

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



**EVALUACIÓN DEL USO DE MEJORADORES DE
ADHERENCIA PARA EL CONTROL DE DEFORMACIONES
PERMANENTES EN PAVIMENTOS ASFÁLTICOS**

INFORME DE SUFICIENCIA

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO CIVIL

JULIO CÉSAR OJEDA MANTARI

Lima- Perú

2015

A Dios por darme fortaleza espiritual y física, a mis Padres y Hermanos por su incondicional y abnegado apoyo en todo momento, a mi Asesor por sus enseñanzas y experiencia compartida y por confiar en mí, A mi Alma Mather por formarme con ética y honestidad y a todos mis Amigos los cuales confiaron en mí.

	Pág. N°
RESUMEN	4
LISTA DE CUADROS	6
LISTA DE FIGURAS	9
INTRODUCCIÓN	10
CAPÍTULO I: ASPECTOS GENERALES	11
1.1. ANTECEDENTES	11
1.2. OBJETIVOS	12
1.2.1. Objetivo General	12
1.2.2. Objetivos Específicos	12
1.3. JUSTIFICACIÓN	12
1.4. METODOLOGÍA	13
1.5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
1.6. MARCO TEÓRICO	15
1.6.1. Definición de Pavimento	15
1.6.2. Clasificación de Pavimentos	16
1.6.3. Principios y Fundamentos generales de los pavimentos asfálticos en caliente	17
1.6.4. Composición General de las Mezclas Asfálticas en Caliente	19
CAPÍTULO II: ENSAYOS DE LABORATORIO RECOMENDADOS PARA ESTUDIOS Y CONTROL DE LA DEFORMACIÓN PERMANENTE	24
2.1. TIPOS DE ENSAYOS PARA EVALUAR LAS DEFORMACIONES PLÁSTICAS	24
2.1.1. Ensayos Fundamentales	26
2.1.2. Ensayos de Simulación de Tráfico en Laboratorio	28
2.2. ENSAYOS COMPLEMENTARIOS	29
2.2.1. Ensayo de Lottman. Daño por Humedad Inducida	29
2.2.2. Ensayo de Tracción Indirecta	32
CAPÍTULO III: FALLAS DEL PAVIMENTO ASFÁLTICO POR DEFORMACIÓN PERMANENTE	34
3.1. CAUSAS QUE ORIGINAN LAS FALLAS POR DEFORMACIÓN PERMANENTE	34
3.1.1. Solicitaciones de Carga a un Pavimento	34

3.1.2. Agregados Pétreos, Filler, Ligantes, otros	37
3.1.3. Agua	37
3.2. PRINCIPALES FALLAS QUE SE PRESENTAN POR DEFORMACION PERMANENTE	38
3.2.1. Ondulación	38
3.2.2. Abultamiento	39
3.2.3. Hundimiento	39
3.2.4. Ahuellamiento	41
CAPÍTULO IV: ENSAYOS CON MEJORADORES DE ADHERENCIA	42
4.1. MEJORADORES DE ADHERENCIA	42
4.2. TIPOS DE MEJORADORES DE ADHERENCIA	42
4.2.1. Morlife 2200	43
4.2.2. Quimibond 3000	44
4.2.3. Quimibond 5000	45
4.2.4. Adhesol 3000	47
4.2.5. Zycotherm	48
4.2.6. Ar Red Radicote	49
4.3. ENSAYOS DE MEZCLA ASFÁLTICA CON MEJORADORES DE ADHERENCIA	50
4.3.1. Cemento Asfáltico	50
4.3.2. Aditivo Mejorador de Adherencia	50
4.3.3. Agregados	51
4.3.4. Dosificación de la Mezcla Asfáltica por el Método Marshall	53
4.4. ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS	59
CAPÍTULO V: MONITOREO EN CAMPO	69
5.1. CONTROL Y MONITOREO DE LA COLOCACIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CAMPO	69
5.2. EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL PAVIMENTO	73
5.3. CONTROL POST CONSTRUCCIÓN	76
5.3.1. Ensayo de creep estático en compresión axial y triaxial	77
5.3.2. Ensayo de creep en compresión axial y triaxial con carga pulsante	77
5.3.3. Ensayo en compresión triaxial con carga dinámica	78
5.3.4. Ensayo de tracción indirecta por compresión diametral con carga Pulsante	79
5.3.5. Ensayo de corte simple	80

5.3.6. Ensayo de Rueda cargada o Wheel-Tracking Tests	80
5.6. EVALUACIÓN ECONÓMICA	82
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	84
7.1. CONCLUSIONES	84
7.2. RECOMENDACIONES	84
BIBLIOGRAFÍA	86
ANEXOS	

RESUMEN

La carpeta asfáltica se deteriora debido al paso de cargas y a los agentes climáticos. Por ello es necesario saber los parámetros que caracterizan a las mezclas asfálticas y definir sus límites de falla, tanto por fatiga, como por deformación plástica. Por este motivo es importante saber que ensayos son necesarios para caracterizar a la mezcla asfáltica y que análisis se deben realizar a partir de los datos obtenidos, es por ello que en el primer capítulo se detalla que tipo de pavimentos existen y se toma como estudio los pavimentos flexibles, ya que estos son más susceptibles a fallas por deformación permanente y en especial la carpeta asfáltica que cubre este pavimento. Posteriormente se detallan los componentes de una carpeta asfáltica en caliente y sus parámetros para diseño de mezclas asfálticas según la norma peruana.

En el segundo capítulo se mencionan los ensayos para evaluación y control de las deformaciones permanentes.

En el tercer capítulo se describe las causas que originan las principales fallas por deformación permanente, además se describe cada una de estas fallas.

En el cuarto capítulo se tratan de forma amplia el uso de los aditivos mejoradores de adherencia y se describen algunos de ellos que son los más comerciales en nuestro país, para luego posteriormente presentar los ensayos de laboratorio realizados en donde se demuestra que el uso de aditivo mejorador de adherencia mejora las características físicas de las mezclas asfálticas y en consecuencia la disminución de la probabilidad que este pavimento falle por deformación permanente y presente prematuramente algún tipo de fallas mencionadas en capítulos anteriores. Se evaluó el uso de aditivo mejorador de adherencia para el diseño de asfalto para la obra de Mejoramiento de la Carretera Satipo Mazamari – Dv. Pangoa – Pto. Ocopa, en la cual se

analizaron los diseños tanto con aditivo y sin aditivo mejorador de adherencia para los agregados de las canteras Rio Satipo y Mendoza.

En el quinto capítulo se describen los controles que se realizan en campo para asegurar la calidad del pavimento, además del control post construcción del pavimento; se hace mención a diversos ensayos de laboratorio y de simulación de tráfico, ya que es importante conocerlos e implementar en nuestro país para evitar las deformaciones prematuras en nuestra carpeta asfáltica; posteriormente se hace una evaluación económica del uso de aditivo mejorador de adherencia versus un diseño de mezclas sin uso de aditivo.

Finalmente se concluye que el uso de aditivo mejorador de adherencia para el diseño de mezclas asfálticas es una buena solución a la presencia de fallas prematuras en los pavimentos, y lo más importante que es una solución económica.

LISTADO DE CUADROS	Pág. N°
Cuadro N°1.1: Requerimientos para los agregados gruesos	20
Cuadro N°1.2: Requerimientos para los agregados finos	21
Cuadro N°1.3: Husos Granulométricos para gradación de MAC	22
Cuadro N°1.4: Tipo de Cemento Asfáltico clasificado según penetración	23
Cuadro N°1.5: Requerimiento para prueba de tracción indirecta AASHTO T 283	23
Cuadro N°4.1: Propiedades Físicas del Morlife 2200	44
Cuadro N°4.2: Propiedades Físicas del Quimibond 3000	45
Cuadro N°4.3: Propiedades Físicas del Quimibond 5000	46
Cuadro N°4.4: Características Fisicoquímicas del Adhesol 3000	48
Cuadro N°4.5: Características del Agregado Grueso de Cantera Rio Satipo para el diseño de mezcla	51
Cuadro N°4.6: Características del Agregado Fino de Cantera Rio Satipo para el diseño de mezcla	52
Cuadro N°4.7: Composición de los agregados de Cantera Rio Satipo para el diseño de mezcla	52
Cuadro N°4.8: Características del Agregado Grueso de Cantera Mendoza para el diseño de mezcla	52
Cuadro N°4.9: Características del Agregado Fino de Cantera Mendoza para el diseño de mezcla	53
Cuadro N°4.10: Composición de los agregados de Cantera Mendoza para el diseño de mezcla	53
Cuadro N°4.11: Composición de las mezclas bituminosas para los diseños de mezclas	55
Cuadro N°4.12: Características físicas de las mezclas asfálticas para las canteras estudiadas	56
Cuadro N°4.13: Diseño de la Mezcla Asfáltica, Cantera Rio Satipo	56
Cuadro N°4.14: Especificación Granulométrica MAC-2, Cantera Rio Satipo	57
Cuadro N°4.15: Formula de Trabajo – Carpeta Asfáltica PEN 60-70, Cantera Rio Satipo	57
Cuadro N°4.16: Diseño de la Mezcla Asfáltica, Cantera Mendoza	58
Cuadro N°4.17: Especificación Granulométrica MAC-2, Cantera Mendoza	58

Cuadro N°4.18: Formula de Trabajo – Carpeta Asfáltica PEN 60-70, Cantera Mendoza	59
Cuadro N°4.19: AASHTO 182 (02)* COATING AND STRIPPING OF BITUMEN – AGREGATE MIXTURE	62
Cuadro N°4.20: MTC E 220 (2000)* ADHESIVIDAD DE LOS LIGANTES BITUMINOSOS A LOS ARIDOS FINOS	62
Cuadro N°4.21: AASHTO T-283 (2003)* MÉTODO DE ENSAYO ESTÁNDAR PARA LA RESISTENCIA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS AL DAÑO INDUCIDO POR HUMEDAD	63
Cuadro N°4.22: AASHTO T-283 (2003)* MÉTODO DE ENSAYO ESTÁNDAR PARA LA RESISTENCIA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS AL DAÑO INDUCIDO POR HUMEDAD	63
Cuadro N°4.23: AASHTO T-283 (2003)* MÉTODO DE ENSAYO ESTÁNDAR PARA LA RESISTENCIA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS AL DAÑO INDUCIDO POR HUMEDAD	64
Cuadro N°4.24: MTC E - 517 (2000)* CUBRIMIENTO DE LOS AGREGADOS CON MATERIALES ASFALTICOS (INCLUYE EMULSIONES) EN PRESENCIA DEL AGUA (STRIPPING) MEZCLAS ABIERTAS Y/O T.S.	65
Cuadro N°4.25: MTC E 220 (2000)* ADHESIVIDAD DE LOS LIGANTES BITUMINOSOS A LOS ARIDOS FINOS	65
Cuadro N°4.26: AASHTO T-283 (2003)* MÉTODO DE ENSAYO ESTÁNDAR PARA LA RESISTENCIA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS AL DAÑO INDUCIDO POR HUMEDAD	66
Cuadro N°4.27: MTC E - 517 (2000)* CUBRIMIENTO DE LOS AGREGADOS CON MATERIALES ASFALTICOS (INCLUYE EMULSIONES) EN PRESENCIA DEL AGUA (STRIPPING) MEZCLAS ABIERTAS Y/O T.S.	66
Cuadro N°4.28: MTC E 220 (2000)* ADHESIVIDAD DE LOS LIGANTES BITUMINOSOS A LOS ARIDOS FINOS (PROCEDIMIENTO RIEDEL WEBER)	67

Cuadro N°4.29: AASHTO T-283 (2003)* MÉTODO DE ENSAYO ESTÁNDAR PARA LA RESISTENCIA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS AL DAÑO INDUCIDO POR HUMEDAD	67
Cuadro N°4.30: Cuadro comparativo de mejora de ensayo Lootman, para Canteras estudiadas para el diseño de mezclas asfálticas con mejorador de adherencia	68
Cuadro N°5.1: Control de ensayos de mezcla asfáltica y granulometría de los agregados correspondiente al día 10/08/2014	73
Cuadro N°5.2: Resultados de Rugosidad	74
Cuadro N°5.3: Resultados de Lisura	75
Cuadro N°5.4: Comparación de las principales características de los ensayos de Rueda Cargada	81
Cuadro N°5.5: Calculo del peso del PEN 60/70 por m ³ de mezcla asfáltica	82
Cuadro N°5.6: Calculo del peso del Filler por m ³ de mezcla asfáltica	82
Cuadro N°5.7: Calculo del peso RADICOTE por m ³ de mezcla asfáltica	82
Cuadro N°5.8: Costo de Mezcla Asfáltica sin Aditivo Mejorador de Adherencia	83
Cuadro N°5.9: Costo de Mezcla Asfáltica con Aditivo Mejorador de Adherencia (Radicote)	83

LISTADO DE FIGURAS	Pág. N°
Figura N°1.1: Paquete estructural	15
Figura N°1.2: Pavimento flexible, rígido e híbrido	17
Figura N°1.3: Comportamiento del pavimento frente a cargas de tránsito	19
Figura N°2.1: Comportamiento elasto-plástico, un ciclo carga-descarga	24
Figura N°4.1: Materiales para la preparación de la mezcla asfáltica con aditivo, agregado fino, agregado grueso, filler, cemento asfáltico y aditivo mejorador de adherencia	51
Figura N°4.2: Carta de viscosidad-temperatura	54
Figura N°5.1: Muestreo de Faja Transportadora	69
Figura N°5.2: Lavado Asfáltico en la centrifuga	69
Figura N°5.3: Compactación de briquetas en caliente para ensayo Marshall	70
Figura N°5.4: Ensayo Rice para determinación de densidad máxima teórica	70
Figura N°5.5: Penetración de briquetas para hallar estabilidad y flujo en la prensa Marshall	71
Figura N°5.6: Colocación de mezcla asfáltica en caliente y control de temperatura de colocación	72
Figura N°5.7: Muestreo de mezcla asfáltica in situ para ensayos en laboratorio	72
Figura N°5.8: Creep Uniaxial	77
Figura N°5.9: Equipo Fast-Cell	78
Figura N°5.10: Fatiga por compresión	79
Figura N°5.11: Corte simple – SUPERPAVE	80

INTRODUCCIÓN

Resulta importante analizar, desde un punto de vista histórico y técnico, por qué fenómeno del ahuellamiento se ha presentado en los últimos años y en proyectos con altos estándares de calidad de construcción.

Hasta hace años el ahuellamiento era un fenómeno de muy baja ocurrencia en los pavimentos del país, siendo más común el agrietamiento por fatiga. Esto llevó a pensar que los materiales de muy buena calidad, otorgaban resistencia a la mezcla frente al ahuellamiento. Esto, hasta cierto punto, es cierto, sin embargo en la actualidad los materiales son aún mejores, lo que no explica la ocurrencia de fenómenos de ahulleamiento. Una explicación complementaria se relaciona con una evolución de la calidad de los procesos constructivos, y en especial, de plantas asfálticas.

La situación en años atrás, era la siguiente:

- Gran parte de las plantas mezcladoras tendían a sobrecalentar las mezclas para cubrir grandes distancias de transporte.
- Las plantas eran de antigua generación con muy poca tecnología incorporada, donde el asfalto entraba en contacto con flujos de aire a alta temperatura.
- Se tendía a construir mezclas con contenidos bajos de asfalto.

Estos tres elementos eran causantes de obtener mezclas asfálticas muy rígidas, que no eran susceptibles a ahueallar, sin embargo sí eran propensas a sufrir agrietamiento prematuro o agrietamiento por fatiga.

CAPÍTULO I: ASPECTOS GENERALES

1.1. ANTECEDENTES

Las deformaciones permanentes son unos tipos de falla que se presentan en los pavimentos asfálticos cuando son expuestos ya sea por separado o en forma combinada a altas temperaturas, tránsito pesado y bajas velocidades de carga.

Las deformaciones permanentes son causadas por la acumulación de pequeñas deformaciones ocasionadas por las cargas de tránsito. El tránsito da lugar a cargas cíclicas. En cada ciclo de carga se realiza cierto trabajo para deformar la superficie del pavimento. Ese trabajo supone una energía cedida al pavimento; una fracción de esa energía se usa en recuperar parte de la deformación y otra es disipada en forma de calor y flujo. Esto genera que en cada ciclo de carga quede una deformación residual. Adicional a esto en los últimos años este tipo de falla se ha visto incrementado debido al aumento del tránsito de camiones pesados con mayores tolerancias de cargas, el fuerte incremento en la presión de aire usada en los neumáticos, la velocidad de circulación muy lenta, entre otros.

En el Perú debido al clima en algunas zonas de su territorio, tráfico y mal diseño de las mezclas asfálticas, existe la posibilidad que se presenten deterioros prematuros en sus pavimentos por efecto de la Falla de deformación permanente. Como es sabido, la degradación de la calidad del pavimento asfáltico, que se traduce por irregularidades en los perfiles longitudinales y transversales del pavimento, generalmente ocurre por los mecanismos que producen deformación permanente tanto en la mezcla asfáltica que conforma la carpeta de rodadura, así como también en las diferentes capas de la estructura del pavimento, e inclusive en la sub rasante.

En la actualidad se tienen pocas investigaciones acerca de las deformaciones permanentes en nuestro país, en EEUU están ampliando sus procedimientos de diseño de mezclas con ensayos empíricos de resistencia. Se llaman empíricos debido a que de sus resultados se deriva una decisión de "se acepta / no se acepta".

En los últimos años se han empleado en Europa y Estados Unidos distintos dispositivos de ruedas cargadas para evaluar las propiedades de la mezclas asfálticas, entre las que se encuentran: la rueda cargada de Hamburgo (HWDT); la rueda cargada (LCPC); el evaluador de pavimentos de la Universidad de Nottingham; la rueda cargada de Georgia (GLWT); y el analizador de pavimentos asfálticos (APA).

