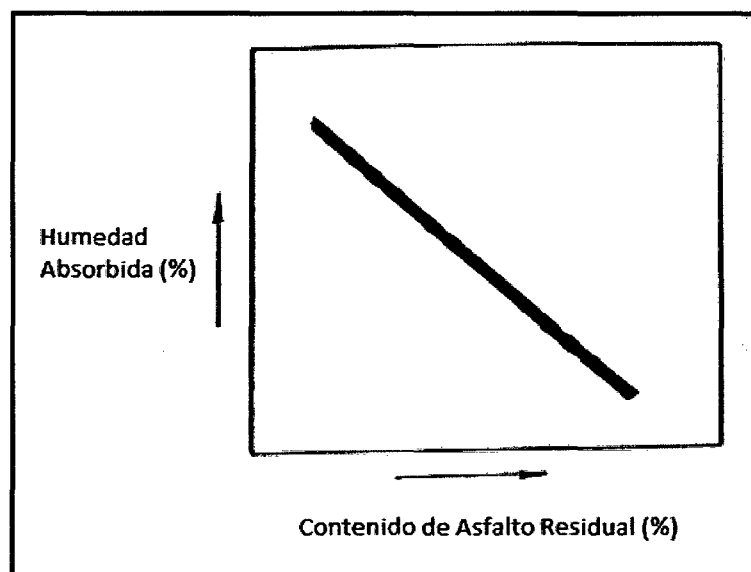


Figura 3.16 Humedad Absorbida vs asfalto residual

Fuente: Manual Series N°14 - Instituto del Asfalto

- e) Vacíos totales (%) vs contenido de asfalto residual, gráfica representada en la Figura 3.17.

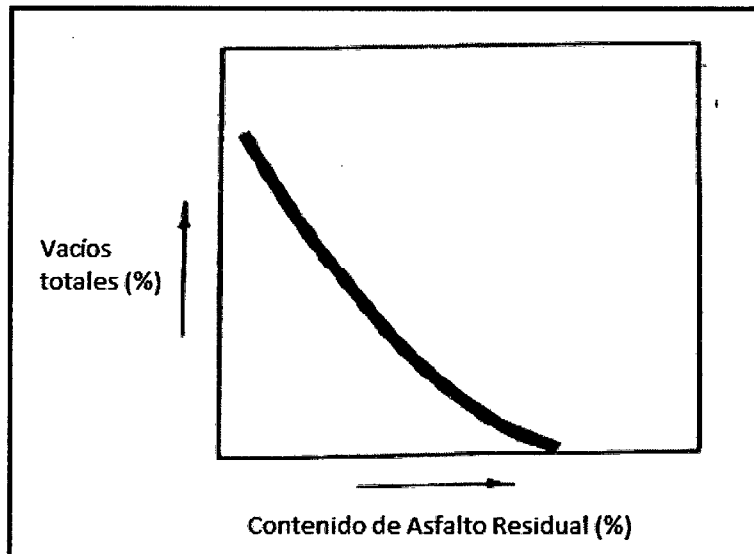


Figura 3.17 Vacíos totales vs asfalto residual

Fuente: Manual Series N°14 - Instituto del Asfalto

Las tendencias generales y relaciones entre datos de los ensayos representados son:

- La estabilidad húmeda generalmente mostrará un pico a un contenido de asfalto residual en particular, mientras que la estabilidad seca generalmente mostrará una curva continuamente decreciente con el aumento del contenido de asfalto residual. Algunas mezclas pueden mostrar un incremento continuo de la estabilidad húmeda sobre el rango del contenido de asfalto evaluado, lo que indica el aumento del efecto beneficioso del contenido de asfalto adicional en la estabilidad húmeda.
- El porcentaje de pérdida de estabilidad generalmente disminuye con el aumento del contenido de asfalto residual.
- La densidad seca Bulk usualmente tiene un pico a un contenido de asfalto residual en particular.
- El porcentaje de humedad absorbida durante la inmersión disminuye con el aumento del contenido de asfalto residual.
- El porcentaje total de vacíos disminuye con el aumento del contenido de asfalto residual.

3.2.1.6. *Determinación del contenido óptimo de asfalto.*

La elección del valor óptimo se basa en los siguientes criterios:

- La mezcla debe proporcionar una estabilidad adecuada en una condición “húmeda” para proporcionar una resistencia adecuada a la carga de tráfico durante las estaciones húmedas.
- El porcentaje de pérdida de estabilidad de la mezcla en condición “húmeda” no debe ser excesiva. Una gran pérdida es indicador que la mezcla tiene una gran susceptibilidad a la humedad y puede causar desintegración durante las estaciones húmedas.
- El total de vacíos debe estar dentro de un rango aceptable para prevenir la deformación permanente excesiva y la absorción de humedad (para contenidos de vacíos muy alto), o exudación del asfalto residual de la mezcla (para un contenido de vacíos bajo).
- La absorción de humedad en la mezcla no debe ser excesivo para minimizar el potencial de debilitamiento de la unión entre el asfalto residual y el agregado.
- El asfalto residual debe proporcionar un adecuado recubrimiento del agregado y debe ser resistente a la abrasión.

El contenido óptimo de asfalto residual es elegido como el valor que proporciona la estabilidad húmeda máxima, siendo ajustado ese valor dependiendo de la humedad absorbida, % pérdida de estabilidad, los vacíos totales, y el recubrimiento de los agregados. Este valor debe cumplir con los requisitos mínimos de estabilidad. Si uno o más criterios no se cumplen, la mezcla es considerada inadecuada.

Si no hay ningún pico en la gráfica contenido de asfalto residual vs la Estabilidad húmeda u otras propiedades desarrolladas, el contenido óptimo de emulsión se establece sobre la base de las mejores combinaciones de propiedades tales como la estabilidad Marshall, el porcentaje de pérdida de estabilidad y la densidad seca, con especial atención a los efectos del agua sobre las propiedades de las muestras.

3.2.2. Especificación técnica

El Manual Series N°14 del Instituto del Asfalto sobre Mezclas asfálticas en frío establece especificaciones técnicas para la mezcla asfáltica en frío con emulsión que debe cumplir un diseño por el Método Marshall Modificado. Los parámetros que permitirán realizar un control de calidad a la mezcla se muestran en la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Parámetros de control de calidad - Mezclas emulsionadas

Parámetro	Mínimo	Máximo
Estabilidad (Kg-f)	227	--
Cambio de Estabilidad (%)	--	50
Recubrimiento de Agregado	50	--

Fuente: Manual Series N°14 del Instituto del Asfalto

CAPÍTULO IV: EVALUACIÓN E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1. APLICACIÓN DE METODOLOGÍA PARA DISEÑO

La mezcla asfáltica es diseñada con la metodología Marshall para un posterior uso en la carretera Abancay-Cusco, en un tramo del Km 916+000 ubicado a más de 3000 m.s.n.m. La aplicación del diseño para mezclas en frío es desarrollado netamente en laboratorio, de acuerdo al Manual MS-14 del Instituto del Asfalto, buscando obtener la cantidad adecuada de emulsión que brinde, junto al material granular, la estabilidad necesaria para soportar aplicaciones de cargas repetidas sin generar deformaciones permanentes excesivas ni daños por efectos de la humedad.

4.1.1. Evaluación de componentes.

El primer paso del diseño es la evaluación de los componentes que formarán parte de la mezcla, iniciando con los que forman parte del agregado pétreo. De acuerdo al tema en estudio, el agregado recuperado puede ser empleado después de verificar su cumplimiento con los criterios técnicos al igual que un agregado nuevo convencional, razón por la cual es necesario conocer algunas de sus propiedades, entre ellas, la granulometría.

El material reciclado es procedente del fresado en un tramo de la carretera Abancay-Cusco, ubicado a más de 3000 m.s.n.m, la cual forma parte del Proyecto Survia. Gracias al empleo de un extractor centrífugo, se separa el asfalto envejecido de los agregados y, mediante ensayo, se obtiene la granulometría y otras propiedades importantes para la selección del material, tales como la gravedad específica y la absorción.

En el cuadro 4.1 se muestra la granulometría y otras propiedades que influyen en el porcentaje de vacíos totales presentes en la mezcla final.

Cuadro 4.1 Caracterización del Agregado recuperado

GRANULOMETRÍA				
TAMIZ		AGREGADO RAP		
(pulg.)	(mm.)	% Ret. Parc.	% Ret. Acum.	% Que Pasa
1"	25.000			
3/4"	19.000	0.0	0.0	100.0
1/2"	12.500	11.8	11.8	88.2
3/8"	9.500	9.7	21.5	78.5
1/4"	6.300	13.7	35.2	64.8
N°4	4.750	10.1	45.3	54.7
N°6	3.360	11.1	56.4	43.6
N°8	2.380	9.6	66.0	34.0
N°10	2.000	4.6	70.6	29.4
N°16	1.190	10.3	80.9	19.1
N°20	0.850	4.8	85.7	14.3
N°30	0.600	3.7	89.4	10.6
N°40	0.425	3.0	92.4	7.6
N°50	0.300	2.2	94.6	5.4
N°80	0.177	2.4	97.0	3.0
N°100	0.150	0.6	97.6	2.4
N°200	0.075	1.5	99.1	0.9
< N°200	FONDO	0.9	100.0	0.0
GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN				
G. E. Bulk base seca (g/cm ³)			2.35	
G. E. Bulk base sat. (g/cm ³)			2.378	
G. E. Aparente (g/cm ³)			2.416	
Absorción (%)			1.2	

Fuente: Informe de ensayo en laboratorio Concar - GyM

Por tratarse del diseño para una base granular, la granulometría del agregado debe ser evaluada de acuerdo a las especificaciones indicadas en la sección 403 del capítulo 4 "Capas contaminantes, sub-bases y bases" en el Manual de Carreteras del MTC (EG-2013). Según sus indicaciones, la composición final del material debe presentar una granulometría continua, bien graduada y evaluarse según los husos granulométricos correspondientes a una Granulometría del tipo A, indicados en el cuadro 4.2. La gradación mencionada es seleccionada para trabajos en zonas con altitudes iguales o mayores a 3000 msnm.

Cuadro 4.2 Especificación para granulometría tipo A

TAMIZ		ESPECIFICACIÓN GRADACIÓN TIPO A	
(pulg.)	(mm.)		
2"	50.800	100	100
3/8"	9.525	30	65
N°4	4.760	25	55
N°10	2.000	15	40
N°40	0.426	8	20
N°200	0.074	2	8

Fuente: Manual de Carreteras del MTC EG-2013

El cuadro 4.3 presenta la comparación de valores obtenidos de la granulometría del RAP y los husos granulométricos para la gradación tipo A.

Cuadro 4.3 Granulometría RAP y Huso Granulométrico Tipo A

TAMIZ		AGREGADO RAP	ESPECIFICACIÓN GRADACIÓN TIPO A	
(pulg.)	(mm.)	% Que Pasa		
2"	50.000	100.0	100	100
3/8"	9.500	78.5	30	65
N°4	4.750	54.7	25	55
N°10	2.000	29.4	15	40
N°40	0.425	7.6	8	20
N°200	0.075	0.9	2	8

Fuente: Elaboración propia

La granulometría del RAP presenta una notable diferencia en el porcentaje de agregado grueso para el tamiz 3/8", por tal motivo debe realizarse una corrección en la granulometría con la adición de agregado grueso nuevo, el cual debe contar con características mineralógicas similares al material reciclado con el fin de evitar que el ligante tenga diferente adhesividad con cada uno de ellos.

El agregado nuevo que se utiliza proviene de la cantera Huillque, cantera autorizada y designada para formar parte del proyecto debido a su cercanía al tramo en estudios, estando ubicada a la altura del Km 916+000 de la carretera Abancay-Cuzco. De igual forma que para el agregado recuperado, el cuadro 4.4 muestra los resultados de la granulometría, gravedad específica y absorción del agregado nuevo.

Cuadro 4.4 Caracterización del Agregado de Cantera Huillque

GRANULOMETRÍA				
TAMIZ		AGREGADO NUEVO - PIEDRA CHANCADA		
(pulg.)	(mm.)	% Ret. Parc.	% Ret. Acum.	% Que Pasa
3/4"	19.000	0.0	0.0	100.0
1/2"	12.500	78.6	78.6	21.4
3/8"	9.500	17.6	96.2	3.8
1/4"	6.300	2.2	98.4	1.6
N°4	4.750	0.2	98.6	1.4
N°8	2.380	1.4	100.0	0.0
GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN				
G. E. Bulk base seca (g/cm ³)			2.667	
G. E. Bulk base sat. (g/cm ³)			2.696	
G. E. Aparente (g/cm ³)			2.745	
Absorción (%)			1.1	

Fuente: Informe de ensayo en laboratorio Concar

El agregado final resulta al combinar el agregado reciclado y el agregado nuevo, cada uno en cierta proporción, de manera que defina una granulometría final con porcentajes que representen una mejor tendencia a cumplir con los criterios de diseño y el equilibrio con las demás propiedades.