Por lo cual es necesario que en el Perú se cuente con equipos especializados de laboratorio y de campo que permitan realizar ensayos para manejar mejor las deformaciones permanentes.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo General

Describir y difundir el uso de aditivo mejorador de adherencia para mejorar los diseños de mezclas asfálticas y prevenir las fallas por deformación permanente prematuras en los pavimentos.

1.2.2. Objetivos Específicos

- a) Efectuar un estudio bibliográfico extensivo sobre los factores relevantes y mecanismos que originan la deformación permanente como es la reología del asfalto, las características de la mezcla asfáltica y agregados; el comportamiento estructural global del pavimento, procesos constructivos, entre otros.
- b) Evaluar el uso del Aditivos Mejorador de Adherencia AR RED RADICOTE mediante los diferentes ensayos normados, principalmente el ensayo Lottman.

1.3. JUSTIFICACIÓN

La capacidad de un agregado para absorber asfalto es un factor importante que debe ser cuantificado en el diseño de mezclas asfálticas. Si un agregado es altamente absorbente, entonces continuara absorbiendo asfalto después del

mezclado inicial, disminuyendo la cantidad de asfalto para ligar las demás partículas de agregado. Por ello, un agregado más poroso requiere cantidades mayores de asfalto de las que requiere un agregado con menos porosidad.

El concepto de adherencia en el diseño de mezclas asfálticas está relacionado a la afinidad del agregado por el asfalto, es la tendencia del agregado a aceptar y retener una capa de asfalto.

El que no haya adherencia entre los agregados y el asfalto originan a que hayan desprendimientos de agregados, consecuentemente se producirán fallas prematuras, es por ello la necesidad de hacer estudios sobre el uso de aditivos mejoradores de adherencia que mejoraran los comportamientos de las mezclas asfálticas y disminuyan las fallas por deformaciones permanentes que suelen presentarse debido a los factores tales como climas extremos, excesos de cargas, etc.

1.4. METODOLOGÍA

Se presenta una investigación bibliográfica general de todos los conceptos referidos a los pavimentos y las fallas más usuales en estos como son las deformaciones permanentes. Es así que se efectúa un análisis del diseño de la mezcla asfáltica en una obra en la selva, teniendo principal énfasis la reología del asfalto y su consecuente comportamiento como parte constituyente de las mezclas asfálticas, donde interactúa con los demás materiales como son los agregados, filler y otros componentes de la misma.

Asimismo se presenta toda la información referida a la deformación permanente, determinando los ensayos de laboratorio y de campo más usados en el mundo para profundizar el conocimiento de esta falla y de esta manera lograr una mayor durabilidad de los pavimentos asfálticos en el Perú.

Se hace mención acerca de los mejoradores de adherencia, su origen, composición y los diferentes tipos de aditivos mejoradores de adherencia que se comercializan en nuestro país, optando para esta investigación el uso del aditivo Ar Red Radicote; con el cual se han realizado ensayos estandarizados para mezclas asfálticas con este aditivo.

Se hace una evaluación técnica y económica del uso de este aditivo mejorador de adherencia, con la finalidad de establecer una línea base para recomendar el uso de dicho aditivo en zonas principalmente donde los efectos del clima como son las lluvias y los cambios bruscos de temperatura son la principal causa de que fallen los pavimentos.

Se hace un seguimiento de los controles de calidad en la preparación y la colocación de la mezcla asfáltica ya que una de las principales causas para que aparezcan las deformaciones permanentes es un diseño inadecuado así como también un mal proceso constructivo.

1.5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las fallas por deformación permanente pueden ser de tipo funcional como también estructural; por lo tanto son dañinas para la durabilidad de los pavimentos asfálticos. Por esto existe preocupación en el mundo para prevenir su presencia prematura, tomándose en consideración aspectos determinantes como son el diseño del pavimento, calidad de materiales, procesos constructivos, entre otros aspectos que aseguren un mejor comportamiento del pavimento ante esta posible falla.

El incremento en el volumen del tránsito y de las cargas impuestas por este, exige mezclas cada vez más durables y con mejor desempeño, por lo que actividades como el diseño, fabricación y colocación de la mezcla asfáltica deben llevarse a cabo al más alto nivel, optimizando los recursos disponibles. A menudo, la práctica actual del diseño de mezclas asfálticas solo se limita a determinar el contenido de asfalto en la mezcla. Sin embargo, a este hecho le debe preceder una serie de análisis en donde se tomen en cuenta todas las variables que van a influir directamente en su comportamiento.

Toda esta previsión pasa por utilizar equipos de laboratorio y de campo especializados, así como utilizar en el diseño de la mezcla asfáltica los materiales adecuados para prevenir este tipo de fallas y garantizar la durabilidad del pavimento.

1.6. MARCO TEÓRICO

1.6.1. Definición de Pavimento

De acuerdo a la Norma AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*), existen dos puntos de vista para definir un pavimento: el de la Ingeniería y el del usuario. De acuerdo a la Ingeniería, el pavimento es un elemento estructural que se encuentra apoyado en toda su superficie sobre el terreno de fundación llamado sub rasante. Esta capa debe estar preparada para soportar un sistema de capas de espesores diferentes, denominado paquete estructural, diseñado para soportar cargas externas durante un determinado período de tiempo. Ver figura N°1.1.

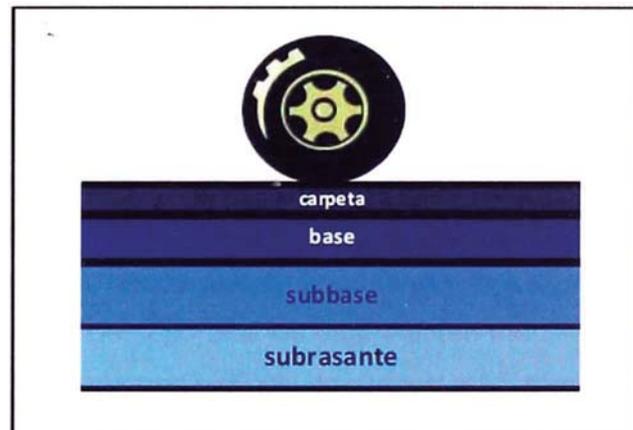


Figura N°1.1: Paquete estructural.

Desde el punto de vista del usuario, el pavimento es una superficie que debe brindar comodidad y seguridad cuando se transite sobre ella. Debe proporcionar un servicio de calidad, de manera que influya positivamente en el estilo de vida de las personas.

Las diferentes capas de material seleccionado que conforman el paquete estructural, reciben directamente las cargas de tránsito y las transmiten a los estratos inferiores en forma disipada. Es por ello que todo pavimento deberá presentar la resistencia adecuada para soportar los esfuerzos destructivos del tránsito, de la intemperie y del agua, así como abrasiones y punzonamientos (esfuerzos cortantes) producidos por el paso de vehículos.

1.6.2. Clasificación de Pavimentos

No siempre un pavimento se compone de las capas señaladas en la **Figura N° 1.1**. La ausencia o reemplazo de una o varias de esas capas depende de diversos factores, como por ejemplo del soporte de la sub rasante, de la clase de material a usarse, de la intensidad de tránsito, entre otros. Por esta razón, pueden identificarse 3 tipos de pavimentos, que se diferencian principalmente por el paquete estructural que presentan:

- a) Pavimento flexible
- b) Pavimento rígido
- c) Pavimento híbrido

a) Pavimento flexible

También llamado pavimento asfáltico, el pavimento flexible está conformado por una carpeta asfáltica en la superficie de rodamiento, la cual permite pequeñas deformaciones en las capas inferiores sin que la estructura falle. Luego, debajo de la carpeta, se encuentran la base granular y la capa de sub base, destinadas a distribuir y transmitir las cargas originadas por el tránsito. Finalmente está la sub rasante que sirve de soporte a las capas antes mencionadas. Ver **Figura N° 1.2**. Este pavimento tiene una vida útil de entre 5 a 15 años.

b) Pavimento rígido

El pavimento rígido o pavimento hidráulico, se compone de losas de concreto hidráulico con acero de refuerzo. Esta losa va sobre la base (o sub base) y ésta sobre la sub rasante. Este tipo de pavimentos no permite deformaciones de las capas inferiores. Ver **Figura N°1.2**. El pavimento rígido tiene un costo inicial más elevado que el pavimento flexible y su período de vida varía entre 20 y 40 años.

c) Pavimento híbrido

Al pavimento híbrido se le conoce también como pavimento mixto, y es una combinación de flexible y rígido. Es ideal para zonas urbanas, pues garantiza seguridad y comodidad para los usuarios, ver **Figura N°1.2**.

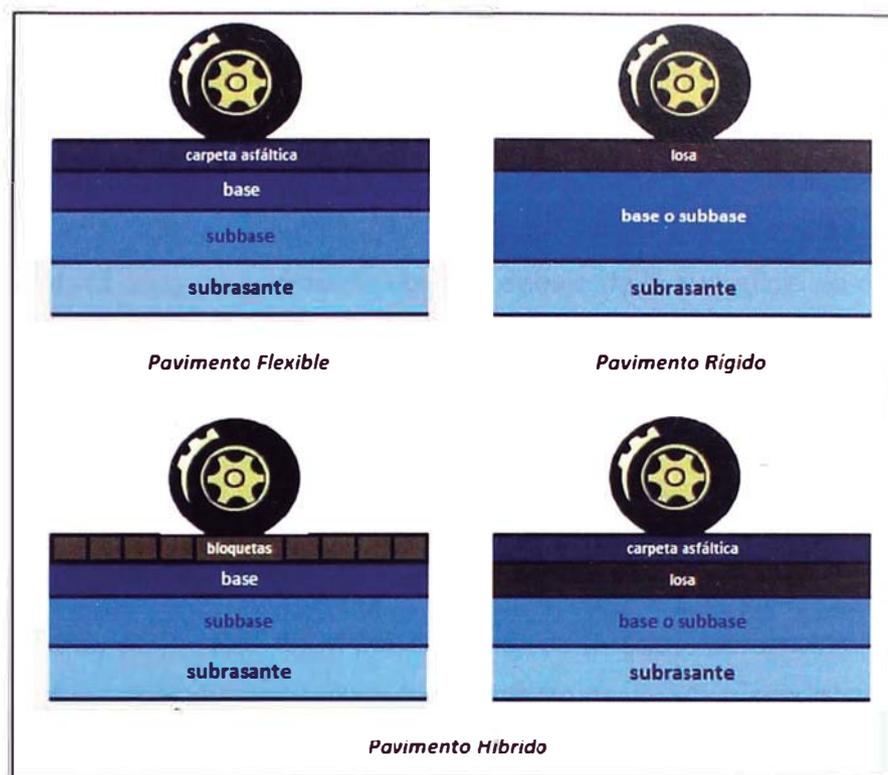


Figura N°1.2: Pavimento flexible, rígido e híbrido.

1.6.3. Principios y Fundamentos generales de los pavimentos asfálticos en caliente

El presente informe esta en referencia a pavimentos flexibles, por lo que se explicará a detalle las capas que lo constituyen y su comportamiento frente a solicitudes externas. Los pavimentos flexibles están constituidos por las siguientes capas: carpeta asfáltica, base, sub base y sub rasante. A continuación se explica a detalle cada uno de estos elementos.

La Carpeta Asfáltica, es la capa que se coloca en la parte superior del paquete estructural, sobre la base, y es la que le proporciona la superficie de rodamiento a la vía. Cumple la función de impermeabilizar la superficie evitando el ingreso de agua que podría saturar las capas inferiores. También evita la desintegración de las capas subyacentes y contribuye al resto de capas a soportar las cargas y distribuir los esfuerzos. La carpeta es elaborada con material pétreo seleccionado y un aglomerante que es el asfalto. Es de gran importancia conocer el contenido óptimo de asfalto a emplear, para garantizar que la carpeta resista las cargas a la que será sometida. Un exceso de asfalto en la mezcla puede

provocar pérdida de estabilidad, e incluso hacer resbalosa la superficie. Esta capa es la más expuesta al intemperismo y a los efectos abrasivos de los vehículos, por lo que necesita de mantenimientos periódicos para garantizar su adecuada performance.

La Base, es la capa de pavimento ubicada debajo de la superficie de rodadura y tiene como función primordial soportar, distribuir y transmitir las cargas a la sub base, que se encuentra en la parte inferior. La base puede estar constituida principalmente por material granular, como piedra triturada y mezcla natural de agregado y suelo; pero también puede estar conformada con cemento Portland, cal o materiales bituminosos, recibiendo el nombre de base estabilizada.

La Sub base, se localiza en la parte inferior de la base, por encima de la sub rasante. Es la capa de la estructura de pavimento destinada a soportar, transmitir y distribuir con uniformidad las cargas aplicadas en la carpeta asfáltica. Está conformada por materiales granulares, que le permiten trabajar como una capa de drenaje y controlador de ascensión capilar de agua, evitando fallas producidas por el hinchamiento del agua, causadas por el congelamiento, cuando se tienen bajas temperaturas. Además, la sub base controla los cambios de volumen y elasticidad del material del terreno de fundación, que serían dañinos para el pavimento.

La Sub rasante, es la capa de terreno que soporta el paquete estructural y que se extiende hasta una profundidad en la cual no influyen las cargas de tránsito. El espesor del pavimento dependerá en gran parte de la calidad de la sub rasante, por lo que ésta debe cumplir con los requisitos de estabilidad, incompresibilidad y resistencia a la expansión y contracción por efectos de la humedad.

El comportamiento estructural de un pavimento frente a cargas externas, varía de acuerdo a las capas que lo constituyen. La principal diferencia entre el comportamiento de pavimentos flexibles y rígidos es la forma cómo se reparten las cargas. Ver **Figura N°1.3**. En un pavimento flexible, la distribución de la carga está determinada por las características del sistema de capas que lo conforman. Las capas de mejor calidad están cerca a la superficie donde las

tensiones son mayores, y estas cargas se distribuyen de mayor a menor a medida que se va profundizando hacia los niveles inferiores.

En el caso de pavimentos rígidos, la losa es la capa que asume casi toda la carga. Las capas inferiores a la losa, en términos de resistencia, son despreciables. En los pavimentos rígidos, las cargas se distribuyen uniformemente debido a la rigidez del concreto, dando como resultado tensiones muy bajas en la sub rasante. En cambio, los pavimentos flexibles tienen menor rigidez, por eso se deforma más que el rígido y se producen tensiones mayores en la sub rasante.

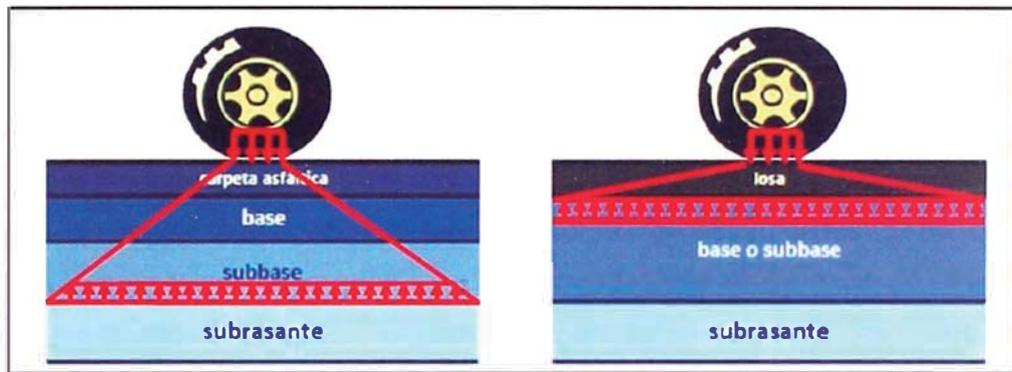


Figura N°1.3: Comportamiento del pavimento frente a cargas de tránsito.

1.6.4. Composición General de las Mezclas Asfálticas en Caliente

Las mezclas bituminosas se compondrán básicamente de agregados minerales gruesos, finos, filler mineral, material asfáltico y cuando lo requiera aditivo mejorador de adherencia. Los distintos constituyentes minerales se separarán por tamaño, serán graduados uniformemente y combinados en proporciones tales, que la mezcla resultante llene las exigencias de graduación para el tipo específico a utilizar. A los agregados mezclados y así compuestos, considerados por peso en un 100% se deberá agregar asfalto, dentro de los límites porcentuales fijados en las especificaciones para el tipo específico de material. Los Materiales a utilizar serán los que se especifican a continuación:

(a) Agregados Minerales Gruesos

Los agregados pétreos empleados para la ejecución de mezclas asfálticas deberán poseer una naturaleza tal, que al aplicársele una capa de material asfáltico, esta no se desprenda por la acción del agua y del tránsito, en caso de que esta circunstancia se produzca, será necesario añadir algún aditivo de comprobada eficacia para proporcionar una buena adhesividad. La proporción de los agregados, retenida en la Malla N° 4, se designará agregado grueso y se compondrá de piedra triturada y/o grava triturada.

El agregado triturado, en no menos de un 40% en peso, de las partículas del mismo, deberá tener dos caras fracturadas o forma cúbica angulosa, y no menos del 65% tendrá una cara fracturada. De ser necesario para cumplir con este requisito, la grava deberá ser tamizada antes de ser triturada. Dichos materiales serán limpios, compactos y durables, no estarán recubiertos de arcilla, limo u otras sustancias perjudiciales; no contendrán arcilla en terrones. De ser necesaria la mezcla de dos o más agregados gruesos, el mezclado deberá efectuarse en tolvas separadas y en los alimentadores en frío y no en el acopio. Los agregados gruesos, deben cumplir además con los siguientes requerimientos:

Cuadro N°1.1: Requerimientos para los agregados gruesos.

Ensayos	Norma	Requerimiento	
		Altitud (msnm)	
		≤3.000	>3.000
Durabilidad (al Sulfato de Magnesio)	MTC E 209	18% máx.	15% máx.
Abrasión Los Ángeles	MTC E 207	40% máx.	35% máx.
Adherencia	MTC E 517	+95	+95
Índice de Durabilidad	MTC E 214	35% mín.	35% mín.
Partículas chatas y alargadas	ASTM 4791	10% máx.	10% máx.
Caras fracturadas	MTC E 210	85/50	90/70
Sales Solubles Totales	MTC E 219	0,5% máx.	0,5% máx.
Absorción *	MTC E 206	1,0% máx.	1,0% máx.

- * Excepcionalmente se aceptaran porcentajes mayores solo si se aseguran las propiedades de durabilidad de la mezcla asfáltica.
- La notación "85/50" indica que el 85% del agregado grueso tiene una cara fracturada y el 50% tiene dos caras fracturadas.

Fuente: Manual de Carreteras – Especificaciones Técnicas Generales para Construcción – EG-2013.

(b) Agregados Minerales Finos

La proporción de los agregados que pasan la Malla N° 4, se designará agregado fino y se compondrá de arena natural y/o material obtenido de la trituración de piedra, grava o escoria o de una combinación de ambos. Dichos materiales se compondrán de partículas limpias, compactas, de superficies rugosas moderadamente angulares, carentes de grumos de arcilla u otros aglomerados de material fino.

No se utilizarán en capas de superficie agregados con tendencia a pulimentarse por el tráfico. Cuando sea necesario mezclar dos o más agregados finos, deberá hacerse a través de tolvas separadas y en los alimentadores en frío y no en el acopio. Los Agregados finos deberán cumplir con los siguientes requisitos:

Cuadro N°1.2: Requerimientos para los agregados finos.

Ensayos	Norma	Requerimiento	
		Altitud (m.s.n.m.)	
		≤ 3.000	> 3.000
Equivalente de Arena	MTC E 114	60	70
Angularidad del agregado fino	MTC E 222	30	40
Azul de metileno	AASTHO TP 57	8 máx.	8 máx.
Índice de Plasticidad (malla N.° 40)	MTC E 111	NP	NP
Durabilidad (al Sulfato de Magnesio)	MTC E 209	-	18% máx.
Índice de Durabilidad	MTC E 214	35 mín.	35 mín.
Índice de Plasticidad (malla N.° 200)	MTC E 111	4 máx.	NP
Sales Solubles Totales	MTC E 219	0,5% máx.	0,5% máx.
Absorción* *	MTC E 205	0,5% máx.	0,5% máx.

** Excepcionalmente se aceptaran porcentajes mayores solo si se aseguran las propiedades de durabilidad de la mezcla asfáltica.

Fuente: Manual de Carreteras – Especificaciones Técnicas Generales para Construcción – EG-2013.

La gradación de la mezcla asfáltica en caliente (MAC) deberá responder a algunos de los husos granulométricos, Alternativamente pueden emplearse las gradaciones especificadas en la ASTM D 3515 e Instituto del Asfalto.

Cuadro N°1.3: Husos Granulométricos para gradación de MAC.

Tamiz	Porcentaje que pasa		
	MAC -1	MAC-2	MAC-3
25,0 mm (1")	100		
19,0 mm (3/4")	80-100	100	
12,5 mm (1/2")	67-85	80-100	
9,5 mm (3/8")	60-77	70-88	100
4,75 mm (N.° 4)	43-54	51-68	65-87
2,00 mm (N.° 10)	29-45	38-52	43-61
425 µm (N.° 40)	14-25	17-28	16-29
180 µm (N.° 80)	8-17	8-17	9-19
75 µm (N.° 200)	4-8	4-8	5-10

Fuente: Manual de Carreteras – Especificaciones Técnicas Generales para Construcción – EG-2013.

(c) Relleno Mineral ("Filler")

El material de relleno de origen mineral, que sea necesario emplear como relleno de vacíos, espesante del asfalto o de ser el caso, como mejorador de adherencia al par agregado-asfalto, se compondrá de materiales tales como polvo calcáreo, polvo de roca, cal hidratada no plástica, cemento portland, etc. Estos materiales deberán carecer de materias extrañas y objetables; estarán perfectamente secos para poder fluir libremente y no contendrán grumos.

La cal hidratada deberá cumplir los requisitos que se especifican en la norma AASHTO-M303 y los restantes materiales antes descritos, deben cumplir la norma ASTM D-242.

La cantidad a utilizar se definirá en la fase de diseños de mezcla según el método Marshall.

(d) Cemento Asfáltico

La selección del cemento asfáltico será del grado de penetración que corresponda, de acuerdo a lo que se indica en el siguiente cuadro que se utiliza como referencia.

Cuadro N°1.4: Tipo de Cemento Asfáltico clasificado según penetración.

Cemento Asfáltico	Temperatura Media Anual 15° C ó menos
Tipo	40 - 50
Tipo	60 - 70
Tipo	85 - 100
Tipo	120 - 150

Fuente: Petroperú.

El cemento asfáltico será homogéneo, carecerá de agua y no formará espuma cuando sea calentado a 175°C. Se deberá tener en cuenta las temperaturas máximas de calentamiento recomendadas por el proveedor.

(e) Aditivo Mejorador de Adherencia

Son productos químicos que al ser incluidos en el cemento asfáltico de la mezcla mejoran notablemente las características de adherencia entre el asfalto y los agregados, brindándole una mayor durabilidad a la carpeta asfáltica; estos deben ser incorporados en estado líquido mediante dispositivos mecánicos de agitación, por circulación o mediante las recomendaciones o especificaciones del fabricante.

Cuadro N°1.5: Requerimiento para prueba de tracción indirecta AASHTO T 283.

Ensayos	Norma	Requerimiento
Resistencia conservada en la prueba de tracción indirecta (**)	AASHTO T 283*	80 min.

*El ensayo AASHTO T-283 deberá ser efectuado teniendo en cuenta la aplicación de los ciclos completos de congelamiento y calentamiento.

** Opcionalmente se puede efectuar el método ASTM D 4867 (Lootman Modificado) y deberá ser efectuada teniendo en cuenta la aplicación de los ciclos completos de congelamiento y calentamiento.

Fuente: Manual de Carreteras – Especificaciones Técnicas Generales para Construcción – EG-2013.

CAPÍTULO II: ENSAYOS DE LABORATORIO RECOMENDADOS PARA ESTUDIOS Y CONTROL DE LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

2.1. TIPO DE ENSAYOS PARA EVALUAR LAS DEFORMACIONES PLÁSTICAS

En pavimentos la carga transmitida es móvil, es decir, el suelo experimenta ciclos de carga y descarga. Sin embargo, cuando el vehículo se aleja el suelo trata de recuperar su posición inicial pero no lo consigue. La deformación no recuperable se denomina deformación plástica y la deformación recuperable es la deformación elástica.

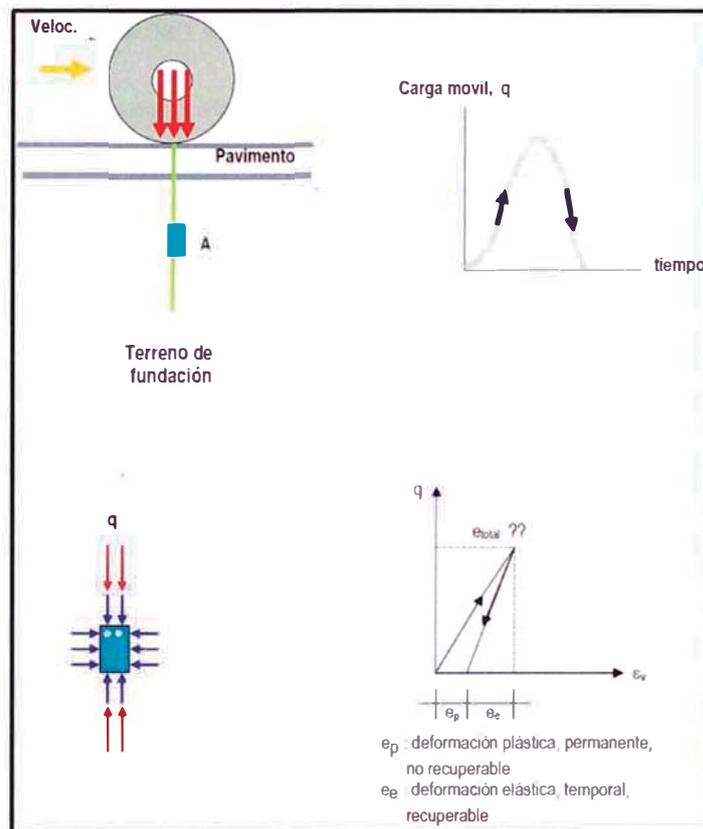


Figura N°2.1: Comportamiento elasto-plástico, un ciclo carga-descarga.

Para el caso específico de deformación permanente en mezclas asfálticas, ésta ocurre debido a una combinación del flujo del material y del daño en este material, representado por la deformación y propagación de fisuras. La capacidad de una mezcla para resistir este tipo de deformación depende de

diversos factores, entre los cuales se encuentran la consistencia del ligante y la determinación de los volúmenes de la mezcla (agregados y ligantes).

Los ensayos de laboratorio tienen la finalidad de tratar de reproducir al máximo posible, lo que le ocurre en un pavimento cuando se le aplican las cargas, se pueden evaluar deformaciones bajo condiciones de temperatura, humedad, esfuerzos y condiciones generales de los materiales y al final se puede obtener un dictamen en el que se puedan analizar las características y comparar con los requisitos o normas fijadas. Estos ensayos ayudan a que los pavimentos puedan ser previamente analizados antes de su colocación, o bien después de su colocación, usando los ensayos más apropiados y que se acercan más a la realidad que otros.

Entre los ensayos existentes para estudiar la deformación permanente de mezclas asfálticas destacan los siguientes:

- ✓ Ensayos Fundamentales: a) Diametral, b) Uniaxial, c) Creep Estático, d) Creep Dinámico, e) Triaxiales, f) De Corte, g) Empíricos
- ✓ Ensayos de Simulación: Son simuladores de laboratorio; tratándose de ensayos de realización compleja, no es muy usado por los países. Entre estos tenemos: a) LCPC (Francés), APA (EEUU), LNEC (Portugal), Universidad Carolina del Norte, UFRGS, IPR y otros.
- ✓ Ensayos Complementarios: Además de los ensayos mecánicos ya descritos, vienen siendo bastante utilizados para la caracterización mecánica de mezclas otros ensayos. Se trata de ensayos empíricos que, sin embargo proveen informaciones importantes no obtenidas a partir de los ensayos mecánicos. Los dos principales ensayos que vienen siendo usados en diferentes países son el de Desgaste Cántabro y el de Pérdida por Humedad Inducida, ensayo de tracción indirecta.
- ✓ Otros Ensayos recomendados para medir Deformación Permanente, como son: a) Georgia Loaded Wheel Tester (GLWT), b) Asphalt Pavement Analyzer (APA), c) Hamburg Wheel Tracking Device (HWTD) - Modelo de Hamburgo, d) Pista de Ensayo de Laboratorio según la Normativa Española e Inglesa, e) Purdue University Laboratory Wheel - Tracking Devi, f) French Wheel Tracker (FWT), g) Model MobileLoad Simulator (MMLS3), h) Equipos de ensayos del tipo LWT en la Argentina, MARC Perú, MEPDG.

2.1.1. Ensayos Fundamentales

Los ensayos de laboratorio que se utilizan principalmente para evaluar las deformaciones plásticas o ahuellamientos, se pueden dividir en diversos tipos, principalmente entre las que se tienen:

a) Ensayos Diametrales.

Este tipo de ensayos no aparecen como los más indicados o adecuados para evaluar las deformaciones plásticas. Desde que se sabe que es un ensayo de tensión, no puede predecir ahuellamientos en forma eficiente.

b) Ensayos Uniaxiales.

Es un tipo de ensayo que puede ser potencialmente usado para predecir el funcionamiento de pavimentos, pero uno de los principales problemas que presenta este tipo de ensayo es la capacidad para predecir el funcionamiento debido a la carga y la temperatura que pueden ser usados en el ensayo. Se sabe que la temperatura y el esfuerzo aplicado en el laboratorio deben ser muy similares al que un pavimento presenta en condiciones reales, estos ensayos por otro lado no conducen a una falla inmediata de los especímenes.

c) Creep Estático (o simplemente Creep)

El ensayo más simple para el estudio de la deformación permanente de mezclas es el llamado ensayo de creep. En algunos países este ensayo viene siendo realizado a través de la aplicación de cargas compresivas por ello se le conoce como ensayo de compresión uniaxial (Brasil) o ensayo de creep; también puede ser realizado a través de la aplicación de cargas de torsión, flexión y tracción (Daniel y kim - 2002).

El ensayo sin confinamiento fue aplicado en mezclas asfálticas en los años 70 por la Shell (Hill, 1973) y ganó bastante aceptación debido a su simplicidad de preparación de cuerpos de prueba y de ejecución del ensayo.

En su versión estática, el ensayo consiste en la aplicación a lo largo del tiempo de una carga de campo por extracción a través de sonda rotativa o fabricado en laboratorio; una exigencia importante es que las caras del cuerpo de prueba sean perfectamente paralelas y perpendiculares al sentido de aplicación de la

carga, de modo que la carga sea aplicada uniaxialmente. Se acostumbra aplicar una pre-carga en las muestras antes del ensayo de modo de permitir que las placas obtengan más uniformidad en el contacto, incluido en las extremidades de la muestra. Antes de la ejecución de los ensayos, en general los cuerpos de prueba quedan embebidos por un periodo superior a dos horas en la temperatura especificada para garantía de equilibrio térmico en toda la muestra.

El tiempo de aplicación de la carga puede variar, sin embargo aún no hay un consenso sobre el asunto, la tendencia es que la duración del ensayo sea de una hora (Shell 2003).

A intervalos predeterminados de tiempo, a criterio de cada investigador, es efectuada la medición del desplazamiento axial por la muestra debido a la carga estática. Esas medidas pueden ser leídas con extensómetros acoplados a las placas de carga, o directamente a los cuerpos de prueba. En este segundo caso destaca el reciente trabajo de Viana et al. (2003), para facilitar la fijación de los LVDTs (sensores electrónicos) en los cuerpos de prueba, tomando menor importancia la cuestión del paralelismo de las caras del cuerpo de prueba, problema existente en el caso de otro tipo de medición.

Debido a la aplicación de la carga estática, el cuerpo de prueba deforma hasta que se estabiliza o rompe (en caso de tratarse de un estado avanzado de daño). Esa ruptura no siempre es visible, habiendo varios criterios para definirla como por ejemplo cuando se sobrepasa una deformación relativa de 0.008 mm/mm, al final de una hora, entonces la mezcla asfáltica no es adecuada para resistir las deformaciones permanentes.

e) Ensayos Triaxiales.

La diferencia con los ensayos uniaxiales, es que este tipo de ensayo proporciona una presión de confinamiento, lo que aproxima más a las condiciones reales a los que está sometido un pavimento, proporciona una temperatura y presión similar a la del lugar, llevando a los especímenes a una falla a corto tiempo. Se tiene poca experiencia, pero se han realizado algunos ensayos sobre deformaciones plásticas sobre todo en triaxiales creep y triaxiales de carga repetida. Son complicados de realizar.

El ensayo triaxial posee la ventaja de reproducir una condición de tensión multiaxial más próxima de la condición existente en el campo; en este caso las deformaciones precisan ser monitoreadas en los sentidos vertical y horizontal. Tratándose de un ensayo de realización compleja no tiene mucha utilización en los diversos países; pero si en investigaciones académicas.

f) Ensayos de Corte.

Este tipo de ensayo incluye al ensayo Superpave de corte SST, es muy complicado de llevar a cabo y muy costoso, no tiene mucha aceptación, debido a los modelos que utiliza para la predicción del comportamiento o funcionamiento. No es apropiado su uso en la predicción de ahuellamientos.

g) Ensayos Empíricos.

Son ensayos basados en la experiencia y en la correlación de resultados de laboratorio y sus predicciones en cuando a funcionamiento son muy limitadas, de ser empleados, en la mayoría requieren de otros ensayos de laboratorio adicionales

2.1.2. Ensayos de Simulación de Tráfico en Laboratorio

Una u otra forma de determinación de la deformación en mezclas asfálticas es por medio de uso de simuladores de tráfico; existen diversos tipos de simuladores, en laboratorio y en campo. Esos equipos permiten una investigación más próxima de la realidad, pues en general también acarrear la necesidad del uso de factores laboratorio - campo para previsiones de deformación permanente in situ del establecimiento de límites de deformación permanente en laboratorio por análisis empíricos de resultados en campo.

Tomando como referencia Brasil, por ser una país cercano al nuestro (Perú); respecto a estos ensayos de simulación en laboratorio; solamente posee dos equipos. Un Francés, desarrollado por el LCPC (Laboratorio Central des Ponts et Chaussées) que está en el Laboratorio de Tecnología de Pavimentación de la Escuela Politécnica de la USP; y un Norteamericano, el Asphalt Pavement Analyzer (APA) de propiedad de la BR Distribuidora.

En el conjunto de equipos franceses del LCPC, la mezcla asfáltica es primeramente compactada a través del amasado por rueda de neumático con cargas y presiones y presión de inflado regulables, a la temperatura del proyecto, realizada por un equipo denominado mesa compactadora. La compactación según la especificación francesa NF P 98-250 - (AFNOR 1991), y produce una placa compactada de mezcla asfáltica en las dimensiones patrón o modelo de 500 mm de longitud y 180 mm de ancho, habiendo placas con 100 mm de espesor. El ensayo de deformación permanente propiamente dicho, sigue la especificación francesa NP P 98-253-1 (AFNOR 1991) y es realizado en un equipo premunido de rueda neumática, cuya presión del neumático y carga en el eje son controlables, asimismo como la temperatura también es regulable, empleándose en general 60°C para acelerar el proceso.