Haciendo uso del método de tanteos para el cálculo de la proporción por cada agregado, evaluamos una mezcla "A" con una proporción de 50% por cada agregado, obteniendo los valores mostrados en el cuadro 4.5

Cuadro 4.5 Mezcla "A" 50% RAP + 50% Agregado nuevo

TAMIZ		RAP	PIEDRA	MEZCLA 50%+50%	HUSO GRANULOMÉTRICO	
(pulg.)	(mm.)	% Que Pasa	% Que Pasa			
2"	50.800	100.0	100.0	100.0	100	100
1 1/2"	38.100					
1"	25.400					
3/4"	19.050	100.0	100.0	100.0		
1/2"	12.700	88.2	21.4	54.8		
3/8"	9.525	78.5	3.8	41.2	30	65
1/4"	6.350	64.8	1.6	33.2		
N°4	4.760	54.7	1.4	28.1	25	55
N°6	3.360	43.6	0.0	21.8		
N°8	2.380	34.0		17.0		
N°10	2.000	29.4		14.7	15	40
N°16	1.190	19.1		9.6		
N°20	0.840	14.3		7.2		
N°30	0.590	10.6		5.3		
N°40	0.426	7.6		3.8	8	20
N°50	0.297	5.4		2.7		
N°80	0.177	3.0		1.5		
N°100	0.149	2.4		1.2		
N°200	0.074	0.9		0.5	2	8
< N°200	FONDO	0.0		0.0		

Fuente: Elaboración propia

Realizando una variación en las proporciones, el agregado reciclado aumenta a un 60% y el agregado nuevo ingresa en un 40%, se obtiene una mezcla "B" con los resultados del cuadro 4.6

Cuadro 4.6 Mezcla "B" 60% RAP + 40% Agregado nuevo

TAMIZ		RAP	PIEDRA	MEZCLA 60%+40%	HUSO GRANULOMÉTRICO	
(pulg.)	(mm.)	%Que Pasa	%Que Pasa			
2"	50.800	100.0	100.0	100.0	100	100
1 1/2"	38.100					
1"	25.400					
3/4"	19.050	100.0	100.0	100.0		
1/2"	12.700	88.2	21.4	61.5		
3/8"	9.525	78.5	3.8	48.6	30	65
1/4"	6.350	64.8	1.6	39.5		
N°4	4.760	54.7	1.4	33.4	25	55
N°6	3.360	43.6	0.0	26.2		
N°8	2.380	34.0		20.4		
N°10	2.000	29.4		17.6	15	40
N°16	1.190	19.1		11.5		
N°20	0.840	14.3		8.6		
N°30	0.590	10.6		6.4		
N°40	0.426	7.6		4.6	8	20
N°50	0.297	5.4		3.2		
N°80	0.177	3.0		1.8		
N°100	0.149	2.4		1.4		
N°200	0.074	0.9		0.5	2	8
< N°200	FONDO	0.0		0.0		

Fuente: Elaboración propia

Otra variación considerada se da en el cuadro 4.7, una mezcla "C" con la disminución en la proporción del agregado reciclado a un 40%, aumentando a un 60% la proporción del agregado nuevo.

Cuadro 4.7 Mezcla "C" 40% RAP + 60% Agregado nuevo

TAMIZ		RAP	PIEDRA	MEZCLA 40%+60%	HUSO GRANULOMÉTRICO	
(pulg.)	(mm.)	%Que Pasa	%Que Pasa			
2"	50.800	100.0	100.0	100.0	100	100
1 1/2"	38.100					
1"	25.400					
3/4"	19.050	100.0	100.0	100.0		
1/2"	12.700	88.2	21.4	48.1		
3/8"	9.525	78.5	3.8	33.7	30	65
1/4"	6.350	64.8	1.6	26.9		
N°4	4.760	54.7	1.4	22.7	25	55
N°6	3.360	43.6	0.0	17.4		
N°8	2.380	34.0		13.6		
N°10	2.000	29.4		11.8	15	40
N°16	1.190	19.1		7.6		
N°20	0.840	14.3		5.7		
N°30	0.590	10.6		4.2		
N°40	0.426	7.6		3.0	8	20
N°50	0.297	5.4		2.2		
N°80	0.177	3.0		1.2		
N°100	0.149	2.4		1.0		
N°200	0.074	0.9		0.4	2	8
< N°200	FONDO	0.0		0.0		

Fuente: Elaboración propia

La mezcla "C" es descartada por ser la mezcla con mayor diferencia respecto a los husos granulométricos, quedando la elección entre las mezclas "A" y "B" las cuales contienen una baja cantidad de agregado fino en los últimos tamices.

Para lugares donde la mezcla deberá soportar temperaturas bajas, se busca emplear agregados con la mas baja absorción posible, al tratar de evitar el deterioro que puede sufrir el material debido al congelamiento del agua absorbida en el agregado. Considerando los valores de la absorción y la gravedad específica aparente, la mezcla "B" tendría mayor proporción del material con menor peso específico y mayor absorción, lo cual no resulta conveniente para mezclas con poco material fino. De este modo, la combinación que define un mejor equilibrio entre la tendencia al huso granulométrico, la absorción y gravedad específica es la mezcla "A", con un 50% de agregado reciclado y 50% de agregado grueso nuevo.

La figura 4.1 muestra el análisis de la granulometría de manera gráfica, empleando los porcentajes de agregado por cada tamiz correspondientes a la mezcla final.

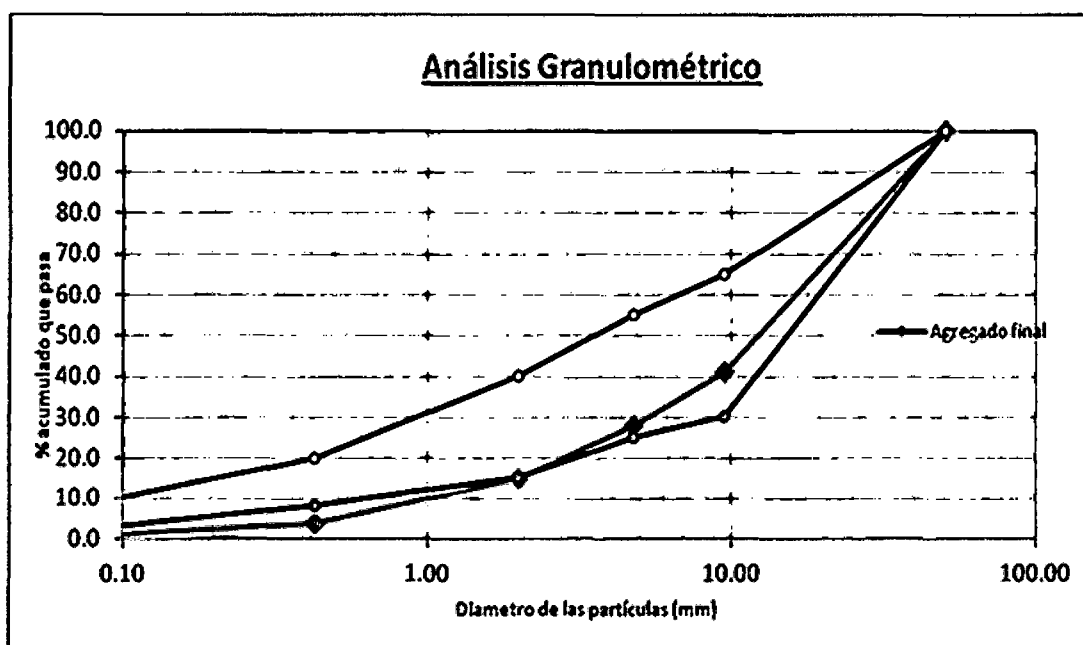


Figura 4.1 Curva granulométrica resultante de la combinación de agregados

Fuente: Informe de ensayo en laboratorio Concar

Al ingresar cada material en la misma proporción, la gravedad específica para la mezcla final resulta del valor promedio de ambos elementos, dando un valor igual a 2.581 g/cm^3 .

Con el agregado final determinado, inicia la selección de la emulsión asfáltica. Debe cumplirse dos criterios básicos para su selección, siendo el primero y de mayor importancia la compatibilidad de la emulsión con la naturaleza del agregado, y luego la elección de la velocidad en la rotura de la emulsión para lograr un reparto homogéneo del asfalto sobre la masa de materiales. La emulsión catiónica de rotura lenta CSS-1h, seleccionada para la investigación, cumple con los criterios establecidos ya que las emulsiones del tipo catiónicas tienen una gran versatilidad para ser empleado con muchos tipos de materiales pétreos, sumándole que al ser de rotura lenta otorga el tiempo apropiado para la mezcla de materiales antes de la rotura.

El cuadro 4.8 presenta los resultados obtenidos en los ensayos realizados para la caracterización de una emulsión diseñada y preparada en laboratorio.

Cuadro 4.8 Caracterización de Emulsión asfáltica

ENSAYO	MÉTODO	RESULTADOS DEL ANALISIS	ESPECIFICACIÓN	
			Mín.	Máx.
VISCOSIDAD SAYBOLT FUROL A 25°C (SFS)	ASTM D 244	27	20	100
ESTABILIDAD AL ALMACENAMIENTO, 24h, %	ASTM D 244	1	–	1
MEZCLA CON CEMENTO, %	ASTM D 244	0.1	–	2
DESTILACIÓN CONTENIDO DE ASFALTO RESIDUAL, %	ASTM D 244	60.74	57	–
PRUEBA DEL TAMIZ N°20, %	ASTM D 244	0.01	–	0.1
CARGA DE PARTICULA	ASTM D 244	POSITIVO	POSITIVO	
ENSAYOS SOBRE EL RESIDUO ASFALTICO				
PENETRACIÓN, a 25°C, 100g, 0.1 mm	ASTM D5-06E1	61.0	40	90
DUCTILIDAD, a 25°C, 5 cm/min, cm	ASTM D 113-99	> 100	40	–
SOLUBILIDAD EN TRICLOROETILENO, %Masa	ASTM D 2042-01	99.9	97.5	–

Fuente: Informe de ensayo en laboratorio Concar

4.1.2. Cálculo del contenido teórico de asfalto.

El contenido de emulsión normalmente varía en relación a la cantidad de agregado nuevo adicional y si se llega a considerar el asfalto del material recuperado. Para el caso en estudio, el asfalto envejecido del RAP no es considerado al haber superado ampliamente su tiempo de vida útil.

El contenido inicial de asfalto residual, denominado CA, es el punto de partida para poder aplicar el método de diseño de mezcla reciclada y, en torno a este valor, se realizan variaciones de 0.5% ó 1%(CA \pm 0.5% o CA \pm 1.0%), estableciendo un rango de valores donde poder encontrar el contenido óptimo.

Según el manual MS-14 del Instituto del Asfalto, para el cálculo del contenido teórico de emulsión se emplea la siguiente expresión:

$$P = (0.05 \times A + 0.1 \times B + 0.5 \times C) \times 0.7 \quad (1)$$

Donde:

P = Porcentaje (*) por peso de emulsión asfáltica, basado en el peso de agregado seco.

A = Porcentaje (*) de agregado retenido en la malla N°8

B = Porcentaje (*) de agregado que pasa la malla N°8 y es retenido en la malla N°200.

C = Porcentaje (*) de agregado que pasa la malla N°200.

(*) Expresado como un número entero.

Empleando los resultados de la granulometría obtenida para la mezcla final y reemplazando los valores en la expresión se obtiene:

$$A = 83, B = 17, C = 0$$

$$P = (0.05 \times 83 + 0.1 \times 17 + 0.5 \times 0) \times 0.7$$

$$P = 4.1 \%$$

Para el cálculo del contenido de asfalto residual está la expresión:

$$CA = \frac{P \times CARE}{100}$$

Donde:

CARE = Contenido de asfalto residual en la emulsión (%)

CA = Contenido de asfalto residual total por peso de mezcla (%)

Haciendo uso del valor obtenido:

$$CA = 4.1 \times 61.5 / 100$$

$$CA = 2.5 \%$$

De acuerdo a las variaciones que se realizan se establece un rango de valores para la aplicación del método:

$$CA - 0.5\% < CA < CA + 0.5\%$$

$$2\% < 2.5\% < 3\%$$

Debido a que inicialmente el agregado no cuenta con ningún ligante asfáltico, se hace necesario considerar el intervalo desde un contenido de asfalto bajo, por lo cual, el rango de valores puede considerarse a partir de 1% como contenido de asfalto residual. Los valores de CA iguales a 1 %, 2 % y 3 % fueron considerados como los valores de diseño para la elaboración de probetas de ensayo, tal como en la figura 4.2.