2.2. ENSAYOS COMPLEMENTARIOS

Además de los ensayos ya descritos, vienen siendo bastante utilizados para la caracterización mecánica de mezclas otros ensayos. Se trata de ensayos empíricos que, sin embargo proveen informaciones importantes no obtenidas a partir de los ensayos mecánicos. Los dos principales ensayos que vienen siendo usados en diferentes países son el de Pérdida por Humedad Inducida (Lotman) y el de Tracción Indirecta; que se consideran por ser de importancia para el diseño de las mezclas asfálticas que de alguna manera inciden para determinar su durabilidad y dentro de ello las fallas de la misma; en el presente estudio se presentan estos dos ensayos.

2.2.1. Ensayo de Lottman. Daño por Humedad Inducida

La influencia destructiva de la humedad ha sido reconocida desde hace varias décadas. En 1982 Robert Lottman publicó su informe final sobre una metodología para predecir el daño causado por la humedad en las mezclas bituminosas. Los mecanismos de la humedad que causan deterioro del pavimento han sido estudiados por muchos investigadores, reconociendo entre los principales:

Presión de poros del agua en los huecos de la mezcla debido a las repeticiones de carga, diferencias térmicas que producen expansión - contracción por formación de hielo, ciclos de congelamiento - deshielo, choque térmico o una combinación de estos factores. Desprendimiento del ligante por efecto del agua en la mezcla, a temperaturas entre moderadas y altas. Interacción agua - vapor con el mastico betún - filler y las interfaces de los áridos más grandes. Interacción del agua con minerales arcillosos en el árido fino.

Las mezclas dañadas por efecto de la humedad pierden cohesión y reducen su vida útil acelerando el proceso de fisuración del pavimento. Lottman propone en su método evaluar el efecto de la humedad mediante ensayos de tracción sobre probetas sometidas a distintas condiciones, intentando reproducir la situación en que se encuentra el pavimento en servicio.

En lo que corresponde a la resistencia de las mezclas asfálticas inducido al daño por humedad; la adhesión entre el asfalto y el agregado debe ser evaluada desde el inicio de un diseño de mezcla y/o tratamiento superficial por la importancia que implica, la cual se reflejara en la vida de un pavimento asfáltico que, alcanzando una mejor afinidad, permita una mejor estabilidad y durabilidad.

Actualmente este factor importante que definirá la vida del pavimento se evalúa con métodos cuyos resultados se dan en forma subjetiva por lo que son insuficientes para tan determinante variable. El ensayo ASTM D-1664 es incierto porque, si se observan desprendimientos, no se puede saber si se deben a la acción del agua o la poca afinidad árido-ligante. Así mismo el ensayo Riedel Weber no considera las condiciones reales de obra. También, como se sabe, estos ensayos se realizan por separado y no compatibilizan, no pudiendo evaluarse el comportamiento real de la mezcla en conjunto.

Existe un ensayo moderno que se ajusta más a las condiciones de obra cuantificando la adhesividad. Este ensayo es el AASSHTO T-283 (ASTM D-123), conocido también como Lottman, el cual permite determinar la resistencia a la tracción de los especímenes, midiendo la pérdida de cohesión de una mezcla compactada como resultado de los efectos de saturación acelerada en agua. Este ensayo mide el comportamiento de la mezcla en conjunto (árido fino, árido grueso y ligante).

El ensayo Lottman permite predecir la susceptibilidad de desprendimiento de las mezclas asfálticas y evaluar el efecto de los mejoradores de adherencia que se agregan al cemento asfáltico, si es líquido y al agregado mineral si es polvo.

Es normal considerar y exigir una serie de propiedades intrínsecas a los ligantes tales como viscosidad, cohesión y susceptibilidad térmica, a partir de las cuales se pueden deducir su comportamiento mecánico. Sin embargo estas se tratan de propiedades relativas, ya que el mismo ligante presentará una buena o mala adhesividad según la morfología del árido. Existen experiencias que muestran que, en condiciones favorables de temperatura, limpieza del árido, buena granulometría, etc., se llega a obtener buen recubrimiento o "adhesividad activa", pero que ante la lluvia y el tráfico el ligante es desplazado del árido, quedando este limpio. Es decir que existe poca "resistencia al desplazamiento", o bien, mala "adhesividad pasiva".

El ensayo Lottman se orienta a dos objetivos: Primero identifica si una combinación de ligante asfáltico y agregado es susceptible a la acción del agua y luego evalúa la adhesividad y efectividad de los aditivos anti-desprendimiento o mejoradores de adherencia.

El ensayo AASHTO T-283 es uno de los más confiables para establecer la adhesividad en las mezclas asfálticas, ya que ensaya el material tal como se va usar en obra. De continuar ensayando tradicionalmente la adhesividad se deben dar márgenes de seguridad amplios que garanticen una buena adherencia para que no colapsen las carpetas antes del tiempo esperado.

En el Perú se debería adoptar el ensayo Lottman para las zonas de sierra y selva y algunas de la costa, ya que su pluviosidad es importante y, en ocasiones, excesivamente elevada; además que en algunas zonas se presenta el congelamiento de la superficie.

Para que el ensayo Lottman sea representativo se deberá haber realizado primero el ensayo del agua hervida (MTC E-522). Las pruebas Lottman Modificadas (Modified Lottman Test), ASTM D 4867 y AASHTO T 283), es el mejor ensayo para determinar daños por efectos de la humedad en mezclas de concreto asfáltico, utiliza a profundidad equipos de laboratorio con medidas extremas de rendimiento.

Procedimientos del Ensayo

- ✓ Se compactan los especímenes en equipos Marshall, Kneading o Gyratory según el país donde se realicen y se cuente con los equipos apropiados).
- ✓ Los especímenes deberán de tener 102 mm de diámetro por 63 mm espesor (4"x 2.5")
- ✓ Se compactarán con vacíos de aire del 6 al 8 %
- ✓ Se prepara un grupo condicionado y otro sin condicionar en series de tres, cuatro o cinco especímenes.
- ✓ Se someten a saturación al vacío en agua de 55 al 80 %
- ✓ Se congelan durante 16 horas a -18 °C (0 °F)
- ✓ Posteriormente se sumergen bajo agua durante 24 horas a 60 °C (140 °F), durante 2 horas a 25 °C (77 °F).
- ✓ Se fracturan los especímenes en prensa Marshall bajo tensión indirecta.
- ✓ Se obtiene la Relación Tensión-Esfuerzo (Tensile Strength Ratio) min 80 %
- ✓ Una vez obtenida esta relación se seleccionará aquellos especímenes con los resultados que superen dicho valor.

2.2.2. Ensayo de Tracción Indirecta

Esta prueba evalúa la cohesión de la mezcla asfáltica y se realiza de acuerdo con la Norma NLT – 346 (española), consiste en ensayar la probeta a una deformación constante de 50.8 mm/min con el fin de calcular en forma indirecta la resistencia a la tensión y donde la mayor oposición a la falla la presenta la cohesión del asfalto con el agregado mineral.

El ensayo de tracción indirecta por compresión diametral consiste en someter una probeta cilíndrica a una carga lineal de compresión, estática o dinámica, en dos generatrices opuestas. Se supone que de este modo se desarrollan unas tensiones de tracción uniformes a lo largo del plano determinado por las generatrices de aplicación de la carga que permiten un cálculo sencillo de la Resistencia a Tracción (RT), deformaciones y módulos del material ensayado.

Suele considerarse, por otra parte, que las condiciones críticas en cuanto a fisuración por fatiga en un pavimento bituminoso se dan en el fondo de capa, en la vertical definida por la posición de la carga, donde se dan tracciones longitudinales y transversales, combinadas con compresión vertical. Se tiene así un estado tensional en este punto muy similar al producido en el centro de la probeta de tracción indirecta, aunque en este caso las tracciones son de carácter uniaxial frente al biaxial del elemento situado en la base. Por esta razón los módulos obtenidos del ensayo de tracción indirecta pueden proporcionar estimaciones ajustadas del módulo efectivo de las capas bituminosas, primordialmente a bajas temperaturas, cuando la rigidez del asfalto crece y el comportamiento de la mezcla es más elástico lineal.

La medida de la resistencia a tracción indirecta de una probeta o testigo mediante una prensa Marshall, a la velocidad de deformación de 50,8 mm/min y a distintas temperaturas parece, pues, muy accesible, de obtención sencilla, de bajo costo y adecuadamente relacionada con el comportamiento en servicio de las mezclas bituminosas. Sin embargo esta vinculación no es tan simple y diversos factores condicionan el resultado del ensayo.

Base Teórica: Resistencia a tracción indirecta y módulo elástico de las mezclas Bituminosas

CAPÍTULO III: FALLAS DEL PAVIMENTO ASFÁLTICO POR DEFORMACIÓN PERMANENTE

3.1. CAUSAS QUE ORIGINAN LAS FALLAS POR DEFORMACIÓN PERMANENTE

3.1.1. Solicitaciones de Carga a un Pavimento

El tránsito tiene una gran influencia en la aplicación de las cargas en un pavimento y su caracterización es bastante compleja debido no solo a la variabilidad de los distintos vehículos existentes, sino también a las interacciones vehículo-pavimento que producen fenómenos con solicitaciones adicionales a las propias cargas estáticas del tránsito.

Para caracterizar las solicitaciones producidas por el tránsito a un pavimento se pueden estudiar independientemente los siguientes aspectos:

- ✓ Magnitud de las cargas según la composición del tránsito (carga por eje, número de ejes que circulan, y número de repeticiones de carga).
- ✓ Forma geométrica de cada solicitación sobre el pavimento (área de contacto y reparto de presiones sobre la misma).
- ✓ Velocidad de los vehículos y tiempo de solicitación en un punto.
- ✓ Estados de esfuerzos que producen las cargas, en función de su magnitud y tipología.
- ✓ Características de las capas del pavimento.

El diseño de pavimentos, la presión de contacto generalmente se asume igual a la presión de la llanta, debido a que los ejes de carga pesados tienen presiones altas y efectos más destructivos en el pavimento, utilizar la presión de la llanta como presión de contacto, es estar por el lado de la seguridad.

Cuando se utiliza la teoría multicapas en el diseño de pavimentos flexibles, se asume que cada llanta tiene un área de contacto de forma circular, esta suposición es incorrecta, pero el error en el que se incurre no es significativo. Otro aspecto a considerar acerca del vehículo es la velocidad, si se utiliza la teoría visco elástica para el diseño del pavimento, la velocidad está directamente relacionada con la duración de la carga; si se utiliza la teoría elástica, debe

seleccionarse adecuadamente el módulo de resiliencia de los materiales para el pavimento, en proporción con la velocidad del vehículo

a) Naturaleza Cíclica de las Cargas que actúan en un pavimento

Normalmente el diseño, análisis y evaluación estructural de las condiciones de los pavimentos se basan en la teoría elástica multicapas; este acercamiento ofrece la posibilidad de una solución racional al problema. El éxito de esta aproximación depende de la precisión y la manera en que se emplean las propiedades de los materiales. Últimamente se han cambiado los procedimientos de diseño de los pavimentos y se ha pasado de los métodos empíricos a los métodos mecanicistas, basados en el acercamiento más racional durante su diseño.

Las principales razones de este cambio son las condiciones cambiantes en la estructura del pavimento ante la sollicitación móvil de los vehículos cargados, ya que se experimentan dos tipos de esfuerzos: los estáticos por sobrecarga y los dinámicos causados por el movimiento vehicular.

Dentro de los métodos racionales se encuentran los procedimientos de diseño mecanicistas; su funcionamiento es estimado y basado en las propiedades mecánicas fundamentales de las capas de pavimento. El acercamiento mecanicista en el diseño involucra el análisis teórico y el cálculo de esfuerzos y deformaciones en lugares críticos, como resultado de las aplicaciones de carga originadas por las ruedas cargadas. Los materiales que constituyen las diferentes capas del firme, se ven sometidos a cargas dinámicas de diversas magnitudes que le son transmitidas por el tráfico.

b) Estado de Esfuerzos que producen las Cargas en función de su Magnitud y Tipo

Los neumáticos de los vehículos se apoyan sobre el pavimento produciendo una huella de forma distinta para cada tipo de neumático, presión de inflado, carga por rueda, velocidad y estado de la superficie. Cuando está en movimiento,

además de variar la forma de la huella, aparecen sollicitaciones distintas a las verticales, que son las que existen cuando el vehículo está detenido o con movimiento uniforme: aparecen esfuerzos horizontales debido al rozamiento y a los cambios de trayectoria, succiones de agua contenida en la sección estructural y esfuerzos verticales de impacto por efectos del movimiento del vehículo y las irregularidades de la carretera.

Los esfuerzos horizontales de aceleración y frenado o en curvas de pequeño radio, que se pueden producir en zonas localizadas, influyen también en el estado de esfuerzos y deformaciones del pavimento. Cuando en la superficie de un pavimento se originan esfuerzos tangenciales, éstos deben ser resistidos por los 8 – 10 cm. superiores, pero en general no afectan a las capas inferiores. Por ello, la forma práctica con la que se resuelven estos problemas, es proyectando capas de rodadura cuya resistencia al esfuerzo cortante sea suficientemente alta para garantizar que no se produzcan rupturas o deformaciones.

Los efectos dinámicos de los vehículos en movimiento se transforman en impactos y vibraciones en los que intervienen el estado superficial del pavimento y el tipo de suspensión del vehículo. En general, los vehículos en marcha transmiten al neumático una carga de magnitud variable, según el movimiento oscilatorio de la masa suspendida, cuya frecuencia varía como la velocidad y tipo de pavimento. Los máximos pueden ser un 50 superiores a los normales con carga estática. Este aumento de cargas refleja sobre el pavimento en forma de presión de contacto y/o incremento de la superficie de rodada.

c) Carga por Eje Equivalente de Vehículos

Las presiones altas de contacto sobre los pavimentos están directamente relacionadas con los valores de las cargas por eje de los vehículos, lo que conlleva a la formación de roderas son presiones altas de contacto sobre los pavimentos.

En 1994 se realizó el proyecto con el Strategic Highway Research Program (SHRP) en donde se analizó el efecto del estado de esfuerzos sobre el comportamiento de las mezclas asfálticas con respecto a las deformaciones plásticas. Durante una serie de ensayos que tenía como fin observar el

comportamiento de las mezclas asfálticas bajo distintas condiciones, esto es, utilizando dos niveles de esfuerzo, uno alto y otro bajo, al final se determinó que un incremento en la presión de contacto de los neumáticos con el pavimento produce un decremento en la resistencia de las mezclas asfálticas ante las deformaciones plásticas.

d) Número de repeticiones de Carga

Se ha determinado que un aumento en el número de repeticiones de carga establece una disminución en la resistencia de los pavimentos a la generación de deformaciones plásticas, es decir, cuando se incrementa el número de repeticiones de carga, el pavimento es más susceptible a sufrir este tipo de deterioro.

Cada paso de los neumáticos por un punto sobre el pavimento, se puede considerar como un pulso de carga, si la mezcla asfáltica está a una temperatura relativamente alta, esta condición le permite comportarse de una manera visco elastoplástica ante las sollicitaciones del tráfico, cada pulso de carga, se irá acumulando permanentemente lo que generará los ahuellamientos.

3.1.2. Agregados Pétreos, Filler, Ligantes, otros

Que pueden generar deterioro por deformación permanente ya han sido tratados en los capítulos precedentes.

3.1.3. Agua

El Agua puede aumentar la susceptibilidad de una mezcla asfáltica a las deformaciones plásticas permanentes. Los efectos del agua pueden ser considerados en la fase inicial de diseño de las mezclas o como una parte del proceso de evaluación de las mezclas. Cuando existe una modificación de la estructura de pavimento de estado seco a húmedo, se presenta una disminución de la resistencia de la mezcla.

En 1993, se realizó un estudio en la Universidad del Estado de Oregon en E.U.A., donde se demuestra que la propensión a los ahuellamientos de las

mezclas asfálticas se incrementa significativamente si está sujeta a saturación sostenida de agua. Los resultados fueron obtenidos a partir de ensayos de cortante simple en mezclas antes y después de someterlas a la acción del agua. El incremento en las huellas que podrían ocurrir in situ pueden ser estimadas utilizando el procedimiento de la regla.

3.2. PRINCIPALES FALLAS QUE SE PRESENTAN POR DEFORMACION PERMANENTE

3.2.1. Ondulación

También conocida como corrugación o rizado, es un daño caracterizado por la presencia de ondas en la superficie del pavimento, generalmente perpendiculares a la dirección del tránsito, con longitudes entre crestas usualmente menores que 1,0 m.

Causas: La ondulación es una deformación plástica de la capa asfáltica, debido generalmente a una pérdida de estabilidad de la mezcla en climas cálidos por mala dosificación del asfalto, uso de ligantes blandos o agregados redondeados. Muchos de los casos suelen presentarse en las zonas de frenado o aceleración de los vehículos. Otra causa puede estar asociada a un exceso de humedad en la subrasante, en cuyo caso el daño afecta toda la estructura del pavimento. Además también puede ocurrir debido a la contaminación de la mezcla asfáltica con finos o materia orgánica.

Bajo este contexto, las causas más probables son:

- Pérdida de estabilidad de la mezcla asfáltica.
- Exceso de compactación de la carpeta asfáltica.
- Exceso o mala calidad del asfalto.
- Insuficiencia de triturados (caras fracturadas).
- Falta de curado de las mezclas en la vía.
- Acción del tránsito en zonas de frenado y estacionamiento.
- Deslizamiento de la capa de rodadura sobre la capa inferior por exceso de riego de liga.