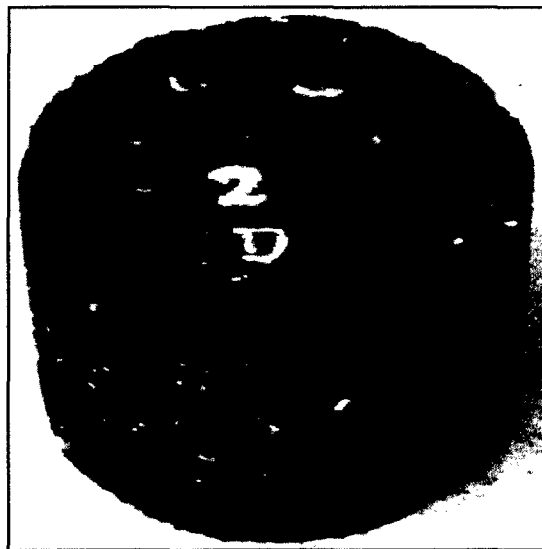


Figura 4.2 Probeta para ensayo

Fuente: Laboratorio de Emulsiones asfálticas de CONCAR

4.1.3. Cálculo del contenido total de agua en la mezcla.

El contenido inicial de agua proviene de la emulsión, la cual aporta un valor igual a 1.1% según los parámetros de diseño, y del contenido de humedad natural que aporta el agregado, obtenido mediante ensayo y dando un resultado igual a 1.0%. Al sumar estas cantidades, se tiene un total de 2.1% de contenido de agua como aporte de los componentes a la mezcla, con lo cual faltaría adicionar el contenido de agua de premezcla.

Al realizar el ensayo de recubrimiento de la emulsión sobre el agregado, se verifica si la emulsión logra un recubrimiento adecuado del agregado antes de la rotura y se obtiene el contenido de agua de premezcla. Variando los contenidos de asfalto residual tentativo de acuerdo a lo establecido, se consideran valores alternativos de agua para la premezcla hasta obtener la cantidad que proporcione un recubrimiento adecuado del material, siendo los valores resultantes mostrados en el cuadro 4.9

Cuadro 4.9 Contenido de agua de premezcla

Asfalto residual en la mezcla (%)	1.0	2.0	3.0
Agua de premezcla (%)	1.5	2.2	2.8

Fuente: Informe de ensayo en laboratorio Concar

Respecto al recubrimiento, la mezcla logra un recubrimiento del 90%, valor que supera al indicado en el manual MS-14 con un 50% como valor mínimo.

El resultado del contenido de agua total para cada contenido de asfalto residual, obtenido de la suma de los valores mencionados anteriormente, se observa en el cuadro 4.10

Cuadro 4.10 Contenido de agua total en la mezcla

Asfalto residual en la mezcla (%)	1.0	2.0	3.0
Agua total en la mezcla (%)	3.6	4.3	4.9

Fuente: Informe de ensayo en laboratorio Concar

Adicionalmente, es importante conocer el contenido de agua (%) óptimo para la compactación. Los valores de humedad con que se compactaron las muestras para ensayo fueron de 1%, 2% y 3%, obteniendo la gráfica mostrada en la figura 4.3 y del cual se desglosa como valor óptimo un 1.9% como contenido de agua para la compactación.

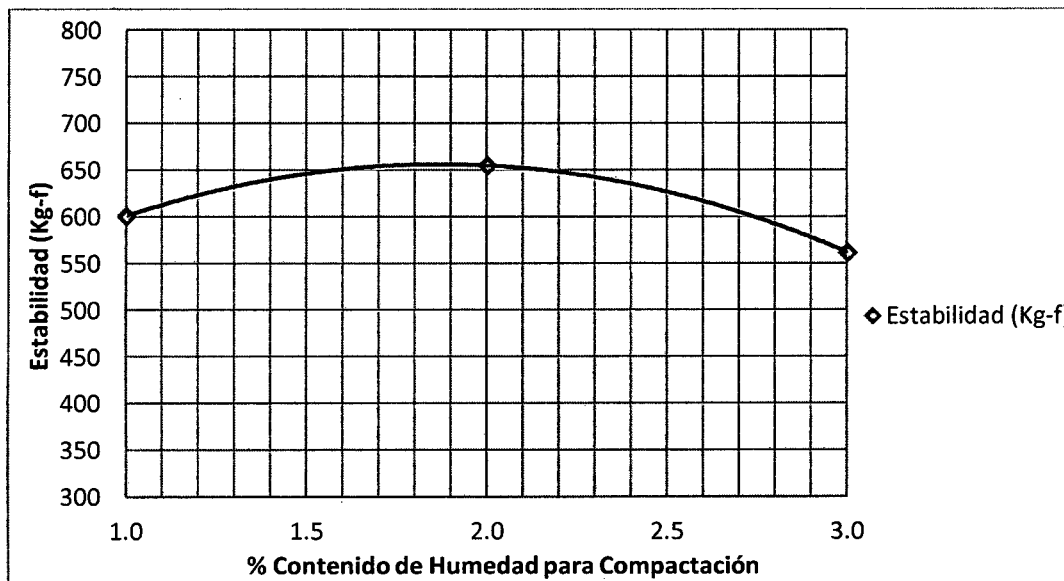


Figura 4.3 Gráfica Estabilidad vs % Cont. humedad para compactación

Fuente: Informe de ensayo en laboratorio Concar

4.1.4. Cálculos y resultados de ensayos en probetas de diseño

Propiedades como la Densidad Específica Bulk y el Contenido de Humedad son calculadas al inicio del proceso. Para el cálculo de la Densidad Bulk (G) se toman datos de cada probeta, elaborada con un determinado contenido de asfalto residual, y emplea la siguiente expresión:

$$G = \frac{D}{F - E} \quad (2)$$

Donde:

D = peso de la probeta seca en el aire (gr)

E = peso de la probeta en el agua (gr)

F = peso en el aire de la probeta saturada y superficialmente seca (SSD) (gr).

En el cuadro 4.11 se encuentran los datos tomados en laboratorio y los valores resultantes de la Densidad Bulk por cada muestra con su respectivo contenido de asfalto.

Cuadro 4.11 Resultados Densidad Bulk

Contenido de asfalto		Peso de probeta en aire, en gr. (D)	Peso de probeta en agua, en gr. (E)	Peso de probeta SSD, en gr. (F)	Densidad Bulk, gr/cm ³ (G)
1%	M.1	1090.8	595.3	1142.3	1.994
	M.2	1101.2	600.0	1150.6	2.000
2%	M.1	1118.1	608.0	1169.3	1.992
	M.2	1108.1	604.0	1157.0	2.004
3%	M.1	1124.4	606.3	1169.2	1.998
	M.2	1127.3	606.0	1175.5	1.979

Fuente: Informe de ensayo en laboratorio Concar

Para el cálculo del contenido de humedad (K), la expresión matemática empleada es la siguiente:

$$K(\%) = \frac{(H - I) - (F - D)}{I} \times (100 + A) \quad (3)$$

Donde:

A = % Contenido de asfalto residual en la probeta

H = Peso de la muestra húmeda, gr. (De ensayo de contenido de humedad)

I = peso de la muestra seca, gr. (Del ensayo de contenido de humedad)

D = Peso de la probeta seca al aire. (Del ensayo de densidad bulk)

F = Peso de probeta saturada superficialmente seca. (Del ensayo de densidad bulk)

Los valores para el contenido de humedad de cada muestra, en estado seco o saturado, son indicados en el cuadro 4.12

Cuadro 4.12 Resultados del contenido de humedad

Contenido de Asfalto (A)			Peso de muestra húmeda, en gr. (H)	Peso de muestra seca, en gr. (I)	Peso de probeta SSD, en gr. (F)	Peso de probeta en aire, en gr. (D)	Contenido de humedad, % (K)
1%	Seco	M.1	1142.3	1079.0	1142.3	1090.8	1.1
		M.2	1150.6	1092.9	1150.6	1101.2	0.8
	Saturado	M.3	1178.1	1091.8	0.0	0.0	8.0
		M.4	1177.7	1093.0	0.0	0.0	7.8
2%	Seco	M.1	1169.3	1111.0	1169.3	1118.1	0.7
		M.2	1157.0	1098.7	1157.0	1108.1	0.9
	Saturado	M.3	1161.9	1107.5	0.0	0.0	5.0
		M.4	1162.3	1106.5	0.0	0.0	5.1
3%	Seco	M.1	1169.2	1115.8	1169.2	1124.4	0.8
		M.2	1175.5	1118.7	1175.5	1127.3	0.8
	Saturado	M.3	1162.7	1109.7	0.0	0.0	4.9
		M.4	1159.1	1109.6	0.0	0.0	4.6

Fuente: Informe de ensayo en laboratorio Concar

Existe cierto contenido de humedad que termina siendo absorbida al pasar del estado seco al estado saturado. Este valor es conocido como Humedad absorbida y utiliza la siguiente expresión:

$$\text{Humedad - absorbida, (\%)} = \frac{K_1 + K_2}{2} - \frac{K_3 + K_4}{2} \quad (4)$$

Donde:

Kn = Valor del contenido de humedad de la muestra "n" para un determinado contenido de asfalto, expresado en porcentaje.

Los resultados obtenidos para la humedad absorbida son indicados en el cuadro 4.13.

Cuadro 4.13 Resultados % Humedad Absorbida

Contenido de emulsión	Seco		Saturado		% Humedad absorbida
	K1	K2	K3	K4	
1 %	1.1	0.8	8.0	7.8	- 7.0
2 %	0.7	0.9	5.0	5.1	- 4.3
3 %	0.8	0.8	4.9	4.6	- 4.0

Fuente: Informe de ensayo en laboratorio Concar

Definido los valores de la densidad bulk y el contenido de humedad de las muestras en estado seco, se logra obtener los resultados de la Densidad seca Bulk, abreviado como Gd, mostrados en el cuadro 4.14 y calculados con la expresión:

$$Gd = G \times \frac{(100 + A)}{(100 + A + K)} \quad (5)$$

Donde:

G = Densidad Bulk

A = Contenido de asfalto residual en la probeta (%)

K = Contenido de humedad de la muestra (%)

Cuadro 4.14 Resultados Densidad Seca Bulk

Contenido de Emulsión (A)		Contenido de humedad, % (K)	Densidad Bulk, gr/cm ³ (G)	Densidad Seca Bulk, gr/cm ³ (Gd)
1%	M.1	1.1	1.994	1.973
	M.2	0.8	2.000	1.985
2%	M.1	0.7	1.992	1.979
	M.2	0.9	2.004	1.987
3%	M.1	0.8	1.998	1.982
	M.2	0.8	1.979	1.964

Fuente: Informe de ensayo en laboratorio Concar

Haciendo uso de la información obtenida, respecto al Contenido de Humedad y la Densidad Bulk, el proceso continúa con un análisis de vacíos de las muestras, siendo tres los tipos de valores considerados para el análisis: la cantidad máxima de vacíos, los vacíos de aire y los vacíos en el agregado mineral.

Empleando la siguiente expresión se obtiene el Máximo total de vacíos (V), cuyo valor es expresado en porcentaje:

$$V(\%) = \left[\left(\frac{100 + A + K}{G} - \frac{100}{C} - \frac{A}{B} \right) \div \left(\frac{100 + A + K}{G} \right) \right] \times 100 \quad (6)$$

Donde:

A = Contenido de asfalto residual en la probeta (%)

B = gravedad específica del asfalto.

C = gravedad específica aparente del agregado

G = Densidad Bulk

K = Contenido de humedad (%)

Los valores obtenidos como el Máximo total de vacíos (%) se encuentran en el cuadro 4.15.

Cuadro 4.15 Resultados del Máximo total de vacíos

Contenido de Emulsión, % (A)		Gravedad específica del asfalto (B)	Gravedad específica aparente del agregado (C)	Densidad Bulk (G)	Contenido de Humedad (K)	Máximo total de vacíos, % (V)
1%	M.1	1.01	2.581	1.994	1.1	22.4
	M.2			2.000	0.8	21.9
2%	M.1	1.01	2.581	1.992	0.7	20.9
	M.2			2.004	0.9	20.6
3%	M.1	1.01	2.581	1.998	0.8	19.7
	M.2			1.979	0.8	20.4

Fuente: Informe de ensayo en laboratorio Concar

Luego de haber obtenido el valor del máximo total de vacíos, puede calcularse el contenido de vacíos de aire haciendo uso de la siguiente expresión:

$$\text{Vacíos - aire, (\%)} = V - \left[\left(\frac{K \times 100}{L} \right) \div \left(\frac{100 + A + K}{G} \right) \right] \quad (7)$$

Donde:

V = máximo total de vacíos (%)

K = Contenido de humedad (%)

L = gravedad específica del agua (gr/cm³)

A = Contenido de asfalto residual en la probeta (%)

G = Densidad Bulk (gr/cm³)

En el cuadro 4.16 se encuentran los valores obtenidos con ayuda de la expresión mencionada anteriormente.

Cuadro 4.16 Resultados del % Contenido de vacíos de aire

Contenido de Emulsión, % (A)		Gravedad específica del agua (L)	Densidad Bulk (G)	Contenido de Humedad (K)	Máximo total de vacíos, % (V)	Vacíos de aire, %
1%	M.1	1.00	1.994	1.1	22.4	20.2
	M.2		2.000	0.8	21.9	20.4
2%	M.1	1.00	1.992	0.7	20.9	19.7
	M.2		2.004	0.9	20.6	18.9
3%	M.1	1.00	1.998	0.8	19.7	18.2
	M.2		1.979	0.8	20.4	18.9

Fuente: Informe de ensayo en laboratorio Concar

Como parte del análisis de vacíos, se considera el cálculo del contenido de vacíos en el agregado mineral obtenido al hacer uso de la siguiente expresión:

$$VMA, (\%) = \left[\left(\frac{100 + A + K}{G} - \frac{100}{C} \right) \div \left(\frac{100 + A + K}{G} \right) \right] \times 100 \quad (7)$$

¶

Donde:

A = Contenido de asfalto residual en la probeta (%)

C = gravedad específica aparente del agregado (gr/cm³)

G = Densidad Bulk (gr/cm³)

K = Contenido de humedad (%)

Los resultados del Contenido de Vacíos en el agregado mineral (%) se encuentran en el cuadro 4.17

Cuadro 4.17 Resultados del % Contenido de vacíos en agregado mineral

Contenido de Emulsión, % (A)		Gravedad específica aparente del agregado (C)	Densidad Bulk (G)	Contenido de Humedad (K)	V.M.A., %
1%	M.1	2.581	1.994	1.1	24.3
	M.2		2.000	0.8	23.8
2%	M.1	2.581	1.992	0.7	24.8
	M.2		2.004	0.9	24.5
3%	M.1	2.581	1.998	0.8	25.4
	M.2		1.979	0.8	26.1

Fuente: Informe de ensayo en laboratorio Concar

Otro dato importante en el resultado final, es la información de la Estabilidad y Flujo de la mezcla al ser sometida a un determinado esfuerzo, ya sea en estado seco o saturado. Por medio de ensayos realizados con el equipo Marshall, se obtienen los resultados presentados en el cuadro 4.18

Cuadro 4.18 Resultados de Estabilidad y Flujo

Contenido de Emulsión		Flujo, mm	Estabilidad, Kg-f	
1%	Seco	M.1	4.1	805
		M.2	3.8	853
	Saturado	M.3	2.5	641
		M.4	3.0	676
2%	Seco	M.1	5.1	719
		M.2	3.8	740
	Saturado	M.3	3.3	762
		M.4	3.0	654
3%	Seco	M.1	4.6	567
		M.2	5.1	697
	Saturado	M.3	3.3	654
		M.4	3.8	554

Fuente: Informe de ensayo en laboratorio Concar

El valor de la estabilidad es sometida a una corrección mediante un factor, indicado en la tabla 4.1, el cual varía de acuerdo al volumen de la muestra.

Tabla 4.1 Factor de corrección

Volumen de la muestra cm ³	Espesor aproximado de la muestra.		Factor de corrección
	mm.	in.	
457-470	57.2	2 ¼	1.19
471-482	58.7	2 5/16	1.14
483-495	60.3	2 3/8	1.09
496-508	61.9	2 7/16	1.04
509-522	63.5	2 1/2	1.00
523-535	64.0	2 9/16	0.96
536-546	65.1	2 5/8	0.93
547-559	66.7	2 11/16	0.89
560-573	68.3	2 3/4	0.86

Fuente: Manual MS-14 del Instituto del Asfalto

Con el empleo de los factores mostrados en la tabla anterior, se realiza la corrección del valor de la estabilidad y los resultados son presentados en el cuadro 4.19.

Cuadro 4.19 Resultados de Estabilidad corregida

Contenido de Emulsión (A)			Estabilidad, Kg-f	Volumen de probeta, cm ³	Factor de corrección	Estabilidad corregida, Kg-f (S)
1%	Seco	M.1	805	547.0	0.93	749
		M.2	853	550.6	0.93	793
	Saturado	M.3	641	556.8	0.89	570
		M.4	676	550.4	0.89	601
2%	Seco	M.1	719	561.3	0.86	618
		M.2	740	553.0	0.89	659
	Saturado	M.3	762	561.9	0.86	655
		M.4	654	547.7	0.89	582
3%	Seco	M.1	567	562.9	0.86	488
		M.2	697	569.5	0.86	600
	Saturado	M.3	654	561.6	0.86	562
		M.4	554	559.6	0.89	493

Fuente: Informe de ensayo en laboratorio Concar

La estabilidad muestra una disminución en su valor al pasar del estado seco al saturado. Esta disminución es conocida como pérdida de estabilidad cuyo valor es indicado en porcentaje y se calcula con la expresión:

$$\% \text{pérdida} - \text{estabilidad} = \frac{\frac{S_1 + S_2}{2} - \frac{S_3 + S_4}{2}}{\frac{S_1 + S_2}{2}} \times 100 \quad (8)$$

Donde:

S_n = Valor de la Estabilidad en la muestra "n" para un determinado contenido de asfalto, expresado en porcentaje.

Los resultados mostrados en el cuadro 4.20 pertenecen a la pérdida de estabilidad por cada contenido de emulsión.

Cuadro 4.20 Resultados de la Pérdida de Estabilidad

Contenido de emulsión	Seco		Saturado		% Pérdida de Estabilidad
	S1	S2	S3	S4	
1 %	749	793	570	601	24.0
2 %	618	659	655	582	3.1
3 %	488	600	562	493	2.9

Fuente: Informe de ensayo en laboratorio Concar

4.2. ANÁLISIS DE PROPIEDADES EN LA MEZCLA ASFÁLTICA

Los valores obtenidos en los ensayos, realizados para determinar propiedades de la mezcla, son representados y analizados gráficamente.

Como punto de partida para el análisis, se evalúa un primer gráfico donde son representados los valores de Estabilidad modificada en estaso seco y húmedo vs. el contenido de asfalto residual, dando origen a la Figura 4.4

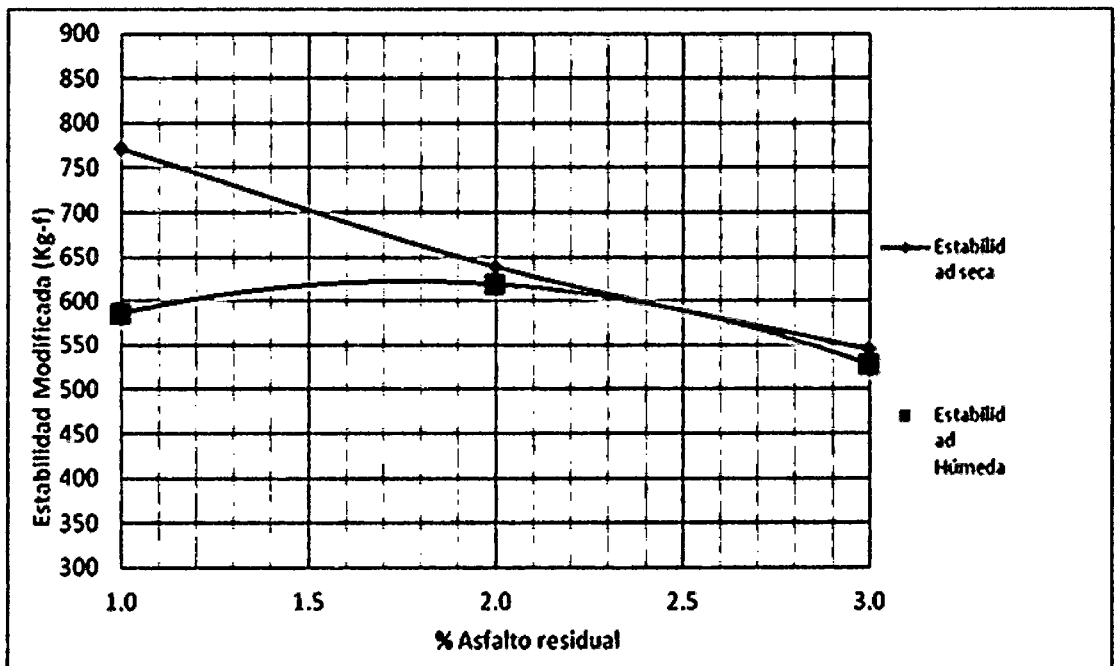


Figura 4.4 Gráfica Estabilidad Húmeda y Seca vs. Contenido Asfalto (%)

Fuente: Informe de ensayo en laboratorio Concar

El valor buscado de estabilidad para la mezcla asfáltica es aquel que proporciona la mayor estabilidad en condición húmeda, por ser el caso más desfavorable entre los dos estados, sin descuidar otro factor importante como la pérdida de estabilidad.

Analizando el gráfico y comparando los resultados obtenidos de la Estabilidad húmeda contra la Estabilidad seca, la estabilidad llega a presentar un valor máximo en el rango establecido para el contenido de asfalto residual, lo cual comprueba que no es necesario aumentar el rango mas alla del 3% de contenido, además se observa una menor pérdida de estabilidad para los valores comprendidos en el rango de 1.5% a 2.4%, corroborándose la información con ayuda del gráfico de la Figura 4.5

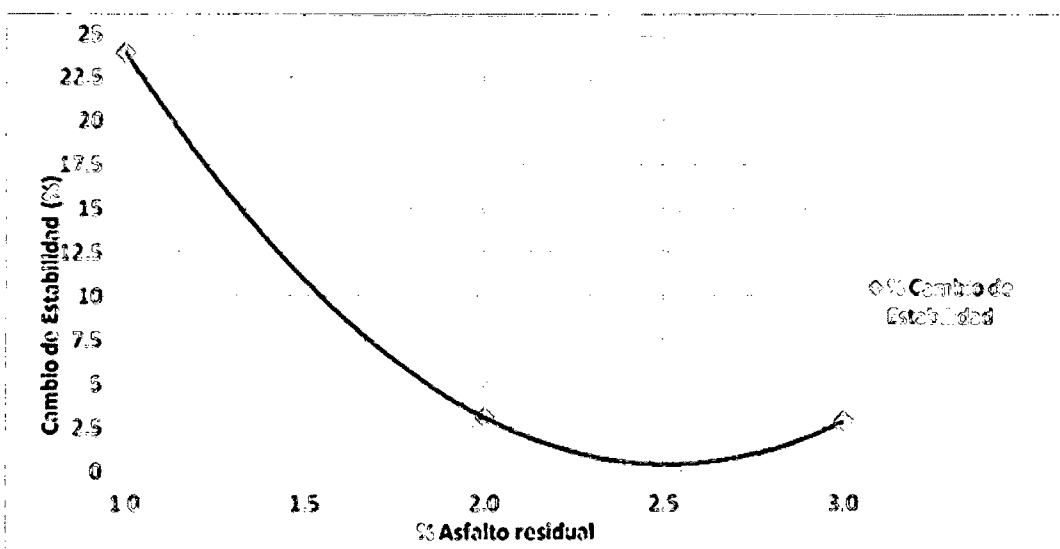


Figura 4.5 Gráfica Pérdida Estabilidad(%) vs Asfalto Residual(%)

Fuente: Informe de ensayo en laboratorio Concar

Considerando el rango de resultados donde se encuentra el valor máximo de la Estabilidad húmeda, el intervalo de contenido óptimo se reduce a los que están comprendidos entre 1.6% y 2.0 % de contenido de asfalto, teniendo su punto más alto para un contenido de asfalto residual de 1.8%. Dicho valor viene a ser, según gráfico, el valor óptimo para obtener la estabilidad húmeda máxima.

En base a estas cantidades es desarrollado el cuadro 4.21 con los resultados numéricos del análisis.

Cuadro 4.21 Resultados Estabilidad vs. Asfalto residual (%)

% Asfalto Residual	Estabilidad húmeda (Kg-f)	Estabilidad Seca (Kg-f)	% Pérdida de Estabilidad
1.6	621.3	688.9	9.1
1.8	622.8	664.8	5.9
2.0	619.5	641.8	3.4

Fuente: Informe de ensayo en laboratorio Concar

La evaluación continúa con las otras propiedades evaluadas, corroborando que el contenido óptimo de asfalto establecido sea tal que al entrar en los siguientes gráficos (Vacíos totales, Densidad Seca Bulk y Humedad Absorbida), cumpla con parámetros de diseño establecidos. Por esta razón, en la evaluación se determina el valor numérico para cada propiedad dentro del intervalo establecido.