Severidades

- Baja: Profundidad máxima menor que 10 mm, causa poca vibración al vehículo, la cual no genera incomodidad al conductor.
- Media: Profundidad máxima entre 10 mm y 20 mm, causa una mayor vibración al vehículo generando incomodidad al conductor.
- Alta: Profundidad máxima mayor que 20 mm, causa una vibración excesiva que puede generar un alto grado de incomodidad, haciendo necesario reducir la velocidad por seguridad.

Unidad de medición: La ondulación se mide en metros cuadrados (m²) de área afectada.

Evolución probable: Exudación, ahuellamiento.

3.2.2. Abultamiento

Este deterioro se asigna a los “abombamientos” o prominencias que se presentan en la superficie del pavimento. Pueden presentarse bruscamente ocupando pequeñas áreas o gradualmente en áreas grandes, acompañados en algunos casos por fisuras.

Causas: Se generan principalmente por la expansión de la subrasante o en capas de concreto asfáltico colocado sobre placas de concreto rígido, el cual se deforma al existir presiones bajo la capa asfáltica (como las generadas por procesos de bombeo). También puede corresponder a una ondulación localizada.

Severidades y unidad de medición: Aplican los mismos criterios establecidos para la ondulación.

Evolución probable: Fisuración, desprendimientos, exudación, ahuellamiento

3.2.3. Hundimiento

Los hundimientos corresponden a depresiones localizadas en el pavimento con respecto al nivel de la rasante. Este tipo de daño puede generar problemas de

seguridad a los vehículos, especialmente cuando contienen agua pues se puede producir hidroplaneo. Los hundimientos pueden estar orientados de forma longitudinal o transversal al eje de la vía, o pueden tener forma de medialuna, en cualquier caso, el reporte del daño debe incluir en las aclaraciones la orientación o la forma del hundimiento, si es fácilmente identificable en campo.

Causas: Existen diversas causas que producen hundimientos las cuales están asociadas con problemas que en general afectan toda la estructura del pavimento:

- Asentamientos de la subrasante.
- Deficiencia de compactación de las capas inferiores del pavimento, del terraplén o en las zonas de acceso a obras de arte o puentes.
- Deficiencias de drenaje que afecta a los materiales granulares.
- Diferencia de rigidez de los materiales de la subrasante en los sectores de transición entrecorte y terraplén.
- Deficiencias de compactación de rellenos en zanjas que atraviesan la calzada.
- Inestabilidad de la banca.
- Circulación de tránsito muy pesado.

Severidades

- Baja: Profundidad menor que 20 mm, causa poca vibración al vehículo, sin generar incomodidad al conductor.
- Media: Profundidad entre 20 mm y 40 mm, causa mayor vibración al vehículo generando incomodidad al conductor.
- Alta: Profundidad mayor que 40 mm, causa vibración excesiva que puede generar un alto grado de incomodidad, haciendo necesario reducir la velocidad por seguridad.

Unidad de medición: Se cuantifica el área afectada en metros cuadrados (m²).

Evolución probable: Fisuración, desprendimientos, movimientos en masa.

3.2.4. Ahuellamiento

El ahuellamiento es una depresión de la zona localizada sobre la trayectoria de las llantas de los vehículos. Con frecuencia se encuentra acompañado de una elevación de las áreas adyacentes a la zona deprimida y de fisuración. Un ahuellamiento significativo puede llevar a la falla estructural del pavimento y posibilitar el hidroplaneo por almacenamiento de agua.

Causas: El ahuellamiento ocurre principalmente debido a una deformación permanente de alguna de las capas del pavimento o de la sub rasante, generada por deformación plástica del concreto asfáltico o por deformación de la subrasante debido a la fatiga de la estructura ante la repetición de cargas.

La deformación plástica de la mezcla asfáltica tiende a aumentar en climas cálidos, y también puede darse por una compactación inadecuada de las capas durante la construcción, por el uso de asfaltos blandos o de agregados redondeados. Además, la falla estructural del pavimento puede manifestarse con daños de este tipo debido a una deficiencia de diseño, la cual se manifiesta cuando la vía está sometida a cargas de tránsito muy altas.

Severidades

- Baja: Profundidad menor que 10 mm.
- Media: Profundidad entre 10 mm y 25 mm.
- Alta: Profundidad mayor que 25 mm.

Unidad de medición: Se mide en metros cuadrados (m²) de área afectada, asignando la severidad de acuerdo con la zona de mayor profundidad.

Evolución probable: Piel de cocodrilo, desprendimientos.

CAPÍTULO IV: ENSAYOS CON MEJORADORES DE ADHERENCIA

4.1. MEJORADORES DE ADHERENCIA

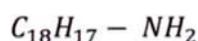
Estos productos (tenso-activos), son agentes de superficie, que incorporados al ligante mejoran la adherencia orientando las moléculas más polares del ligante hacia el árido para neutralizar las cargas electrostáticas de la superficie mineral, reaccionan sobre los agregados minerales, de manera que modifican su superficie y las vuelven “más mojables” por los ligantes que por el agua. Los productos que confieren tal efecto son muy diversos al igual que lo será su modo de acción. El mejorador de adherencia utilizado es específico para mezclas asfálticas en caliente.

La adhesión entre el asfalto y el agregado es un factor importante en la vida de un pavimento asfáltico. Frecuentemente los daños en la superficie de una vía pueden ser atribuidos al desprendimiento por falta de adherencia. El desprendimiento es la rotura del enlace adherente entre la superficie del agregado pétreo y el asfalto, donde el agua penetra entre la superficie y la película del asfalto debido a la mayor afinidad al agua en dicha superficie, produciendo la rotura de la unión. Cuando la humedad desprende el agregado del asfalto la pérdida de grava es acelerada por el efecto del tráfico, ocasionando la falla del pavimento.

4.2. TIPOS DE MEJORADORES DE ADHERENCIA

Los mejoradores más eficaces son, por regla general, mejoradores aminados, excepto frente a los agregados calcáreos. Se presentan a continuación una enumeración de los mismos:

a) Monoaminas grasas: tales como la estearilamina, obtenidas a partir de sebo y amoniaco.



Es indispensable que la cadena hidrocarbonada de la amina grasa sea lo suficientemente larga, a fin de ser prácticamente insoluble en agua; las mono-

aminas son bases débiles, bastante poco estable y de fácil destrucción por el calor. Reemplazándolas por productos de mayor complejidad se salvaría dicho problema.

b) Diaminas: Del tipo



Pueden obtenerse a partir de grasas animales o vegetales, de amoniaco y de acrilonitrilo.

c) Amino-aminas: del tipo



Estos productos se obtienen por condensación de la dictilentriamina (obtenida a partir del acetileno) con un ácido graso. -

4.2.1. Morlife 2200

Morlife 2200 es un aditivo constituido de amina que mejora la adherencia entre el par agregado-asfalto evitando la formación de bolsas de agua que impiden la adhesión del cemento asfáltico al agregado. Es un gran "anti-stripping" entre el asfalto y los agregados. Los ingredientes del **Morlife 2200** permiten una excelente cohesión del pavimento durante largo tiempo. No se cristaliza a temperaturas bajas, ni se evapora a temperaturas altas. Es un aditivo que es fácil de dosificar al no tener que calentarse y evitar los gases tóxicos.

Propiedades:

Color: Marrón Oscuro

Apariencia: Líquida-viscosa

Densidad: 1.10 Kg/ Lt.

Dosificación: 0.5% -- 0.8% del peso del cemento asfáltico, se recomienda la dosificación del 0.8% cuando los agregados poseen excesiva carga de silicios, piedra caliza o humedad.

Cuadro N°4.1: Propiedades Físicas del Morlife 2200.

Determinación	Contenido
Peso Combinado	327
Propiedades Físicas a 25°C	Líquido
Punto de inflamación (°C)	183
Viscosidad a 25°C	2000 – 4500 cs
Gravedad Específica	1.12 promedio
Solubilidades:	
Gasolina	Insoluble
Agua	Insoluble
Alcohol Isopropílico	Insoluble

Fuente: Hoja de Seguridad de Aditivo Morlife 2200.

Direcciones para su uso:

La dosificación del **Morlife 2200** es muy sencilla al no necesitarse calentarse o agitarse, la dosificación se aplica por medios neumáticos al tanque de almacenaje o por inyección a la carga del asfalto.

Ventajas:

- Fácil de dosificar al ser un aditivo líquido.
- Sin olor corrosivo que pueden afectar a los operarios.
- Larga duración del asfalto.

4.2.2. Quimibond 3000

Quimibond 3000 es un aditivo constituido de amina que mejora la adherencia entre el agregado-asfalto evitando la formación de bolsas de agua que impiden la adhesión del cemento asfáltico al agregado. Es un gran “anti-striping” entre el asfalto y los agregados. Los ingredientes del **Quimibond 3000** permiten una excelente cohesión del pavimento durante largo tiempo. Es un aditivo que es fácil de dosificar al no tener que calentarse y evitar los gases tóxicos.

Propiedades:

Color: Café Oscuro

Apariencia: Líquida-viscosa

Densidad: 0.93 – 0.97 Kg/lt.

Dosificación: 0.3% - 0.8% del peso del cemento asfáltico, se recomienda la dosificación del 0.8% cuando los agregados poseen excesiva carga de silicios, piedra caliza o humedad.

Cuadro N°4.2: Propiedades Físicas del Quimibond 3000.

Determinación	Contenido
Contenido de aminas	400-600
Propiedades Físicas a 25°C	Líquido
Punto de inflamación (°C)	165
Viscosidad a 25°C	2000 – 6500 cs
Gravedad Específica	0.95 promedio
Solubilidades:	
Gasolina	Insoluble
Agua	Insoluble
Alcohol Isopropílico	Insoluble

Fuente: Hoja de Seguridad de Aditivo Quimibond 3000.

Aplicaciones:

- En asfalto en caliente para mejorar la adherencia entre el concreto asfáltico y los agregados.
- Como promotor de adherencia en mezclas frías.
- En riegos de impregnación, para mejorar la penetración del impregnante a la base.
- En riegos de liga para una buena unión base-carpeta.
- Se recomienda su uso bajo las siguientes situaciones críticas: Cuando se utilizan agregados difíciles, en ambientes con alta humedad ambiental y cuando se empleen agregados con alto contenido de sílice.

Direcciones para su uso:

La dosificación del **Quimibond 3000** es muy sencilla al no necesitarse calentarse o agitarse. Una vez determinada la dosificación que varía de acuerdo a los agregados entre el 0.3 al 0.8% del peso del cemento asfáltico. La dosificación se aplica por medios neumáticos al tanque de almacenaje o por inyección a la carga del asfalto.

Ventajas:

- Fácil de dosificar al ser un aditivo líquido.
- Sin olor corrosivo que pueden afectar a los operarios.
- Larga duración del asfalto.

4.2.3. Quimibond 5000

Quimibond 5000 es un aditivo constituido de amina que mejora la adherencia entre el asfalto y agregado, evitando la separación por acción del agua, que

impide la adhesión del cemento asfáltico al agregado. Los ingredientes del **Quimibond 5000** permiten una excelente cohesión del pavimento durante largo tiempo.

Cuadro N°4.3: Propiedades Físicas del Quimibond 5000.

Color	Marrón oscuro
Contenido de aminas	400-600
Propiedades Físicas a 25°C	Líquido
Densidad	1.040 ± 0.01
Apariencia	Líquido
Viscosidad a 25°C	900 – 1050 cP
Solubilidades:	
Agua	Insoluble

Fuente: Hoja de Seguridad de Aditivo Quimibond 5000.

Aplicaciones:

- En asfalto en caliente para mejorar la adherencia entre el concreto asfáltico y los agregados.
- Como conservador y mejorador de adherencia en mezclas asfálticas en frío por ser más resistente al agua.
- Se recomienda su uso bajo las siguientes situaciones críticas: En agregados que se encuentran secos, fríos y húmedos; en zonas con alta humedad ambiental y cuando se empleen agregados de variado origen con alto contenido de sílice u otra composición química.

Dosificación:

0.3 al 0.8 % del peso del cemento asfáltico. Logrando porcentajes de recubrimiento de 90-95%. Se recomienda la dosificación del 0.7% cuando los agregados poseen excesiva carga de silicios, piedra caliza o humedad.

Para determinar con exactitud la dosificación, es recomendable realizar ensayos previos de desempeño en mezclas asfálticas según normas:

- ASTM D-3625 Standard Practice for Effect of Water on Bituminous-Coated Aggregate Using Boiling Water.
- ASTM D-4867 Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures.

Direcciones para su uso:

- Determinar la dosificación (0.3 al 1.0%) que varía entre el peso del cemento asfáltico y al tipo de agregados.

- La dosificación se incorpora al asfalto por medios neumáticos (flujo de bomba o por inyección) al tanque de almacenaje y se recircula la carga del asfalto hasta lograr una completa homogeneización.

Ventajas:

- El QUIMIBOND 5000 es fácil de dosificar al ser un aditivo líquido, no necesita calentarse o agitarse.
- Prolonga la vida útil de las cargas asfálticas, trayendo beneficios económicos en trabajos de gran envergadura.
- Conserva larga duración de la mezcla asfáltica y consiguientemente reducción de costos de conservación y mantenimiento.
- Cuando se pone en contacto una superficie mineral con el ligante asfáltico, su carácter tenso-activo permite desalojar la humedad y retener fuertemente el asfalto facilitando la unión piedra-asfalto y anula el desprendimiento de partículas o del asfalto.
- El producto se mantiene en estado líquido a temperaturas por encima de 0°C.

4.2.4. Adhesol 3000

Aditivo químico base amina, térmicamente estable que actúa en la interface asfalto-agregado, aumentando considerablemente el poder de adherencia entre ambos, permitiendo una excelente cohesión del pavimento durante largo tiempo.

Ventajas:

- Utilizado como aditivo mejorador de adherencia en ligantes asfálticos aplicados en caliente, en asfaltos diluidos (cut backs) en mezclas asfálticas en frío.
- Un aditivo líquido de fácil incorporación en el ligante asfáltico
- Fácil de dosificar por ser un aditivo líquido.
- Excelentes propiedades "Anti-striping"

Aplicación:

Añadido en cantidades determinadas en los ligantes asfálticos a ser utilizados, obteniéndose la homogenización por circulación, con una bomba de transferencia o agitación, por un periodo mínimo de 45 minutos.

Dosis recomendada:

La dosificación varía de acuerdo a los agregados de 0.25% a 1.0%, de forma general se recomienda el uso de 0.5% de ADHESOL 3000 con respecto al peso del ligante asfáltico. Es importante tener en cuenta que la dosificación arriba mencionada, estará sujeta a los resultados obtenidos durante los ensayos de adherencia, los cuales están normados por el MTC (Manual EM-2000: MTC E-517, MTC E-521, MTC E-220).

Cuadro N°4.4: Características Fisicoquímicas del Adhesol 3000.

Color Gardner	Max. 10
Composición principal	Aminas grasas
Apariencia a 25°C	Líquido aceitoso
Viscosidad a 25°C	>60 cP
Densidad a 25°C, g/cm ³	>1000
Punto de inflamación (°C)	>280
Solubilidades:	
Gasolina	Soluble
Agua	Insoluble
Alcohol Isopropílico	Soluble

Fuente: Hoja de Seguridad de Aditivo Adhesol 3000.

4.2.5. Zycotherm

La tecnología de Zycotherm hace que sea el aditivo perfecto para mejorar simultáneamente la operación, calidad y costo del asfalto en caliente. Se trata de un organosilano de segunda generación, reactivo a temperatura ambiente, soluble en agua y betún y estable hidrolíticamente. Proporciona una mayor cobertura de los áridos con el betún, al mismo tiempo que mejora la compactación incluso a bajas temperaturas.

Beneficios:

- Zycotherm tiene un efecto positivo sobre las mezclas de asfalto en caliente, así también en trabajos de compactación. Sus propiedades superiores al momento de trabajar con agregados húmedos, la unión y envoltura que produce sobre los agregados, asegura uniformidad y

espesor de la película, y una buena lubricación en la mezcla en caliente. Esto ayuda a mejorar la compactación bajo las mismas cargas y esfuerzos probados en el laboratorio, demostrando resultados iguales que en el terreno de aplicación.

- La adición de ZycOTherm dará unos resultados de la mezcla, como que estuviese un exceso de asfalto, manteniendo el porcentaje de vacíos de aire normados (7%), esto indica la necesidad de reducir el contenido óptimo de asfalto requerido para la gradación dada de la mezcla.

Dosificación:

La dosis de ZycOTherm puede variar entre 0.05 y 0.15% sobre el peso del asfalto usado. La gravedad específica es 0.97. En el caso de que un equilibrio de pesaje preciso no esté disponible, el uso de 1 ml en lugar de 1 gramo de ZycOTherm debe ser tomado en cuenta como aceptable.

4.2.6. Ar Red Radicote

Es un compuesto orgánico derivado de las amino grasas creado para ser adicionado a materiales bituminosos líquidos, tales como los Cut-Back RC-250 o MC-30 (asfaltos líquidos con destilados del petróleo) a temperaturas de trabajo entre 40 - 90 °C. Los asfaltos semisólidos (cementos asfálticos), temperaturas de mezclas entre 140 – 150 °C y asfaltos modificados con polímeros, a temperaturas de mezcla entre 160 y 180°C destinados a la construcción de pavimentos, a fin de mejorar el comportamiento de los mismos, frente a las condiciones adversas de clima, en zonas frías y/o cálidas y lluviosas, las presencias de sales en los agregados y en los materiales que conforman las capas granulares del pavimento.