Para el caso del contenido máximo de vacíos totales (VTM) en la mezcla asfáltica, su valor disminuye con el incremento en el contenido de asfalto residual, como se observa en la gráfica de la figura 4.6

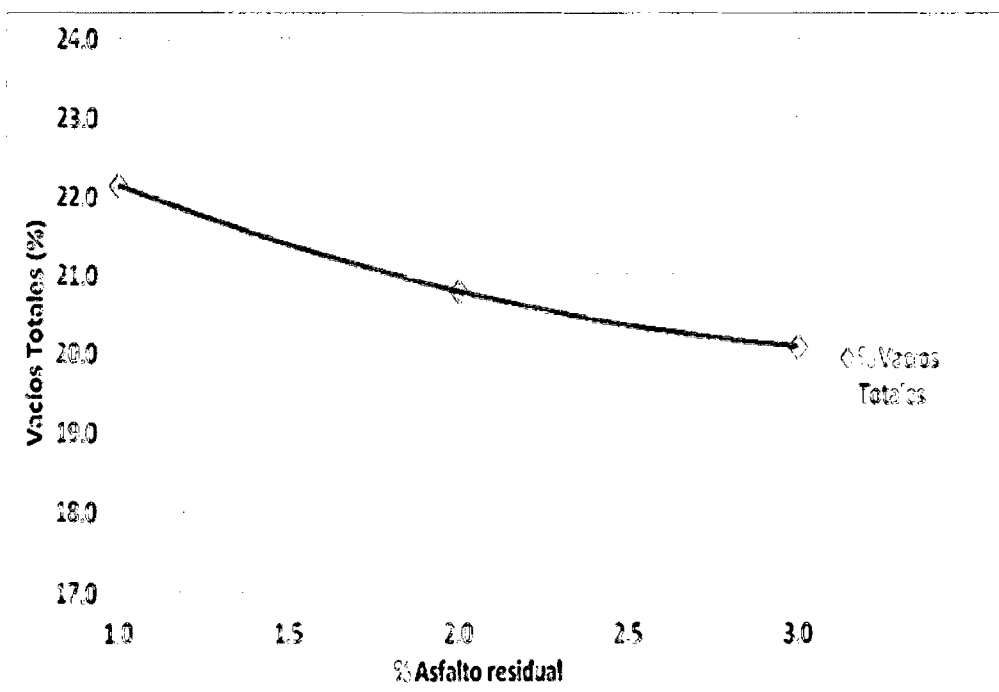


Figura 4.6 Resultado Gráfico Vacíos totales(%) vs Asfalto Residual(%)

Fuente: Informe de ensayo en laboratorio Concar

En base al último intervalo establecido en el ensayo de estabilidad para encontrar el contenido óptimo, se estiman los resultados del máximo total de vacíos en el cuadro 4.22

Cuadro 4.22 Resultados Vacíos totales(%) vs. Asfalto residual(%)

% Asfalto Residual	% Vacíos totales
1.6	21.3
1.8	21.0
2.0	20.8

Fuente: Informe de ensayo en laboratorio Concar

Un aspecto importante a conocer es el valor de la humedad absorbida. Esta propiedad, representada gráficamente en la figura 4.7, disminuye hasta cierto punto su valor a medida que el contenido de asfalto residual aumenta, siendo este el caso para el intervalo considerado anteriormente.

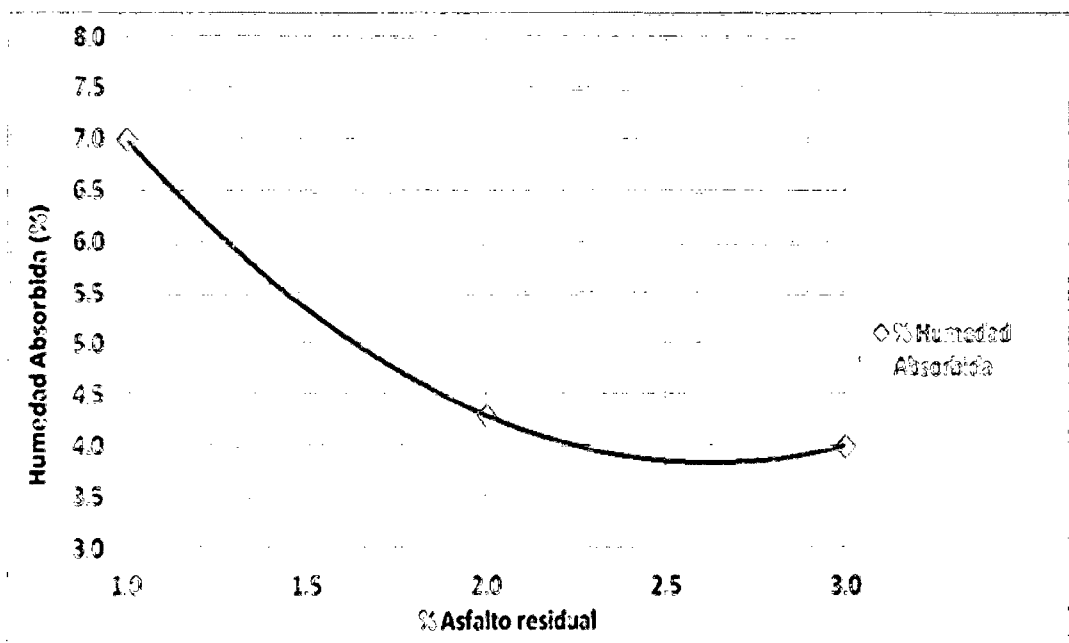


Figura 4.7 Resultado Gráfica Humedad Absorbida(%) vs Asfalto Residual(%)

Fuente: Informe de ensayo en laboratorio Concar

De la gráfica se estiman los valores mostrados en el cuadro 4. 23.

Cuadro 4.23 Resultados Humedad absorbida(%) vs Asfalto residual(%)

Asfalto residual (%)	Humedad Absorbida (%)
1.6	5.1
1.8	4.7
2.0	4.4

Fuente: Informe de ensayo en laboratorio Concar

Otro aspecto considerado en el estudio fue la Densidad seca Bulk, cuyo gráfico se observa en la figura 4.8.

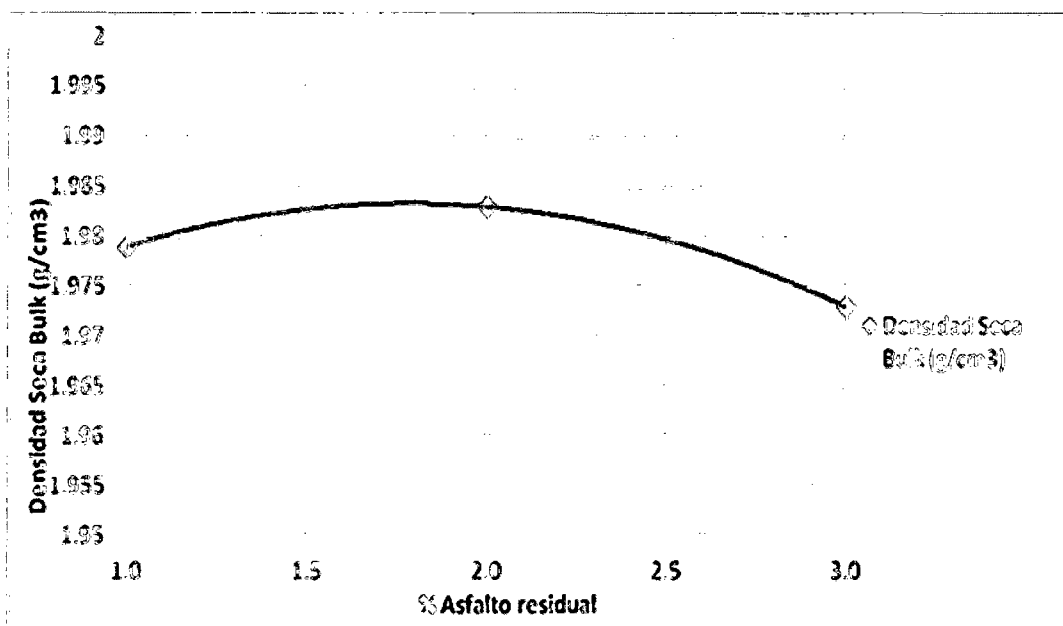


Figura 4.8 Resultado Gráfica Densidad Seca Bulk vs Asfalto residual (%)

Fuente: Informe de ensayo en laboratorio Concar

Considerando el valor óptimo del contenido de asfalto residual, el cuadro 4.24 muestra los resultados de la Densidad seca Bulk, corregida por humedad.

Cuadro 4.24 Resultados Densidad Seca Bulk vs Asfalto residual (%)

Asfalto residual (%)	Densidad Seca Bulk (g/cm ³)
1.6	1.983
1.8	1.984
2.0	1.983

Fuente: Informe de ensayo en laboratorio Concar

4.3. CÁLCULO DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO

De lo mencionado en el apartado anterior, el contenido óptimo de asfalto residual es elegido como el que proporciona la estabilidad húmeda máxima, pero se ajusta su valor dependiendo del cumplimiento de las especificaciones de mezcla respecto a la humedad absorbida, pérdida de estabilidad(%), vacíos totales y el recubrimiento del agregado, inspeccionado de manera visual. Este valor debe cumplir primero con el requisito mínimo de estabilidad, de lo contrario la mezcla se rechaza.

De los resultados obtenidos, se determinó que el valor de 1.8% era el valor máximo de estabilidad húmeda, por lo tanto, es considerado como el contenido óptimo de asfalto residual en la mezcla(%) y, para poder determinar su cumplimiento junto a otros parámetros, se evaluó el comportamiento que presentaría la mezcla con ayuda de las gráficas al usar los valores de 1.6%, 1.8% y 2.0%, presentando en el cuadro 4.25 un resumen de los resultados para cada propiedad.

Cuadro 4.25 Resumen de resultados variando asfalto residual(%)

Características Marshall Modificado	Asfalto residual(%)		
	1.6	1.8	2.0
Densidad Seca Bulk (gr/cm3)	1.983	1.984	1.983
Estabilidad Seca (Kg-f)	688.9	664.8	641.8
Estabilidad Húmeda (Kg-f)	621.3	622.8	619.5
Cambios de Estabilidad (%)	9.1	5.9	3.4
Vacios totales (%)	21.3	21.0	20.8
Humedad Absorbida (%)	5.1	4.7	4.4

Fuente: Informe de ensayo en laboratorio Concar

Comparando los parámetros indicados en el Manual Series N°14 del Instituto del Asfalto con los datos obtenidos para el valor óptimo de asfalto residual igual a 1.8%, se tiene el cuadro 4.26.

Cuadro 4.26 Comparación con parámetros del MS-14

Parámetro	Mínimo	Máximo	Resultado	
			Valor	Estado
Estabilidad (Kg-f)	227	--	622.8	Sí cumple
Cambio de estabilidad (%)	--	50	5.9	Sí cumple
Revestimiento (%)	50	--	90.0	Sí cumple

Fuente: Manual MS-14 del Instituto del Asfalto.

Estos parámetros también están indicados en la Tabla F-3 de la sección 424 del capítulo 4 "Pavimentos Flexibles" en el Manual de Carreteras del MTC EG-2013.

De acuerdo a esta información, queda establecido el valor de 1.8 % como el contenido óptimo de asfalto residual en la mezcla. Para el diseño de mezcla, es necesario expresar este valor como contenido de emulsión en la mezcla, por lo

tanto, al ser la cantidad de asfalto residual en la emulsión igual al 61.5%, el contenido óptimo de emulsión asfáltica en la mezcla será igual a 2.9 % del peso de los agregados.

Los valores finales para el diseño de mezcla reciclada en frío quedarían establecidos según se indica en el cuadro 4.27.

Cuadro 4.27 Diseño de mezcla con emulsión y material reciclado

DISEÑO DE MEZCLA RECICLADA EN FRÍO	
1.- MEZCLA DE AGREGADOS (PORCENTAJE EN PESO)	
Cantera Huillque (Km 916+000)	50%
Fresado de pavimento existente	50%
2.- LIGANTE ASFÁLTICO	
Tipo de emulsión asfáltica	Catiónica CSS-1h
% óptimo de emulsión asfáltica	2.9
% óptimo de asfalto residual	1.8
3.- AGUA	
% de humedad natural	1.0
% de agua en la emulsión	1.1
% de agua de pre-mezcla	2.0
% de agua total en la mezcla	4.1
% de agua de compactación	1.9

Fuente: Informe de ensayo en laboratorio Concar

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

Realizado el estudio, se obtienen las siguientes conclusiones:

- De acuerdo a la evaluación de la granulometría del agregado reciclado, el material no cumple con los husos granulométricos para una granulometría tipo "A" debido a la falta de agregado grueso en su composición, por lo tanto, no puede ser utilizado como único material pétreo en la mezcla asfáltica.
- La combinación de agregado reciclado con agregado grueso nuevo, en este caso piedra chancada, corrige la granulometría final y logra cumplir con las mismas exigencias que se plantean para una mezcla convencional al emplear por cada material un 50% del contenido total. La granulometría de esta mezcla proporciona un bajo valor de absorción y una gravedad específica adecuada e igual a 2.581 g/cm³, propiedades importantes debido a la baja cantidad de material fino en comparación a los husos granulométricos planteados.
- La emulsión a emplear tiene que ser del tipo catiónica CSS-1h, de esta manera se logra evitar problemas de adherencia que puedan originarse en el momento de la mezcla, debido a la presencia de dos materiales de diferentes procedencias. Con el resultado del ensayo de recubrimiento, empleado para determinar la adherencia de la emulsión con el agregado, se logra un buen resultado al cumplir con la especificación mínima que indica el manual MS-14, obteniendo un recubrimiento del 90%.
- En los gráficos desarrollados, el mayor valor para la estabilidad húmeda se obtiene con cantidades de contenido de asfalto residual en el rango de 1.6% y 2%, teniendo dicha estabilidad su máximo valor para un 1.8 %, siendo considerando este valor como el contenido óptimo de asfalto residual. Las cantidades menores a 1.6% de asfalto residual no son aceptadas ya que se observan valores altos para la pérdida de estabilidad y la humedad absorbida en la mezcla. Tampoco se debe emplear cantidades mayores a 2% de asfalto residual debido a que tanto la estabilidad seca como la estabilidad húmeda

muestran sus valores más bajos respecto a los resultados obtenidos en el rango de 1.6% y 2% de asfalto residual.

- Los resultados de estabilidad, obtenidos para el contenido óptimo de asfalto residual, cumplen ampliamente con los valores mínimos y máximos tomados como parámetros del manual MS-14 del Instituto del Asfalto, el cual toma como valor mínimo de estabilidad la cantidad de 227 Kg-f para mezclas en frío y el resultado obtenido del estudio es de 622.8 Kg-f con una pérdida de estabilidad de solo 5.9 %, lo cual indica que la pérdida de cohesión de la mezcla asfáltica por acción del agua es baja.
- El mismo resultado se obtiene para la evaluación de resultados si se toma como referencia los parámetros del Manual de Carreteras EG-2013, el cual indica los mismos valores límites basándose en el Manual MS-14 del Instituto del Asfalto y no cuenta con parámetros que resulten de estudios realizados de acuerdo a nuestra realidad. Por ejemplo, la estabilidad de la mezcla resulta elevada en comparación al valor mínimo, por lo que podría considerarse como parámetro un valor límite mayor. También se necesita establecer parámetros propios para mejorar el % vacíos totales que deben tener las mezclas asfálticas en frío, ya que este parámetro es importante en lugares donde se produzca mayor variación de temperatura (zonas de temperaturas elevadas y temperaturas bajas).
- Con el contenido óptimo de asfalto residual establecido, el contenido de emulsión asfáltica que debe tener la mezcla asfáltica para trabajar con el agregado reciclado es de 2.9 %.

5.2. RECOMENDACIONES

Algunas recomendaciones a considerar para futuros estudios relacionados al tema abarcado:

- Es recomendable obtener muestras representativas del pavimento antes de ser fresado y poder observar las características que presenta el material después del proceso mecánico realizado.
- Existen estudios donde el asfalto del pavimento es recuperado y reutilizado. Para los casos donde el pavimento ha superado su tiempo de vida útil, se recomienda que el material asfáltico proveniente del RAP no sea reutilizado debido a que el asfalto está envejecido y sus propiedades no cumplirían con las especificaciones respectivas.
- Es recomendable que el agregado de adición tenga características mineralógicas similares a las del agregado que se recicla con el fin de evitar que el ligante tenga diferente adhesividad con cada uno de los componentes.
- Las ventajas que se presentan, tanto económicas como medioambientales, hacen que esta técnica deba seguir siendo estudiada en diversos proyectos que ayuden a fomentarla y a desarrollar las mejoras necesarias para poder establecer una metodología de trabajo normalizada.

BIBLIOGRAFÍA

1. ARRA. 2001. Basic Asphalt Recycling Manual. U.S. Department of Transportation, Estados Unidos.
2. ASPHALT INSTITUTE. 1997. Asphalt Cold Mix Manual; Manual Series N°14 (MS-14). Estados Unidos.
3. ASPHALT INSTITUTE. 1993. Manual básico de Emulsiones Asfálticas; Manual Series N°19. Estados Unidos.
4. BOTASSO, H; CUATTROCCHIO, A; REBOLLO, O.; SOENGAS, C. 2008. Reciclado de pavimentos asfálticos en frío; Una forma de utilizar totalmente el RAP para el mantenimiento y rehabilitación de la red caminera. Lemac, Centro de investigaciones viales Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional La Plata. Buenos Aires, Argentina.
5. DEL ÁGUILA, P. 1999. Experiencias sobre el diseño y criterios para la construcción de pavimentos en zonas de altura; X Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto realizado en Sevilla, España.
6. DELGADO A., H.; GARNICA A., P.; GÓMEZ L., J.; ROMERO, S.; ALARCÓN O., H. 2004. Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas. Instituto mexicano del transporte, Publicación técnica Nro. 246. Sanfandila, México.
7. DELGADO A., H.; GARNICA A., P.; VILLATORO M., G.; RODRÍGUEZ O., G. 2006. Influencia de la granulometría en las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica. Instituto mexicano del transporte, Publicación técnica Nro. 299. Sanfandila, México.
8. EAPA. 2009. Asphalt in figures. European Asphalt Pavement Association.
9. EAPA. 2010. Asphalt in figures. European Asphalt Pavement Association.
10. EAPA. 2011. Asphalt in figures. European Asphalt Pavement Association.

11. EAPA. 2012. Asphalt in figures. European Asphalt Pavement Association.
12. MTC. 2013. Manual de Carreteras: Especificaciones Técnicas Generales para Construcción (EG-2013). Lima, Perú.
13. FERNÁNDEZ L., V. 2012. Reciclado en frío de pavimentos flexibles, con el uso de emulsiones asfálticas catiónicas. Tesis para optar el grado de Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú.
14. GUEVARA P., M.; MENDEZ D., H.; PIMENTEL G., J. 2010. Diseño de mezclas asfálticas densas en frío basado en el Método Marshall modificado de la universidad de Illinois. Tesis para optar título de Ingeniero Civil, Universidad de El Salvador.
15. HERNÁNDEZ Z., G. 2011. Diversificación en el uso de emulsiones de asfalto modificado (PME) para rehabilitación de pavimentos; XVI Congreso Ibero – Latinoamericano del Asfalto. Río de Janeiro, Brasil.
16. MARCHAN M., R. 2005. Métodos de rehabilitación en pavimentos. Tesis para optar título de Ingeniero Civil, Escuela superior de Ingeniería y Arquitectura del Instituto Politécnico Nacional. México D.F.
17. MERCADO, R; BRACHO, C.; AVENDAÑO, J. 2008. Emulsiones asfálticas; Usos y Rompimiento. Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería Química. Venezuela.
18. MONTEJO F., A. 2008. Ingeniería de pavimentos para carreteras; Evaluación estructural, obras de mejoramiento y nuevas tecnologías. Universidad Católica de Colombia. Bogotá – Colombia.
19. QUESADA V., I. 2004. Evaluación del comportamiento de diferentes tramos de carretera rehabilitados utilizando mezclas recicladas en frío. Departamento de Infraestructuras, Transporte y Territorio de la Universidad Politécnica de Cataluña. España.

20. RODRÍGUEZ T., R.; CASTAÑO M., V.; MARTÍNEZ M., M. 2001. Emulsiones asfálticas. Instituto mexicano del transporte, Documento técnico Nro. 23. Sanfandila, México.
21. THENOUX Z., G.; GARCÍA S., G. 1999. Estudio de técnicas de reciclado en frío: Primera Parte. Revista Ingeniería de Construcción N°20. Santiago, Chile.
22. THENOUX Z., G.; GARCÍA S., G. 2000. Estudio de técnicas de reciclado en frío: Tercera Parte; Diseño de mezclas recicladas en frío en base a emulsiones. Revista Ingeniería de Construcción, Volumen 16 N°1. Santiago, Chile.
23. WIRTGEN GMBH. 2010. Wirtgen Manual de Reciclado en Frío. Windhagen, Alemania.
24. ZAMBRANO M., M. 2011. Caracterización de una emulsión asfáltica catiónica modificada para su empleo en micro-aglomerados en frío. Tesis Mg. Obras Viales, Universidad Técnica de Manabí, Centro de estudios de Posgrado. Manabí, Ecuador.

ANEXO I

CERTIFICADOS

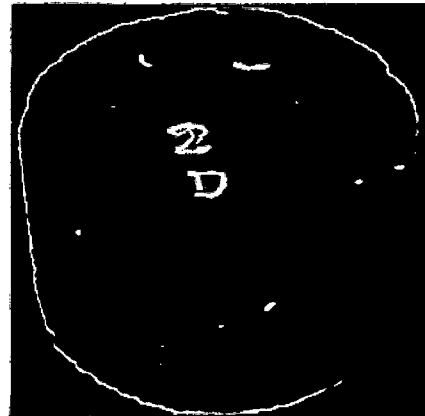
**INFORME DE ENSAYO
DISEÑO TENTATIVO DE ESTABILIZACIÓN DE SUELOS
MÉTODO ILLINOIS - MARSHALL MODIFICADO
(RESUMEN)**

SOLICITANTE : CONCAR S.A. **UBICACIÓN** : CUZCO
PROYECTO
REFERENCIA : Base estabilizada con Emulsión asfáltica (Tramo 3)
FECHA DE RECEPCIÓN : 25.10.12

1.- MEZCLA DE AGREGADOS (PORCENTAJES EN PESO)

CANTERA HUILLQUE (Km 916+000) : 50%
 FRESADO DE PAVIMENTO EXISTENTE : 50%

Foto de molde del % teórico de asfalto



2.- LIGANTE BITUMINOSO

Tipo de emulsión asfáltica : EMULTEC CSS-1h
 % optimo de emulsión asfáltica : 2,9
 % optimo de asfalto residual : 1,8

3.- AGUA

% de humedad natural : 1,0
 % de agua en la emulsión : 1,1
 % de agua de pre- mezcla : 2,0
 % de agua total en la mezcla : 4,1
 % de agua de compactación : 1,9

4.- CARACTERÍSTICAS MARSHALL MODIFICADO

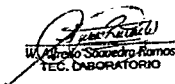
Nº DE GOLPES		50	
% DE EMULSIÓN ASFÁLTICA (% EN PESO DE LOS AGREGADOS)	2,6	2,9	3,3
ASFALTO RESIDUAL (% EN PESO DE LOS AGREGADOS)	1,6	1,8	2,0
DENSIDAD SECA BULK (g/cm3)	1,983	1,984	1,983
ESTABILIDAD MODIFICADA SECA (kg), (22.2 °C)	688,9	664,8	641,8
ESTABILIDAD MODIFICADA HÚMEDA (kg), (22.2 °C)	621,3	622,8	619,5
CAMBIOS DE ESTABILIDAD (%)	9,1	5,9	3,4
VACÍOS TOTALES (%)	21,3	21,0	20,8
HUMEDAD ABSORBIDA (%)	5,1	4,7	4,4
REVESTIMIENTO (%)	--	90,0	--
DESPRENDIMIENTO % RETENIDO	--	+95	--

4.- TEMPERATURA DE APLICACIÓN (°C)

Temperatura de agregados : 22,2 °C
 Temperatura de emulsión asfáltica : 22,2 °C

OBSERVACIONES :

- (1) La granulometría obtenida en este diseño esta en el limite de las tolerancias (granulometría abierta) lo que conlleva a contenidos de emulsión asfáltica mayores a lo esperado.
Realizando un ajuste de la granulometría del agregado a ser adicionado, podria reducirce notablemente el contenido de emulsion asfáltica.
- (2) Estabilidad Marshall ensayadas a una temperatura de 22.2 °C (Ref: Manual asphalt institute MS-14).
- (3) Agregados muestreado por los interesados.
- (4) Porcentajes de materiales expresado en peso de los agregados.
- (5) Las condiciones de diseño y evaluación de material fueron realizadas en condiciones de laboratorio. Se debe tomar en