Características Físicas

Aspecto	Pasta
Color Gardner	12 - 14
Propiedad Física a 25°C	Pasta
Punto de Fusión	30-50
Punto de Inflamación	>200°C
Gravedad Especifica	0.83 – 0.90

Dosificación	0.4 – 0.5 % del peso del asfalto para un TSR > 80%
Prueba Mecánica	Ensayo Lottman Modificado AASHTO T-283 (Completo, con congelamiento -18°C y 60°C calentamiento)

4.3. ENSAYOS DE MEZCLA ASFÁLTICA CON MEJORADORES DE ADHERENCIA

El diseño de mezcla asfáltica se realizó siguiendo la norma ASTM 1559-82 “resistencia al flujo plástico de mezclas bituminosa usando el método Marshall”, de acuerdo a las especificaciones técnicas. Para el diseño de la mezcla asfáltica a continuación se detalla las características de los materiales disponibles:

4.3.1 Cemento Asfáltico

Cemento asfáltico de penetración 60/70, proporcionado por Petroperú, conforme al certificado de calidad, procedente de la refinería de Pampilla. En el Anexo N°2 se adjunta certificado de calidad del PEN 60/70.

4.3.2 Aditivo Mejorador de Adherencia

Para mejorar la afinidad del par “bitumen-agregado”, se ha considerado la utilización del aditivo mejorador de adherencia AR-RED RADICOTE, en una proporción de 0.4 – 0.5 % en peso del PEN 60-70. El aditivo en mención es estable a temperaturas de aplicación de los asfaltos, por lo tanto es compatible con los productos bituminosos. Para activar el aditivo con los asfaltos de pavimentación, solo se requiere de pequeñas cantidades, por lo que la incorporación del aditivo no altera las proporciones de diseño de la mezcla ni las características físico-químicas del bitumen.



Figura N°4.1: Materiales para la preparación de la mezcla asfáltica con aditivo, agregado fino, agregado grueso, filler, cemento asfáltico y aditivo mejorador de adherencia.

4.3.3 Agregados

Los agregados proceden de dos canteras la primera es de la cantera “Rio Satipo”, ubicada en el km 08+360 (Acceso a 2.1 km) Lado Derecho de la carretera Satipo – Puerto Ocopa. La segunda es la cantera “Mendoza”, ubicada en el km 38+520 (Acceso a 0.8 km) lado Izquierdo de la carretera Satipo – Puerto Ocopa.

Para el caso de la Cantera Rio Satipo se detalla en los Cuadros N°4.5 y N°4.6, las características de los agregados gruesos y finos respectivamente, los cuales se utilizarán para el diseño de mezcla asfáltica con agregados de dicha cantera. Ver Anexo I.

Cuadro N°4.5: Características del Agregado de Grueso de Cantera Rio Satipo para el diseño de mezcla.

CARACTERÍSTICAS DEL AGREGADO GRUESO – CANTERA RIO SATIPO		
ENSAYO	RESULTADO	ESPECIFICACIONES
Durabilidad	3.29%	Máx. 18%
Abrasión	31.1%	Máx. 40%
Partículas Chatas	8.0%	Máx. 10%
Caras Fracturadas	91.1 / 95.4	Min. 65/40

Fuente: Ensayos de laboratorio, Area de Calidad - Consorcio Vial Junin.

Cuadro N°4.6: Características del Agredo Fino de Cantera Rio Satipo para el diseño de mezcla.

CARACTERÍSTICAS DEL AGREGADO FINO – CANTERA RIO SATIPO		
ENSAYO	RESULTADO	ESPECIFICACIONES
Durabilidad	3.35%	Máx. 10%
Equivalente arena	54.82%	Min. 45%
Ind. Plasticidad N°200	2.18%	Máx. 4%

Fuente: Ensayos de laboratorio, Área de Calidad - Consorcio Vial Junin.

La combinación de agregados para el diseño de mezcla asfáltica utilizando materiales de la Cantera Rio Satipo se compone de la siguiente manera: agregado grueso (Grava chancada < ¾" - Grava chancada < ½"), agregado fino (Arena zarandeada < 3/8" - Arena chancada < 3/8") y relleno mineral (filler). A continuación se presenta la combinación de la mezcla de los agregados y la faja de referencia (Ver Cuadro N°4.7):

Cuadro N°4.7: Composición de los agregados de Cantera Rio Satipo para el diseño de mezcla.

MEZCLA DE AGREGADOS Y FAJA DE REFERENCIA – CANTERA RIO SATIPO					
Suelos	Mezcla	P.E.	Tipo	Acopio	Procedencia
	%	g/cm ³			
1	16%	2.661	Grava Chancada < ¾"	Planta Chancadora km 8+360	Cantera Rio Satipo
2	9%	2.661	Grava Chancada < ½"	Planta Chancadora km 8+360	Cantera Rio Satipo
3	38%	2.574	Arena Zarandeada < 3/8"	Planta Chancadora km 8+360	Cantera Rio Satipo
4	36%	2.574	Arena Chancada < 3/8"	Planta Chancadora km 8+360	Cantera Rio Satipo
5	1%		Filler		

Fuente: Ensayos de laboratorio, Área de Calidad - Consorcio Vial Junin.

Para el caso de la Cantera Mendoza se detalla en los Cuadros N°4.8 y N°4.9, las características de los agregados gruesos y finos respectivamente, los cuales se utilizaran para el diseño de mezclas asfáltica con agregados de dicha cantera. Ver Anexo II.

Cuadro N°4.8: Características del Agregado Grueso de Cantera Mendoza para el diseño de mezcla.

CARACTERÍSTICAS DEL AGREGADO GRUESO – CANTERA MENDOZA		
ENSAYO	RESULTADO	ESPECIFICACIONES
Durabilidad	2.71%	Máx. 18%
Abrasión	32.97%	Máx. 40%
Partículas Chatas	7.19%	Máx. 10%
Caras Fracturadas	92.80 / 80.10	Min. 65/40
Sales Solubles	0.036	Máx. 0.50 %

Fuente: Ensayos de laboratorio, Área de Calidad - Consorcio Vial Junin.

Cuadro N°4.9: Características del Agredo Fino de Cantera Mendoza para el diseño de mezcla.

CARACTERÍSTICAS DEL AGREGADO FINO – CANTERA MENDOZA		
ENSAYO	RESULTADO	ESPECIFICACIONES
Durabilidad	3.30%	Máx. 10%
Equivalente arena	58.01%	Min. 45%
Ind. Plasticidad N°40	N.P.	N.P.
Ind. Plasticidad N°200	1.67%	Máx. 4%
Sales Solubles	0.044	Máx. 0.50 %

Fuente: Ensayos de laboratorio, Área de Calidad - Consorcio Vial Junín.

La combinación de agregados para el diseño de mezcla asfáltica utilizando materiales de la Cantera Mendoza se compone de la siguiente manera: agregado grueso (Grava chancada < ¾" - Grava chancada < ½"), agregado fino (Arena zarandeada < 3/8" - Arena chancada < 3/8") y relleno mineral (filler). A continuación se presenta la combinación de la mezcla de los agregados y la faja de referencia (Ver Cuadro N°4.10):

Cuadro N°4.10: Composición de los agregados de Cantera Mendoza para el diseño de mezcla.

MEZCLA DE AGREGADOS Y FAJA DE REFERENCIA – CANTERA MENDOZA					
Suelos	Mezcla	P.E.	Tipo	Acopio	Procedencia
	%	g/cm³			
1	14%	2.617	Grava Chancada < ¾"	Cantera Mendoza km 38+520 L. Izq.	Cantera Mendoza
2	10%	2.617	Grava Chancada < ½"	Cantera Mendoza km 38+520 L. Izq.	Cantera Mendoza
3	40%	2.574	Arena Zarandeada < 3/8"	Cantera Mendoza km 38+520 L. Izq.	Cantera Mendoza
4	35%	2.574	Arena Chancada < 3/8"	Cantera Mendoza km 38+520 L. Izq.	Cantera Mendoza
5	1%	3.150	Filler		

Fuente: Ensayos de laboratorio, Área de Calidad - Consorcio Vial Junín.

4.3.4 Dosificación de la Mezcla Asfáltica por el Método Marshall

a) Temperatura

La relación de las temperaturas de trabajo fueron determinados de acuerdo con la carta viscosidad-temperatura como se muestra en la Figura N°4.1.

b) Energía de Compactación

Fue aplicada 75 golpes por cada cara según indica las especificaciones.

c) Porcentaje de Cemento Asfáltico

Fueron preparadas probetas tipo Marshall en los contenidos de 5.0%, 5.5%, 6.0% y 6.5%, siendo 3 probetas para cada contenido de bitumen, en total 12 probetas.

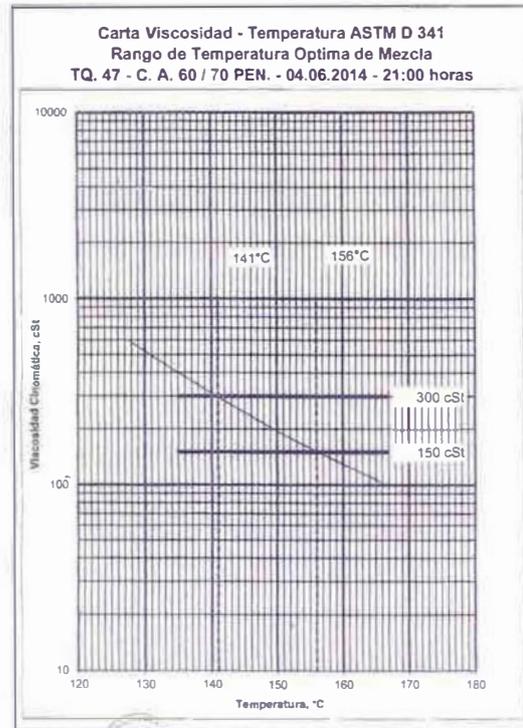


Figura N°4.2: Carta de viscosidad-temperatura.

d) Ensayo Marshall

El método de diseño Marshall fue desarrollado en el departamento de transporte de Mississippi (USA) en la década de los años 40. El U.S. Army Corps of Engineers mejoró e incrementó ciertas características al trabajo inicial propuesto por Marshall y formalizó el método a través de la norma ASTM D1559 "Resistencia a la deformación plástica de las mezclas asfálticas en equipos Marshall".

El método fue fundamentado en un experimento de laboratorio destinado a diseñar una mezcla asfáltica a través del análisis de la estabilidad de flujo y densidad/vacíos. Los análisis garantizan que las proporciones que constituyen la mezcla asfáltica diseñada por el método Marshall están en un nivel tal que obtengan un concreto asfáltico durable.

e) Selección del Óptimo Contenido de Asfalto

El óptimo contenido de asfalto fue aquel que resulto de promediar los contenidos de asfalto correspondiente a:

- Porcentaje de vacíos
- Estabilidad
- Relación Asfalto / vacíos
- Flujo

f) Relación Material Seco / Asfalto:

Analizando las curvas representativas de variación de las diversas propiedades y de la densidad de la mezcla para las condiciones climáticas de la región evidenciando los resultados de estabilidad, fluencia de la mezcla y masa específica que resulto en el porcentaje de asfalto correspondiente a 5.8% en peso para el diseño con agregados de la cantera Rio Satipo y 6.1% en peso para los agregados de la Cantera Mendoza, consecuentemente las mezclas bituminosas más racionales para cada cantera son las siguiente (Ver Anexo I y Anexo II):

Cuadro N°4.11: Composición de las mezclas bituminosas para los diseños de mezclas.

AGREGADOS	DISEÑO ASFALTO: CANTERA RIO SATIPO	DISEÑO ASFALTO: CANTERA MENDOZA
Grava de ¾"	16%	14%
Grava de ½"	9%	10%
Arena Zarandeada < 3/8"	38%	40%
Arena Chancada < 3/8"	36%	35%
Filler (Cemento Portland)	1%	1%
PEN 60/70	5.80% ± (0.3)%	6.10% ± (0.3)%
Aditivo mejorador de Adherencia	(con 0.4 – 0.5% de AR RED Radicote).	(con 0.4 – 0.5% de AR RED Radicote).

Fuente: Ensayos de laboratorio, Área de Calidad - Consorcio Vial Junin.

Las **Características de las Mezclas Asfálticas en Laboratorio**; ensayados, calculados y extraídos de los gráficos para cada cantera son los siguientes (Ver Anexo I y Anexo II):

Cuadro N°4.12: Características físicas de las mezclas asfálticas para las canteras estudiadas.

ENSAYO	DISEÑO DE ASFALTO: CANTERA RIO SATIPO	DISEÑO DE ASFALTO: CANTERA MENDOZA
Densidad Máxima Teórica (km/m ³)	2.415	2.455
Densidad aparente (kg/m ³)	2.331	2.371
% Vacíos	3.47	3.31
Estabilidad, kg	1139	1211
Flujo, mm	3.40	3.37
V.M.A.	16.80	17.50
Índice de Rigidez (kg/cm)	3349	3592
Relación Polvo – Asfalto	1.18	1.15

Fuente: Ensayos de laboratorio, Área de Calidad - Consorcio Vial Junín.

El óptimo contenido de asfalto tanto para los agregados de la Cantera Río Satipo como para la Cantera Mendoza fueron determinados procurando dotar la mezcla de las características que se acuerden a las particulares condiciones bajo las que la carpeta estará en servicio, tales como % vacíos teniendo al límite inferior (3%), zona de clima caluroso, es deseable la mayor relación estabilidad / flujo, teniendo el flujo al límite superior (4mm). A continuación se describe los valores de los parámetros para el diseño de mezcla asfáltica para los agregados de la Cantera Río Satipo, el uso granulométrico y la fórmula de trabajo (Ver Anexo I).

Cuadro N°4.13: Diseño de la Mezcla Asfáltica, Cantera Río Satipo.

PARÁMETROS	DISEÑO PRESENTADO	ESPECIFICACIÓN PARA TRÁFICO PESADO
Marshall (MTC-E 504)		
Estabilidad (kg)	1065	Min. 815
Flujo en mm.	3.28	2 – 4
% Vacíos con aire (MTC-E 505)	3.36	3 – 5
% Vacíos en el agregado mineral VMA	16.90	
Compactación por capa en cada testigo	75	75
Inmersión – Compresión (MTC-E 518)		
Resistencia – Retenida % Min	-	70
Relación Polvo / Asfalto	-	0.6 – 1.3
Relación Estabilidad / Flujo	3225	1700 – 4000
Índice de Compactabilidad	-	Min. 5

Fuente: Ensayos de laboratorio, Área de Calidad - Consorcio Vial Junín.

Cuadro N°4.14: Especificación Granulométrica MAC-2, Cantera Rio Satipo.

MALLA	CURVA GRANULOMÉTRICA	ESPECIFICACIONES
¾	100	100
½	90.6	80 – 100
3/8	82.3	70 – 88
N° 4	62.0	51 – 68
N° 10	41.5	38 – 52
N° 40	19.5	17 – 28
N° 80	11.7	8 – 17
N° 200	7.1	4 - 8

Fuente: Ensayos de laboratorio, Área de Calidad - Consorcio Vial Junin.

En función a los resultados obtenidos en los diseños se elabora la fórmula de trabajo para la mezcla asfáltica con agregados de la Cantera Rio Satipo, la cual servirá para los respectivos controles de calidad:

Cuadro N°4.15: Formula de Trabajo – Carpeta Asfáltica PEN 60-70, Cantera Rio Satipo.

PARÁMETROS	DISEÑO TEÓRICO	FORMULA DE TRABAJO	ESPECIFICACIONES
% Cemento Asfáltico PEN 60-70	5.8	5.8 ±0.3	-
% Grava Triturada en peso de la Mezcla	35.80	37.49	-
% Arena Combinada en peso de Mezcla	57.40	55.77	-
% Filler Cemento	1.00	0.94	-
% Aditivo AR RED RADICOTE	0.4 – 0.5	0.4 – 0.5	-
Temperatura Mezcla en Planta	145° C	145°C ±3°C	-
Temperatura colocación en Pista	130.° C	130°C ±5°C	-
Temperatura inicio Rodillado	125° C	120°C ±5°C	-
Temperatura final Rodillado	90° C	90°C ±5°C	-
Temperatura ambiente	25° C	25°C ±5°C	-
Estabilidad	1065 KG	1139 KG	MIN, 815 KG
Flujo en mm	3.28	3.40	2 – 4 mm
Peso Unitario	2.367	2.331	
% vacios	3.36	3.47	3 – 5 %
% VFA	80.45	79.40	-
% VMA	16.90	16.80	-
Factor Rigidez Kg/cm	3225	3349	1700 – 4000
% Compactación	-	-	Min, 98%
% Vacios campo	-	-	-
Índice de Compactibilidad	-	8.2%	Min, 5
Estabilidad Retenida	-	91.4	Min, 70%
Relación en Filler/Betún	-	1.18	0.6 – 1.3

Fuente: Ensayos de laboratorio, Área de Calidad - Consorcio Vial Junin.

También se describe los valores de los parámetros para el diseño de mezcla asfáltica para los agregados de la Cantera Mendoza, el uso granulométrico y la formula de trabajo para dicho diseño (Ver Anexo II).

Cuadro N°4.16: Diseño de la Mezcla Asfáltica, Cantera Mendoza.

PARÁMETROS	DISEÑO TEORICO	ESPECIFICACIÓN PARA TRAFICO PESADO
Marshall (MTC-E 504)		
Estabilidad (kg)	1158	Min. 815
Flujo en mm.	3.50	2 – 3.6
% Vacíos con aire (MTC-E 505)	3.85	3 – 5
%Vacíos en el agregado mineral VMA	18.10	
Compactación por capa en cada testigo	75	75
Inmersión – Compresión (MTC-E 518)		
Resistencia – Retenida % Min	-	70
Relación Polvo / Asfalto	-	0.6 – 1.3
Relación Estabilidad / Flujo	3378	1700 – 4000
Índice de Compactabilidad	-	Min. 5

Fuente: Ensayos de laboratorio, Área de Calidad - Consorcio Vial Junin.