 Alfredo Saavedra Ramos
 Tec. Laboratorio



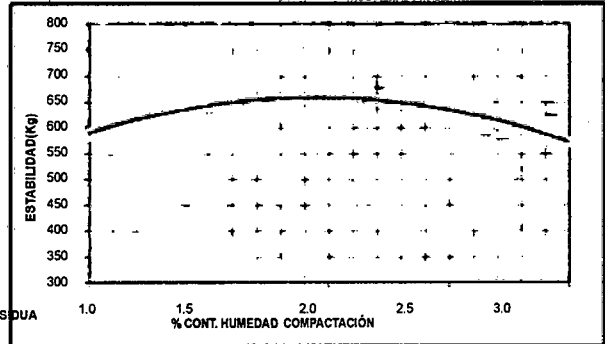
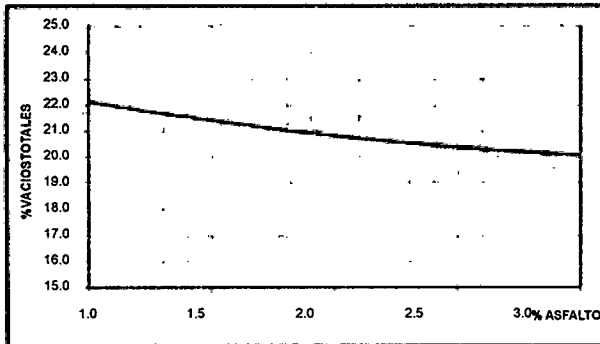
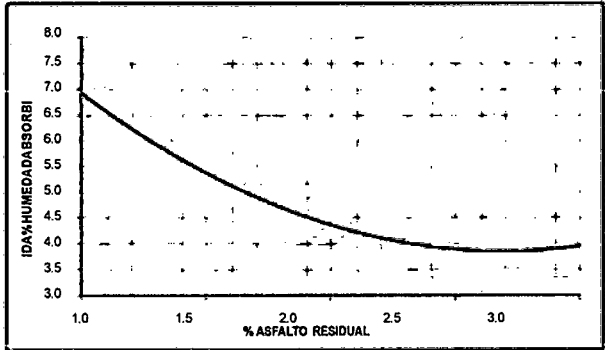
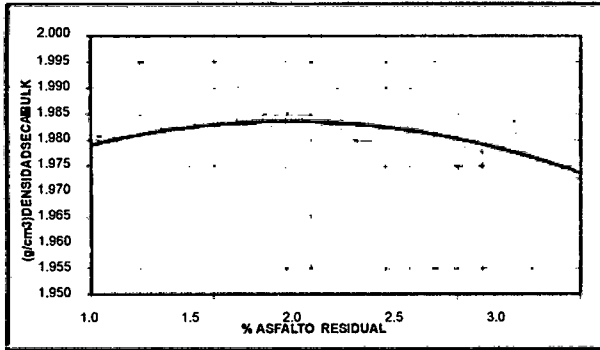
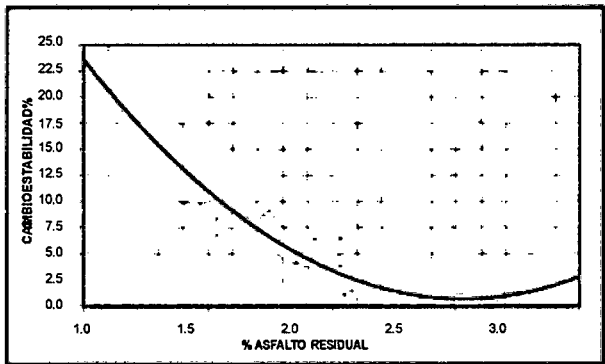
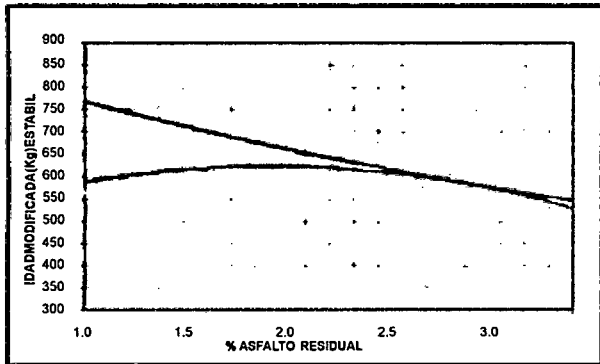
Alfredo Saavedra Ramos
 Tec. de Laboratorio

Victor Zuñiga Anaya
 Ing. Responsable



INFORME DE ENSAYO
DISEÑO TENTATIVO DE ESTABILIZACIÓN DE SUELOS
MÉTODO ILLINOIS - MARSHALL MODIFICADO
(GRÁFICOS)

SOLICITANTE : CONCAR S.A. UBICACIÓN : CUZCO
PROYECTO
REFERENCIA : Base estabilizada con Emulsión asfáltica (Tramo 3)
FECHA DE RECEPCIÓN : 25.10.12



Alfredo Saavedra Ramos
Alfredo Saavedra Ramos
TEC. LABORATORIO



Alfredo Saavedra Ramos
Tec. de Laboratorio

Victor Zuñiga Anaya
Ing. Responsable

INFORME DE ENSAYO

SOLICITANTE : CONCAR S.A.
 PROYECTO :
 UBICACIÓN : CUZCO
 REFERENCIA : Base estabilizada con Emulsión asfáltica (Tramo 3)
 FECHA DE RECEPCIÓN : 25.10.12

DISEÑO TENTATIVO DE ESTABILIZACIÓN DE SUELOS
MÉTODO ILLINOIS - MARSHALL MODIFICADO
(HOJA DE CALCULO)

EMULSIÓN		AGREGADO	
Tipo Emulsión Asfáltica	CSS-1H	Identificación	: MEZCLA DE MATERIALES (TRAMO 3)
Residuo asfáltico en la emulsión (%)	61.5	Descripción	: CANTERA HUILLQUE (Km 916+000)
Gravedad específica del asfalto (B)	1.01		: FRESADO DE PAVIMENTO EXISTENTE
Asfalto residual en la mezcla (A) (%)	1.0	G. Es. Aparente (C)	: 2.581 g/cm3

MEZCLA Y COMPACTACIÓN	
Agua total en la mezcla (%)	3.6
Agua de adición a la mezcla (g)	
Agua de compactación (%)	1.9

DESCRIPCIÓN	SECO			SATURADO		
	1	2	3	4	5	6
DENSIDAD BULK						
1 Peso de la probeta en aire (D)	1090.8	1101.2				
2 Peso de la probeta en agua (E)	595.3	600.0				
3 Peso de la probeta SSD (F)	1142.3	1150.6				
4 Volumen por desplazamiento	547.0	550.6		556.8	550.4	
5 Densidad Bulk (G)	1.994	2.000				
6 Densidad Seca Bulk	1.973	1.985	1.979			

Estabilidad (22.2 °C)						
1 Estabilidad (Kg-f)	805	853		641	676	
2 Factor de corrección	0.93	0.93		0.89	0.89	
3 Estabilidad corregida (Kg-f)	749	793		570	601	
4 Flujo (mm)	4.1	3.8		2.5	3.0	

Contenido de humedad						
1 Peso de la muestra húmeda(H)	1142.3	1150.6		1178.1	1177.7	
2 Peso de la muestra seca (I)	1079.0	1092.9		1091.8	1093	
3 Tara (J)						
4 Contenido de humedad (K)	1.1	0.8		8.0	7.8	
5 Humedad absorbida (%)					-7.0	

Características						
1 Máximo total de vacíos (%)	22.4	21.9				
2 vacíos de aire (%)	20.2	20.4				
3 V. M. A. (%)	24.3	23.8				
4 % perdida de estabilidad		24.0				


 Wilfredo Soto Ramos
 TEC. LABORATORIO



INFORME DE ENSAYO

SOLICITANTE : CONCAR S.A.
 PROYECTO :
 UBICACIÓN : CUZCO
 REFERENCIA : Base estabilizada con Emulsión asfáltica (Tramo 3)
 FECHA DE RECEPCIÓN : 25.10.12

**DISEÑO TENTATIVO DE ESTABILIZACIÓN DE SUELOS
 MÉTODO ILLINOIS - MARSHALL MODIFICADO
 (HOJA DE CALCULO)**

EMULSIÓN		AGREGADO
Tipo Emulsión Asfáltica	CSS-1H	Identificación : MEZCLA DE MATERIALES (TRAMO 3)
Residuo asfáltico en la emulsión (%)	61.5	Descripción : CANTERA HUILLQUE (Km 916+000)
Gravedad específica del asfalto (B)	1.01	: FRESADO DE PAVIMENTO EXISTENTE
Asfalto residual en la mezcla (A) (%)	2.0	G. Es. Aparente (°C) : 2.581 g/cm3

MEZCLA Y COMPACTACIÓN	
Agua total en la mezcla (%)	4.3
Agua de adición a la mezcla (g)	
Agua de compactación (%)	1.9

DESCRIPCIÓN	SECO			SATURADO		
	1	2	3	4	5	6
DENSIDAD BULK						
1 Peso de la probeta en aire (D)	1118.1	1108.1				
2 Peso de la probeta en agua (E)	608.0	604.0				
3 Peso de la probeta SSD (F)	1169.3	1157.0				
4 Volumen por desplazamiento	561.3	553.0		561.9	547.7	
5 Densidad Bulk (G)	1.992	2.004				
6 Densidad Seca Bulk	1.979	1.987	1.983			

Estabilidad (22.2 °C)						
1 Estabilidad (Kg-f)	719	740		762	654	
2 Factor de corrección	0.86	0.89		0.86	0.89	
3 Estabilidad corregida (Kg-f)	618	659		655	582	
4 Flujo (mm)	5.1	3.8		3.3	3.0	

Contenido de humedad						
1 Peso de la muestra húmeda(H)	1169.3	1157		1161.9	1162.3	
2 Peso de la muestra seca (I)	1111.0	1098.7		1107.5	1106.5	
3 Tara (J)						
4 Contenido de humedad (K)	0.7	0.9		5.0	5.1	
5 Humedad absorbida (%)					-4.3	

Características						
1 Máximo total de vacíos (%)	20.9	20.6				
2 vacíos de aire (%)	19.7	18.9				
3 V. M. A. (%)	24.8	24.5				
4 % pérdida de estabilidad		3.1				

[Firma]
 W. Alfredo Saavedra Ramos
 TEC. LABORATORIO



INFORME DE ENSAYO

SOLICITANTE : CONCAR S.A.
 PROYECTO :
 UBICACIÓN : CUZCO
 REFERENCIA : Base estabilizada con Emulsión asfáltica (Tramo 3)
 FECHA DE RECEPCIÓN : 25.10.12

DISEÑO TENTATIVO DE ESTABILIZACIÓN DE SUELOS
MÉTODO ILLINOIS - MARSHALL MODIFICADO
(HOJA DE CALCULO)

EMULSIÓN		AGREGADO
Tipo Emulsión Asfáltica	CSS-1H	Identificación : MEZCLA DE MATERIALES (TRAMO 3)
Residuo asfáltico en la emulsión (%)	61.5	Descripción : CANTERA HUILLQUE (Km 916+000)
Gravedad específica del asfalto (B)	1.01	: FRESADO DE PAVIMENTO EXISTENTE
Asfalto residual en la mezcla (A) (%)	3.0	G. Es. Aparente (°C) : 2.581 g/cm3

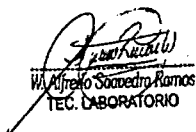
MEZCLA Y COMPACTACIÓN	
Agua total en la mezcla (%)	4.9
Agua de adición a la mezcla (g)	
Agua de compactación (%)	1.9

DESCRIPCIÓN	SECO			SATURADO		
	1	2	3	4	5	6
DENSIDAD BULK						
1 Peso de la probeta en aire (D)	1124.4	1127.3				
2 Peso de la probeta en agua (E)	606.3	606.0				
3 Peso de la probeta SSD (F)	1169.2	1175.5				
4 Volumen por desplazamiento	562.9	569.5		561.6	559.6	
5 Densidad Bulk (G)	1.998	1.979				
6 Densidad Seca Bulk	1.982	1.964	1.973			

Estabilidad (22.2 °C)						
1 Estabilidad (Kg-f)	567	697		654	554	
2 Factor de corrección	0.86	0.86		0.86	0.89	
3 Estabilidad corregida (Kg-f)	488	600		562	493	
4 Flujo (mm)	4.6	5.1		3.3	3.8	

Contenido de humedad						
1 Peso de la muestra húmeda (H)	1169.2	1175.5		1162.7	1159.1	
2 Peso de la muestra seca (I)	1115.8	1118.7		1109.7	1109.6	
3 Tara (J)						
4 Contenido de humedad (K)	0.8	0.8		4.9	4.6	
5 Humedad absorbida (%)					-4.0	

Características						
1 Máximo total de vacíos (%)	19.7	20.4				
2 vacíos de aire (%)	18.2	18.9				
3 V. M. A. (%)	25.4	26.1				
4 % pérdida de estabilidad		2.9				


 W. Alfredo Saavedra Ramos
 TEC. LABORATORIO




INFORME DE ENSAYO

SOLICITANTE : CONCAR S.A
PROYECTO :
UBICACIÓN : CUZCO
REFERENCIA : BASE ESTABILIZADA CON EMULSION ASFALTICA
FECHA : 25/10/12

IDENTIFICACION : MEZCLA DE MATERIALES (TRAMO 3)
DESCRIPCION : PIEDRA CHA. + FRESADO DE PAV. EXIST.