Cuadro N°4.17: Especificación Granulométrica MAC-2, Cantera Mendoza

MALLA	CURVA GRANULOMÉTRICA DISEÑO TEORICO	ESPECIFICACIONES
¾	100	100
½	90.3	80 – 100
3/8	82.4	70 – 88
N° 4	57.2	51 – 68
N° 10	40.2	38 – 52
N° 40	19.8	17 – 28
N° 80	12.3	8 – 17
N° 200	7.0	4 - 8

Fuente: Ensayos de laboratorio, Área de Calidad - Consorcio Vial Junin.

En función a los resultados obtenidos en los diseños se elabora la fórmula de trabajo para la mezcla asfáltica con agregados de la Cantera Rio Satipo, la cual servirá para los respectivos controles de calidad:

Cuadro N°4.18: Formula de Trabajo – Carpeta Asfáltica PEN 60-70, Cantera Mendoza.

PARÁMETROS	DISEÑO TEÓRICO	FORMULA DE TRABAJO	ESPECIFICACIONES
% Cemento Asfáltico PEN 60-70	6.1	6.1 ±0.3	-
% Grava Triturada en peso de la Mezcla	40.19	35.85	-
% Arena Combinada en peso de Mezcla	52.77	57.11	-
% Filler Cemento	0.94	0.94	-
% Aditivo AR RED RADICOTE	0.4 – 0.5	0.4 – 0.5	-
Temperatura Mezcla en Planta	145° C	145°C ±3°C	-
Temperatura colocación en Pista	130.° C	130°C ±5°C	-
Temperatura inicio Rodillado	125° C	120°C ±5°C	-
Temperatura final Rodillado	90° C	90°C ±5°C	-
Temperatura ambiente	25° C	25°C ±5°C	-
Estabilidad	1158 KG	1211 KG	MIN, 815 KG
Flujo en mm	3.50	3.37	2 – 3.6 mm
Peso Unitario	2.384	2.371	
% vacios	3.85	3.31	3 – 5 %
% VFA	78.60	81.10	-
% VMA	18.10	17.50	-
Factor Rigidez Kg/cm	3378	3592	1700 – 4000
% Compactación	-	-	Min, 98%
% Vacios campo	-	-	-
Índice de Compactibilidad	-	7.2%	Min, 5
Estabilidad Retenida	-	84.3	Min, 70%
Relación en Filler/Betún	-	1.15	0.6 – 1.3

Fuente: Ensayos de laboratorio, Área de Calidad - Consorcio Vial Junin.

4.4. ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Los materiales de cantera propuestos en el proyecto, para la mezcla asfáltica en caliente, se ven perjudicados al ejecutar la comprobación de la adhesividad entre el agregado pétreo y el ligante asfáltico, caracterizando la mezcla con el contenido óptimo de ligante según la norma de ensayo AASHTO T 283 2003 METODO DENSAYO ESTÁNDAR PARA RESISTENCIA MEZCLAS ASFALTICAS COMPACTADAS AL DAÑO INDUCIDO POR HUMEDAD, (LOTTMAN) para verificar su sensibilidad al agua. La resistencia promedio a tracción indirecta de las probetas sometidas a curado húmedo deberá ser, ochenta por ciento (80 %) del valor promedio alcanzado por las probetas curadas en condición seca. Al no alcanzar este valor, se deberá incrementar la adhesividad empleando un aditivo mejorador de adherencia apropiado y/o un llenante mineral.

La influencia destructiva de la humedad ha sido reconocida desde hace varias décadas. Para lo cual hay una metodología para predecir el daño que puede causar la humedad en las mezclas bituminosas. Los mecanismos de humedad que causan deterioro del pavimento son:

- Presión de poros del agua en los huecos de la mezcla debido a las repeticiones de carga, diferencias térmicas que producen expansión - contracción por formación de ciclos, de cambios de temperatura o fatiga térmica, choque térmico o una combinación de estos factores.
- Desprendimiento del ligante por efecto del agua en la mezcla, a temperaturas entre moderadas y altas. Interacción agua - vapor con la relación betún - filler y las interfaces de los áridos más grandes.
- Interacción del agua con minerales arcillosos en el árido fino.
- Las mezclas dañadas por efecto de la humedad pierden cohesión y reducen su vida útil acelerando el proceso de fisuración del pavimento.

Lottman propone en su método evaluar el efecto de la humedad mediante ensayos de tracción sobre probetas sometidas a distintas condiciones, intentando reproducir la situación en que se encuentra el pavimento en servicio.

En lo que corresponde a la resistencia de las mezclas asfálticas inducido al daño por humedad; La adherencia entre el asfalto y el agregado debe ser evaluada desde el inicio de un diseño de mezcla por la importancia que implica, la cual se reflejara en la vida de un pavimento asfáltico que, alcanzando una mejor afinidad, permita una mejor estabilidad y durabilidad. El ensayo ASTM D-1664 es incierto porque, si se observan desprendimientos, no se puede saber si se deben a la acción del agua o la poca afinidad árido-ligante. Así mismo el ensayo Riedel Weber no considera las condiciones reales de obra. También, como se sabe, estos ensayos se realizan por separado y no compatibilizan, no pudiendo evaluarse el comportamiento real de la mezcla en conjunto.

Existe un ensayo moderno que se ajusta más a las condiciones de obra cuantificando la adhesividad. Este ensayo es el AASSHTO T-283 (ASTM D-4123), conocido también como Lottman, el cual permite determinar la resistencia a la tracción de los especímenes, midiendo la pérdida de cohesión de una mezcla compactada como resultado de los efectos de saturación acelerada en agua. Este ensayo mide el comportamiento de la mezcla en conjunto (árido fino, árido grueso y ligante).

Existen experiencias que muestran que, en condiciones favorables de temperatura, limpieza del árido, buena granulometría, etc., se llega a obtener buen recubrimiento o "adhesividad activa", pero que ante la lluvia y el tráfico el

ligante es desplazado del árido, quedando este limpio. Es decir que existe poca “resistencia al desplazamiento”, o bien, mala “adhesividad pasiva”.

El ensayo Lottman se orienta a dos objetivos: Primero identifica si una combinación de ligante asfáltico y agregado es susceptible a la acción del agua y luego evalúa la adhesividad y efectividad de los aditivos anti-desprendimiento o mejoradores de adherencia.

El ensayo AASHTO T-283 es uno de los más confiables para establecer la adhesividad en las mezclas asfálticas, ya que ensaya el material tal como se va usar en obra.

Procedimientos del Ensayo

- Se compactan los especímenes en equipos Marshall.
- Los especímenes deberán de tener 102 mm de diámetro por 63 mm espesor (4" x 2.5").
- Se compactarán con vacíos de aire del 6 al 8%.
- Se prepara un grupo condicionado y otro sin condicionar en series de tres, cuatro o cinco especímenes.
- Se someten a saturación al vacío en agua de 55 al 80%.
- Se congelan durante 16 horas a -18 °C (0 °F).
- Posteriormente se sumergen bajo agua durante 24 horas a 60 °C (140 °F), durante 2 horas a 25 °C (77 °F), Se fracturan los especímenes en prensa Marshall bajo tensión indirecta.

Se obtiene la Relación Tensión-Esfuerzo (Tensile Strength Ratio) min 80 %, una vez obtenida esta relación se seleccionará aquellos especímenes con los resultados que superen dicho valor.

Se ha procesado la información obtenida de los resultados de laboratorio del MTC, de acuerdo a las recomendaciones efectuadas en las normas técnicas, Sin aditivo y con aditivo, encontrándose lo siguiente:

El Cuadro N°4.19 muestra los resultados del ensayo AASHTO 182 (02)*, utilizando el agregado grueso de la Cantera Rio Satipo y con cemento asfáltico adicionando Aditivo Mejorador de Adherencia (Ver Anexo III). Según el Cuadro N°1.1 los agregados de esta cantera están cumpliendo con la adherencia.

Cuadro N°4.19: AASHTO 182 (02)* COATING AND STRIPPING OF BITUMEN – AGREGATE MIXTURE.

IDENTIFICACION DE LA MUESTRA	REVESTIMIENTO (%)	CUBRIMIENTO (%)
Cantera: Rio Satipo Piedra chancada de ¾"	100	+ 95
Cantera: Rio Satipo Piedra chancada de ½"	100	+ 95

Fuente: Ensayos de laboratorio (MTC), Área de Calidad - Consorcio Vial Junin.

El Cuadro N°4.20 muestra el ensayo de adhesividad de los ligantes bituminosos a los áridos finos de la Cantera Rio Satipo (Procedimiento Riedel Weber), para este ensayo se ha utilizado la arena de la Cantera Rio Satipo y el cemento asfáltico adicionando Aditivo Mejorador de Adherencia (Ver Anexo III). Se muestra que se está cumpliendo con los requerimientos de adhesividad para el agregado fino.

Cuadro N°4.20: MTC E 220 (2000)* ADHESIVIDAD DE LOS LIGANTES BITUMINOSOS A LOS ARIDOS FINOS.

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA	RESULTADO (GRADO)
	Desprendimiento Parcial – Desprendimiento Total
Cantera: Rio Satipo Arena chancada de 3/8"	5 - 10

Fuente: Ensayos de laboratorio (MTC), Área de Calidad - Consorcio Vial Junin.

Según el Cuadro N°4.21, se muestra el resultado para el ensayo Lootman para el diseño de mezcla con agregados de la Cantera Rio Satipo, sin aditivo mejorador de adherencia y utilizando como filler Cemento Portland Tipo I. Dicho ensayo muestra que hay una razón de esfuerzo a la tensión de 73.26%, lo cual no cumple con la norma ya que según el Cuadro N°1.5, el requerimiento mínimo es 80%, en consecuencia es necesario adicionar aditivo mejorador de adherencia para los agregados de esta cantera para mejorar los resultados (Ver Anexo III).

Cuadro N°4.21: AASHTO T-283 (2003)* MÉTODO DE ENSAYO ESTÁNDAR PARA LA RESISTENCIA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS AL DAÑO INDUCIDO POR HUMEDAD.

Acondicionamiento de Muestra	En Seco (d)			En Húmedo (1)		
	1	3	5	2	4	6
N° Espécimen						
Promedio de Vacíos de Aire (%)	7.0			7.0		
Resistencia a la Tensión en cada espécimen - psi	73.78	76.58	74.85	55.56	56.06	53.56
Promedio de Resistencia a la Tensión en cada condición - psi (St _d , St ₁)	75.15			55.06		
Daño por humedad (visual) ⁽²⁾	0			0		
Agregados fracturados (visual)	No presenta			No presenta		
Razón del esfuerzo a la tensión - TSR (promedio St₁/St_d) = 73.26%						

Fuente: Ensayos de laboratorio (MTC), Área de Calidad - Consorcio Vial Junín.

Según el Cuadro N°4.22, se muestra el resultado para el ensayo Lootman para el diseño de mezcla con agregados de la Cantera Rio Satipo, con aditivo mejorador de adherencia y utilizando como filler Cal Hidratada. Dicho ensayo muestra que hay una razón de esfuerzo a la tensión de 84.11%, lo cual cumple con la norma ya que según el Cuadro N°1.5, el requerimiento mínimo es 80%, en consecuencia es necesario el uso de aditivo mejorador de adherencia para los agregados de esta cantera (Ver Anexo III).

Cuadro N°4.22: AASHTO T-283 (2003)* MÉTODO DE ENSAYO ESTÁNDAR PARA LA RESISTENCIA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS AL DAÑO INDUCIDO POR HUMEDAD.

Acondicionamiento de Muestra	En Seco (d)			En Húmedo (1)		
	3	5	6	1	2	4
N° Espécimen						
Promedio de Vacíos de Aire (%)	7.0			7.0		
Resistencia a la Tensión en cada espécimen - psi	89.18	84.83	88.28	73.44	73.51	73.68
Promedio de Resistencia a la Tensión en cada condición - psi (St _d , St ₁)	87.43			73.54		
Daño por humedad (visual) ⁽²⁾	0			0		
Agregados fracturados (visual)	No presenta			No presenta		
Razón del esfuerzo a la tensión - TSR (promedio St₁/St_d) = 84.11%						

Fuente: Ensayos de laboratorio (MTC), Área de Calidad - Consorcio Vial Junín.

Según el Cuadro N°4.23, se muestra el resultado para el ensayo Loozman para el diseño de mezcla con agregados de la Cantera Rio Satipo, con aditivo mejorador de adherencia y utilizando como filler Cemento Portland Tipo I. Dicho ensayo muestra que hay una razón de esfuerzo a la tensión de 87.19%, lo cual cumple con la norma ya que según el Cuadro N°1.5, el requerimiento mínimo es 80%, en consecuencia es necesario el uso de aditivo mejorador de adherencia para los agregados de esta cantera y comparando con el Cuadro N°4.22, es recomendable el uso de Cemento Portland Tipo I en vez de Cal Hidratada por dos razones, la primera porque obtenemos mejores resultados y segundo debido a que Satipo es una zona de Emergencia y el uso de Cal Hidratada está restringido (Ver Anexo III).

Cuadro N°4.23: AASHTO T-283 (2003)* MÉTODO DE ENSAYO ESTÁNDAR PARA LA RESISTENCIA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS AL DAÑO INDUCIDO POR HUMEDAD.

Acondicionamiento de Muestra	En Seco (d)			En Húmedo (1)		
	II	IV	V	I	III	VI
N° Espécimen						
Promedio de Vacíos de Aire (%)	7.0			6.9		
Resistencia a la Tensión en cada espécimen - psi	83.69	82.09	86.71	73.03	73.85	73.27
Promedio de Resistencia a la Tensión en cada condición - psi (St _a , St ₁)	84.16			73.38		
Daño por humedad (visual) ⁽²⁾	0			0		
Agregados fracturados (visual)	No presenta			No presenta		
Razón del esfuerzo a la tensión - TSR (promedio St₁/St_a) = 87.19%						

Fuente: Ensayos de laboratorio (MTC), Área de Calidad - Consorcio Vial Junín.

En el cuadro N°4.24, se tienen los resultados de Adherencia en porcentaje para el agregado grueso de la cantera Mendoza y según el Cuadro N°1.1 no está cumpliendo los requerimientos para esta cantera, el cemento asfáltico esta sin aditivo mejorador de adherencia, por lo cual es necesario el uso de aditivo para mejorar los resultados en esta cantera (Ver Anexo IV).

Cuadro N°4.24: MTC E - 517 (2000)* CUBRIMIENTO DE LOS AGREGADOS CON MATERIALES ASFALTICOS (INCLUYE EMULSIONES) EN PRESENCIA DEL AGUA (STRIPPING) MEZCLAS ABIERTAS Y/O T.S.

IDENTIFICACION DE LA MUESTRA	ADITIVO (% en peso PEN)	REVESTIMIENTO (%)	CUBRIMIENTO (%)
Cantera: Mendoza Piedra chancada de ¾" 14% Piedra chancada de ½" 10%	-	100	+ 85

Fuente: Ensayos de laboratorio (MTC), Área de Calidad - Consorcio Vial Junin.

El Cuadro N°4.25 muestra el ensayo de adhesividad de los ligantes bituminosos a los áridos finos de la Cantera Mendoza (Procedimiento Riedel Weber), para este ensayo se ha utilizado la arena de la Cantera Mendoza y el cemento asfáltico sin Aditivo Mejorador de Adherencia (Ver Anexo IV). La cual está cumpliendo los requerimientos para el agregado fino para esta cantera.

Cuadro N°4.25: MTC E 220 (2000)* ADHESIVIDAD DE LOS LIGANTES BITUMINOSOS A LOS ARIDOS FINOS.

IDENTIFICACION DE LA MUESTRA	ADITIVO (% en peso PEN)	RESULTADO (GRADO)
		Desprendimiento Parcial – Desprendimiento Total
Cantera: Mendoza Arena chancada de 3/8" 35% Arena Zarandeada de 3/8" 40%	-	3 - 5

Fuente: Ensayos de laboratorio (MTC), Área de Calidad - Consorcio Vial Junin.

Según el Cuadro N°4.26, se muestra el resultado para el ensayo Lootman para el diseño de mezcla con agregados de la Cantera Mendoza, sin aditivo mejorador de adherencia y utilizando como filler Cemento Portland Tipo I. Dicho ensayo muestra que hay una razón de esfuerzo a la tensión de 63.30%, lo cual no cumple con la norma ya que según el Cuadro N°1.5, el requerimiento mínimo es 80%, en consecuencia es necesario el uso de aditivo mejorador de adherencia para los agregados de esta cantera (Ver Anexo IV).

Cuadro N°4.26: AASHTO T-283 (2003)* MÉTODO DE ENSAYO ESTÁNDAR PARA LA RESISTENCIA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS AL DAÑO INDUCIDO POR HUMEDAD.

Acondicionamiento de Muestra	En Seco (d)			En Húmedo (1)		
	A	C	F	B	D	E
N° Espécimen						
Promedio de Vacíos de Aire (%)	6.9			7.0		
Resistencia a la Tensión en cada espécimen - psi	104.58	103.25	105.25	66.06	66.51	65.60
Promedio de Resistencia a la Tensión en cada condición - psi (St _d , St ₁)	104.36			66.06		
Daño por humedad (visual) ⁽²⁾	0			0		
Agregados fracturados (visual)	No presenta			No presenta		
Razón del esfuerzo a la tensión - TSR (promedio St₁/St_d) = 63.30%						

Fuente: Ensayos de laboratorio (MTC), Área de Calidad - Consorcio Vial Junín.