MALLAS		PIEDRA CHANCADA		FRESADO DE PAVIMENTO	
(PULG)	(mm)	PESO	% QUE	% RETENIDO	% QUE
		RETENIDO	PASA	ACUMULADO	PASA
3"	75.000				
2 1/2"	63.000				
2"	50.000				
1 1/2"	37.500				
1"	25.000				
3/4"	19.000		100.0		100.0
1/2"	12.500	78.6	21.4	11.8	88.3
3/8"	9.500	17.7	3.8	9.7	78.5
1/4"	6.300	2.2	1.6	13.7	64.8
Nº04	4.750	0.2	1.4	10.1	54.7
Nº08	2.360	1.4	0.0	9.6	34.0
Nº10	2.000			4.6	29.4
Nº16	1.190			10.3	19.1
Nº20	0.850			4.8	14.3
Nº30	0.600			3.7	10.6
Nº40	0.425			3.0	7.5
Nº50	0.300			2.2	5.3
Nº80	0.177			2.4	3.0
Nº100	0.150			0.5	2.4
Nº200	0.075			1.5	0.9
< Nº200	FONDO			0.9	0.0

P.E.BULK BASE SECA	(gcm3)	(2)	2.667	2.35
P.E.BULK BASE SAT.	(gcm3)	(2)	2.696	2.378
P.E. APARANTE	(gcm3)		2.745	2.416
ABSORCION	(%)		1.1	1.2


 W.A. Alfredo Saavedra Ramos
 TEC. LABORATORIO





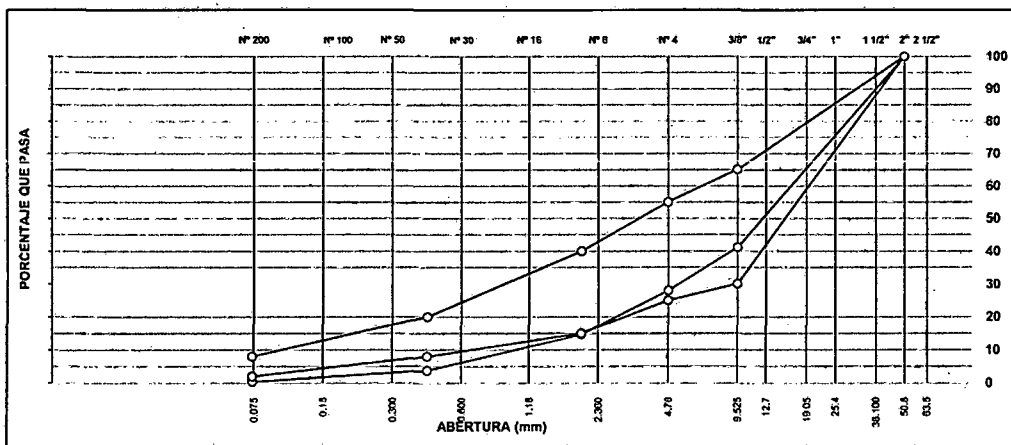
INFORME DE ENSAYO

SOLICITANTE : CONCAR S.A
 PROYECTO :
 UBICACIÓN : CUZCO
 REFERENCIA : BASE ESTABILIZADA CON EMULSION ASFALTICA
 FECHA : 25/10/12

DESCRIPCION : PIEDRA CHA. + FRESADO DE PAV. EXIST.


Tamiz		Peso Retenido	Porcentaje Retenido	% Ret. Acumulado	% Que Pasa	Especificaciones Tipo II
pulg.	mm.					
2"	50.800				100.0	100 - 100
1 1/2"	38.100				100.0	
1"	25.400				100.0	
3/4"	19.050				100.0	
1/2"	12.700	6045.5	45.2	45.2	54.8	
3/8"	9.525	1833.3	13.7	58.9	41.1	30 - 65
1/4"	6.350	1067.6	8.0	66.9	33.2	
4	4.760	689.4	5.2	72.1	28.0	25 - 55
8	2.380	639.9	4.8	83.0	17.0	
10	2.000	307.9	2.3	85.3	14.7	15 - 40
16	1.190	688.8	5.1	90.5	9.5	
20	0.840	322.0	2.4	92.9	7.1	
30	0.590	248.3	1.9	94.7	5.3	
40	0.426	203.5	1.5	96.3	3.7	8 - 20
50	0.297	146.6	1.1	97.4	2.6	
200	0.074	102.4	0.8	99.6	0.4	2 - 8
< N° 200	FONDO	61.6	0.5	100.0	0.0	
Peso Muestra Seca		1619.0	g.			

CURVA GRANULOMETRICA



Alfredo Sandoval Ramos
 W. Alfredo Sandoval Ramos
 TEC. LABORATORIO



	INFORME DE ENSAYO EMULSIÓN DE ROTURA LENTA (CCS-1h)				GO-CC-EMU-INF-007
					Revisión 00
Elaborado por:	Revisado por :	Aprobado por:	Fecha	Página	
DEJ	LSA	LSA	30/01/2012	1 de 1	

INFORME DE ENSAYO CSS-1h **N° 02-2013**

<i>N° DE ORDEN DE PRODUCCIÓN</i>	<i>FECHA DE MUESTREO Y EVALUACIÓN</i>	<i>FECHA DE REPORTE:</i>
<i>PRODUCTO</i>	<i>TANQUE</i>	<i>LOTE</i>
EMULSIÓN DE RUPTURA LENTA CSS-1h		



ENSAYO	MÉTODO	RESULTADOS DEL ANALISIS	ESPECIFICACIÓN	
			Min.	Máx.
VISCOSIDAD SAYBOLT FUROL A 25°C (SFS)	ASTM D 244	27	20	100
ESTABILIDAD AL ALMACENAMIENTO, 24H, %	ASTM D 244	1	-	1
MEZCLA CON CEMENTO, %	ASTM D 244	0.1	-	2
DESTILACIÓN CONTENIDO DE ASFALTO RESIDUAL, %	ASTM D 244	60.74	57	-
PRUEBA DEL TAMIZ N°20, %	ASTM D 244	0.01	-	0.1
CARGA DE PARTICULA	ASTM D 244	POSITIVO	POSITIVO	

ENSAYOS SOBRE EL RESIDUO ASFALTICO

PENETRACIÓN, a 25°C, 100g, 0.1 mm	ASTM D5-06E1	61.0	40	90
DUCTILIDAD, a 25°C, 5 Cm/min, Cm	ASTM D 113-99	> 100	40	-
SOLUBILIDAD EN TRICLOROETILENO, %Masa	ASTM D 2042-01	99.9	97.5	-

OBSERVACIONES :

1. Los Resultados Corresponden a la muestra Analizada
2. Producto dentro de Especificaciones
3. Codigo de Muestra: EMU-02-2013
4. Se recomienda en caso de almacenamiento prolongado agitar frecuentemente la Emulsion

COD. MUESTRA:	
ELABORADO F 	APROBADO POR 
ORIGINAL : CLIENTE COPIA 1 : LABORATORIO COPIA 2 : ARCHIVO	VICTOR ZUÑIGA ANAYA ASISTENTE QUIMICO LUCIA SAEZ ALVÁN JEFE DE CONTROL DE CALIDAD

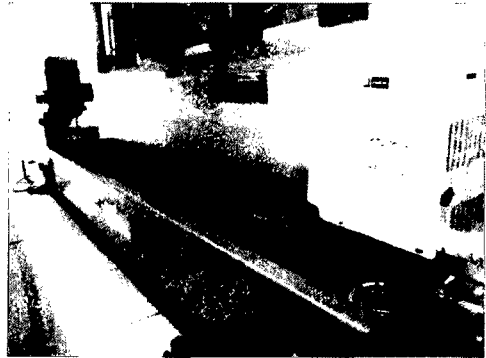
ANEXO II

GALERÍA DE FOTOS

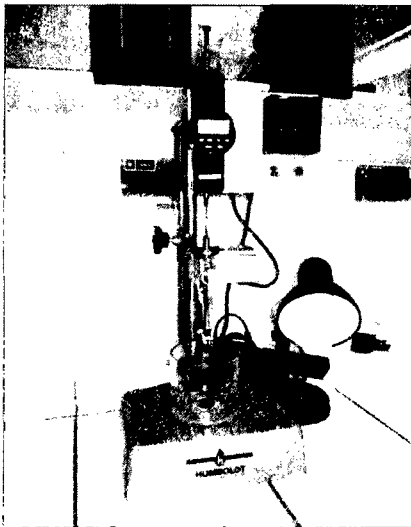
Emulsión almacenada



Ensayo de ductilidad



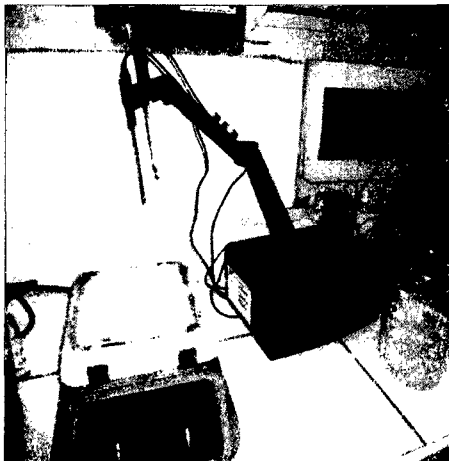
Ensayo de penetración



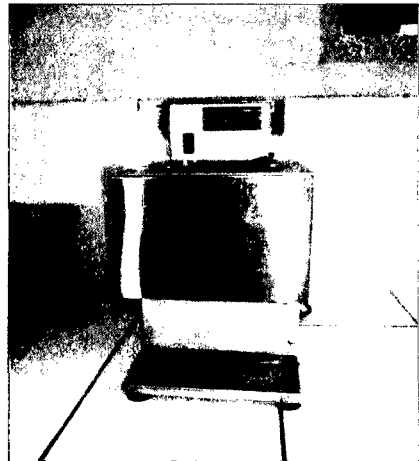
Estufa eléctrica (Horno)



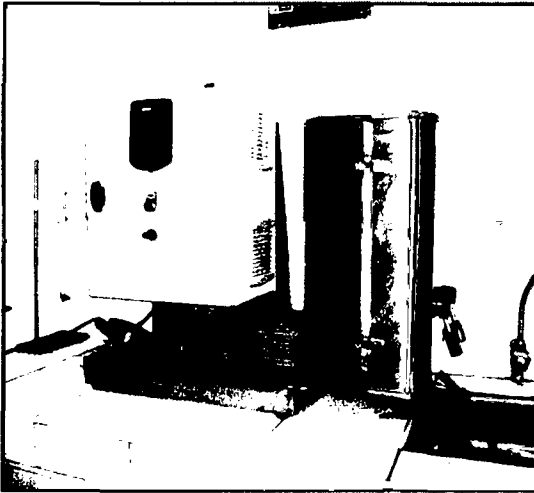
Estufa y Ph-metro



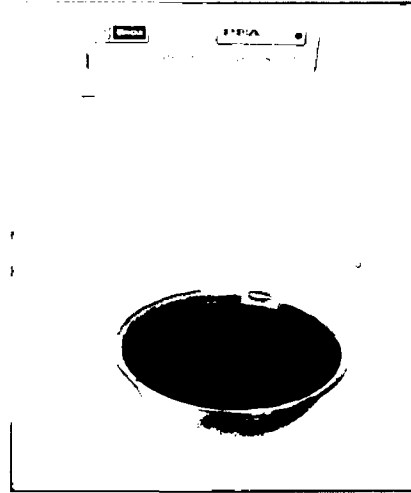
Viscosímetro Saybolt



Miniplanta



Peso específico y Absorción



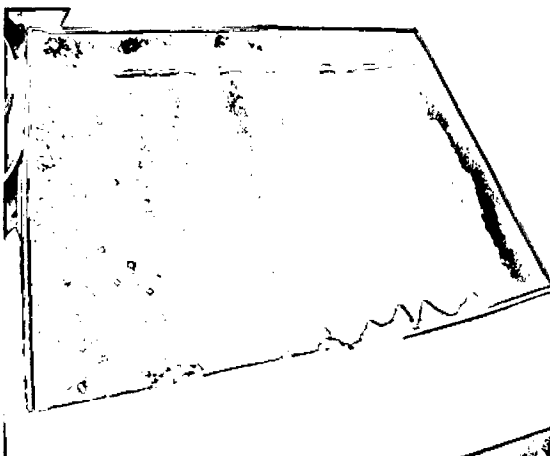
Agregado normal



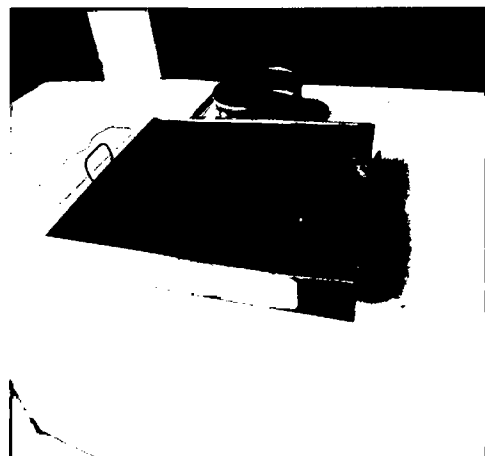
Material reciclado



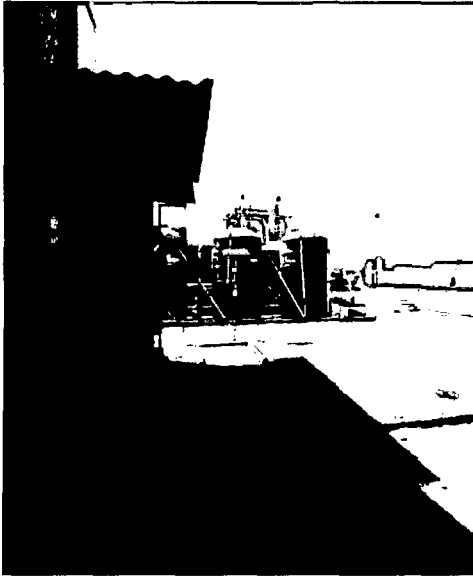
Tamizado



Agregado reciclado



Planta de emulsion Concar



Preparación de muestras



Preparación de muestras 2



Recubrimiento