En el cuadro N°4.27, se tienen los resultados de Adherencia en porcentaje para el agregado grueso de la cantera Mendoza y según el Cuadro N°1.1 está cumpliendo los requerimientos para esta cantera, el cemento asfáltico esta con aditivo mejorador de adherencia, por lo tanto es necesario el uso de aditivo para el diseño de mezcla asfáltica con agregados de esta cantera (Ver Anexo IV).

Cuadro N°4.27: MTC E - 517 (2000)* CUBRIMIENTO DE LOS AGREGADOS CON MATERIALES ASFÁLTICOS (INCLUYE EMULSIONES) EN PRESENCIA DEL AGUA (STRIPPING) MEZCLAS ABIERTAS Y/O T.S.

IDENTIFICACION DE LA MUESTRA	ADITIVO (% en peso PEN)	REVESTIMIENTO (%)	CUBRIMIENTO (%)
Cantera: Mendoza			
Piedra chancada de ¾" 14%	0.40%	100	+ 95
Piedra chancada de ½" 10%			

Fuente: Ensayos de laboratorio (MTC), Área de Calidad - Consorcio Vial Junín.

En el cuadro N°4.28, se tienen los resultados del ensayo de Adhesividad para el agregado fino de la cantera Mendoza, la cual está cumpliendo los requerimientos para el agregado fino para esta cantera, el cemento asfáltico esta con aditivo mejorador de adherencia (Ver Anexo IV).

Cuadro N°4.28: MTC E 220 (2000)* ADHESIVIDAD DE LOS LIGANTES BITUMINOSOS A LOS ARIDOS FINOS (PROCEDIMIENTO RIEDEL WEBER).

IDENTIFICACION DE LA MUESTRA	ADITIVO (% en peso PEN)	RESULTADO (GRADO)
		Desprendimiento Parcial – Desprendimiento Total
Cantera: Mendoza Arena chancada de 3/8" 35% Arena Zarandeada de 3/8" 40%	0.40%	4 - 10

Fuente: Ensayos de laboratorio (MTC), Área de Calidad - Consorcio Vial Junín.

Según el Cuadro N°4.29, se muestra el resultado para el ensayo Lootman para el diseño de mezcla con agregados de la Cantera Mendoza, con aditivo mejorador de adherencia y utilizando como filler Cemento Portland Tipo I. Dicho ensayo muestra que hay una razón de esfuerzo a la tensión de 72.25%, lo cual no cumple con la norma ya que según el Cuadro N°1.5, el requerimiento mínimo es 80%, en consecuencia es necesario incrementar el porcentaje de aditivo mejorador de adherencia para los agregados de esta cantera (Ver Anexo IV).

Cuadro N°4.29: AASHTO T-283 (2003)* MÉTODO DE ENSAYO ESTÁNDAR PARA LA RESISTENCIA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS AL DAÑO INDUCIDO POR HUMEDAD.

Acondicionamiento de Muestra	En Seco (d)			En Húmedo (1)		
	4	5	6	1	2	3
N° Espécimen						
Promedio de Vacíos de Aire (%)	6.9			7.1		
Resistencia a la Tensión en cada espécimen - psi	110.48	113.04	111.86	81.46	78.70	82.15
Promedio de Resistencia a la Tensión en cada condición - psi (St _d , St ₁)	111.79			80.77		
Daño por humedad (visual) ⁽²⁾	0			0		
Agregados fracturados (visual)	No presenta			No presenta		
Razón del esfuerzo a la tensión - TSR (promedio St₁/St_d) = 72.25%						

Fuente: Ensayos de laboratorio (MTC), Área de Calidad - Consorcio Vial Junín.

En el cuadro N°4.30, se observa la mejora de la mezcla asfáltica a los esfuerzos de tensión cuando se le adiciona un mejorador de adherencia, para ambas canteras se nota que la razón de esfuerzo a la tensión se incrementa y por ende se tendrá un mejor comportamiento de dicha mezcla, en consecuencia menor deformación en dicha mezcla.

Cuadro N°4.30: Cuadro comparativo de mejora de ensayo Lootman, para Canteras estudiadas para el diseño de mezclas asfálticas con mejorador de adherencia.

CANTERA	LOOTMAN SIN ADITIVO	LOOTMAN CON ADITIVO
Rio Satipo	73.26%	87.19%
Mendoza	63.30%	72.25%

Fuente: Fuente propia.

CAPÍTULO V: MONITOREO EN CAMPO

5.1. CONTROL Y MONITOREO DE LA COLOCACION DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CAMPO

A continuación se hace una descripción gráfica de los controles de calidad durante la preparación y colocación de la mezcla asfáltica en caliente:

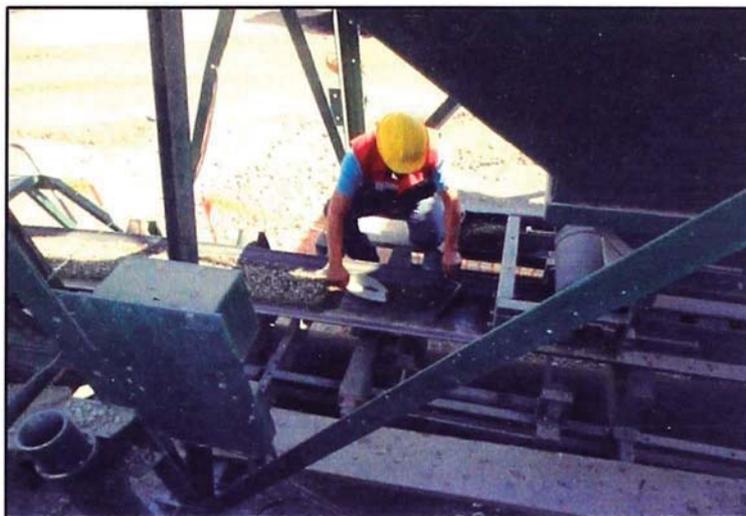


Figura N°5.1: Muestreo de Faja Transportadora.

Se pesa la muestra de asfalto en caliente, luego se procede a incorporar tricloroetileno para luego colocar el filtro en el plato de la centrifuga del lavado asfáltico y proceder con el ensayo.



Figura N°5.2: Lavado Asfáltico en la centrifuga.

Las briquetas se preparan con diferentes contenidos de asfalto; estos contenidos tienen una variación de 0,5 %. Se deben preparar al menos tres briquetas para cada combinación de agregados con cemento asfáltico. En la preparación de los cuerpos de prueba o briquetas el agregado y el asfalto son calentados separadamente a temperaturas especificadas, y entonces mezclados y compactados.

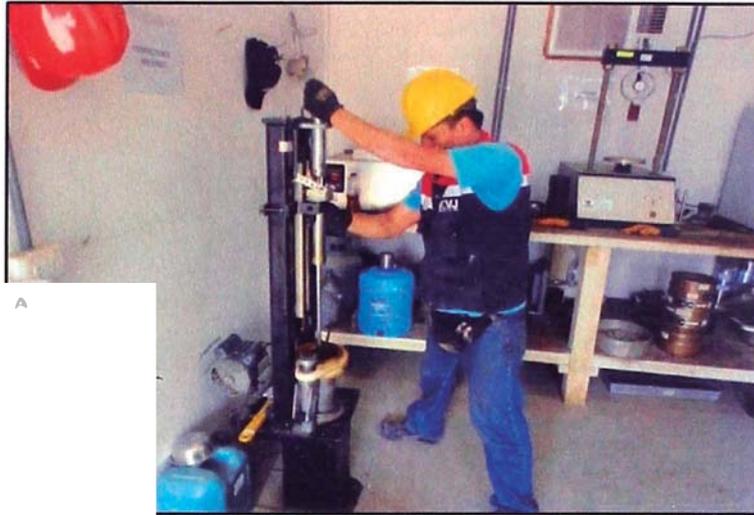


Figura N°5.3: Compactación de briquetas en caliente para ensayo Marshall.

El peso específico total de cada probeta se determina tan pronto como las probetas recién compactadas se hayan enfriado a la temperatura ambiente. Esta medición de peso específico es esencial para un análisis preciso de densidad-vacíos.

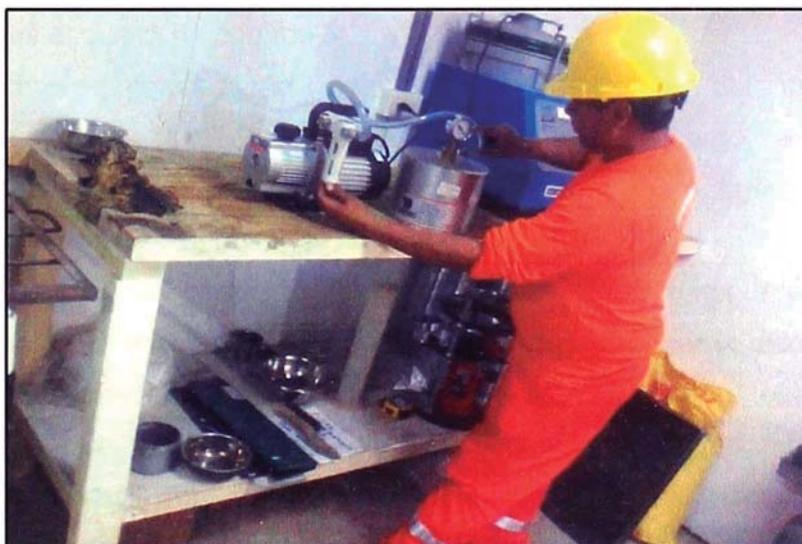


Figura N°5.4: Ensayo Rice para determinación de densidad máxima teórica.

El ensayo de estabilidad está dirigido a medir la resistencia a la deformación de la mezcla. La fluencia mide la deformación, bajo carga que ocurre en la mezcla.

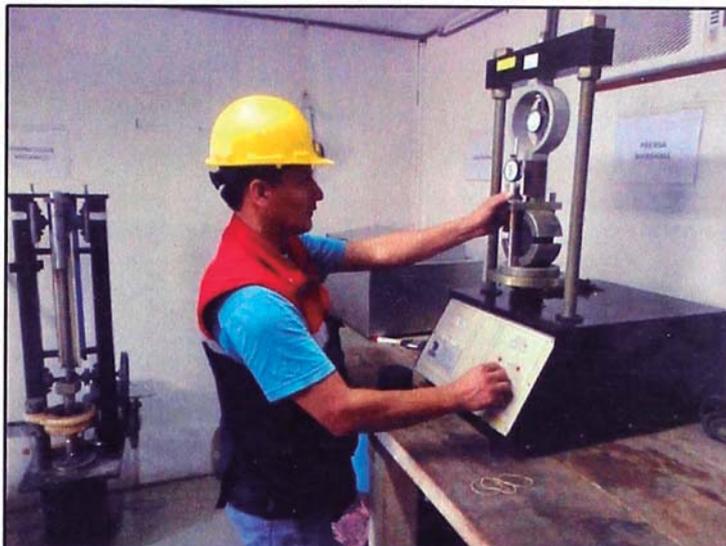


Figura N°5.5: Penetración de briquetas para hallar estabilidad y flujo en la prensa Marshall.

El valor de estabilidad Marshall es una medida de la carga bajo la cual una probeta cede o falla totalmente. Durante un ensayo, cuando la carga es aplicada lentamente, los cabezales superior e inferior del aparato se acercan, y la carga sobre la biqueta aumenta al igual que la lectura en el indicador del cuadrante. Luego se suspende la carga una vez se obtiene la carga máxima. La carga máxima indicada por el medidor es el valor de Estabilidad Marshall. Debido a que la estabilidad Marshall indica la resistencia de una mezcla a la deformación existe una tendencia a pensar que si un valor de estabilidad es bueno, entonces un valor más alto será mucho mejor.

Para muchos materiales de ingeniería, la resistencia del material es, frecuentemente, una medida de su calidad; sin embargo, este no es necesariamente el caso de las mezclas asfálticas en caliente. Las estabilidades extremadamente altas se obtienen a costa de durabilidad.

La fluencia Marshall, medida en centésimas de pulgada representa la deformación de la biqueta. La deformación está indicada por la disminución en el diámetro vertical de la biqueta.

Las mezclas que tienen valores bajos de fluencia y valores muy altos de estabilidad Marshall son consideradas demasiado frágiles y rígidas para un pavimento en servicio. Aquellas que tienen valores altos de fluencia son

consideradas demasiado plásticas y tiene tendencia a deformarse bajo las cargas del tránsito.

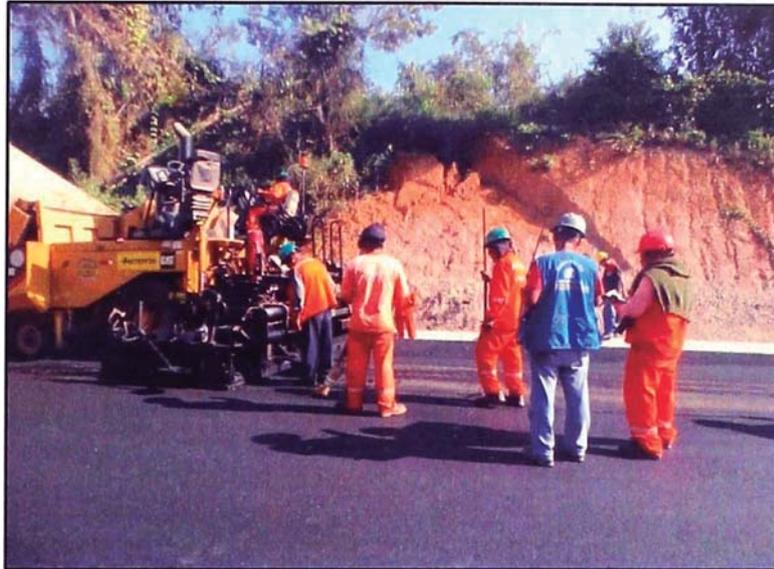


Figura N°5.6: Colocación de mezcla asfáltica en caliente y control de temperatura de colocación.



Figura N°5.7: Muestreo de mezcla asfáltica in situ para ensayos en Laboratorio.

Cuadro N°5.1: Control de ensayos de mezcla asfáltica y granulometría de los agregados correspondiente al día 10/08/2014.

Parámetros	Especificaciones Técnicas	Produccion	Produccion	Produccion	Produccion	Promedio Diario
		10/08/2014	10/08/2014	10/08/2014	10/08/2014	
Marshall (MTC-E 504)		<u>Marshall N° 1</u>	<u>Marshall N° 2</u>	<u>Marshall N° 1</u>	<u>Marshall N° 2</u>	
1. Estabilidad (kg)	Min. 815	Planta 1113	Planta 1078	Pista 1094	Pista 1089	1094
2. Flujo en mm.	2 3.6	2.90	2.90	2.85	2.90	2.89
3. % Vacíos con aire (MTC-E 505)	3 5	4.23	3.92	4.05	3.62	3.96
4. %Vacíos en el agregado mineral VMA	Min. 14	18.0	17.6	17.6	17.1	17.6
5. Relacion Polvo / Asfalto	0.6 1.3	1.06	1.04	1.10	1.03	1.06
6. Relacion Estabilidad / Flujo	1700 4000	3838	3719	3838	3755	3788
7. Contenido de Cemento Asfáltico	5.8 % Según Diseño (±0.3)	6.00	5.95	5.91	5.86	5.93
8. Peso Unitario	-	2.342	2.349	2.335	2.345	2.343

Parámetros	Especificaciones Técnicas	Produccion	Produccion	Produccion	Produccion	Promedio Diario
		10/08/2014	10/08/2014	10/08/2014	10/08/2014	
Curva Granulométrica	Mac 2	<u>Lavado N° 1</u>	<u>Lavado N° 2</u>	<u>Lavado N° 1</u>	<u>Lavado N° 2</u>	
Tamiz Abertura	%	Planta	Planta	Pista	Pista	
3/4"	19.050	100	100	100	100	100
1/2"	12.700	80 100	93.1	90.7	95.4	93.5
3/8"	9.525	70 88	85.2	83.1	80.0	83.4
N° 4	4.760	51 68	64.3	58.3	56.9	60.2
N° 10	2.000	38 52	48.7	40.8	44.6	44.7
N° 40	0.425	17 28	21.0	20.5	20.7	20.7
N° 80	0.180	8 17	10.6	12.7	12.8	13.1
N° 200	0.074	4 8	6.4	6.2	6.5	6.3

Fuente: Ensayos de laboratorio, Área de Calidad - Consorcio Vial Junin.

5.2. EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL PAVIMENTO

Se ha realizado una evaluación superficial del pavimento con la medición de la rugosidad del pavimento, Ensayos de Lisura, Ensayo de Evaluación estructural del pavimento mediante la medición de deflexiones con viga benkelman, y comprobación de la densidad in situ de la capa de superficie del pavimento, con la finalidad de analizar todos los parámetros que deben de cumplirse según indican las especificaciones técnicas.

Los controles establecidos para la capa terminada de la carpeta asfáltica son los siguientes:

- Ensayo de Rugosidad
- Ensayo de Lisura
- Ensayo Evaluación Deflectométrica
- Ensayo de Compactación (densidad)

❖ Regularidad superficial o Rugosidad

Como parte del ensayo de la regularidad del pavimento se efectuó la evaluación de la rugosidad con el equipo tipo Merlín, el cual consiste en la toma de lecturas en tramos de 400 mts, determinándose un valor de IRI, el cual será integrado para cumplir con las exigencias establecidas en las especificaciones técnicas de obra. Las especificaciones técnicas del MTC establecen lo siguiente “La medición de la rugosidad sobre la superficie de rodadura terminada, deberá efectuarse en toda su longitud y debe involucrar ambas carriles. La rugosidad, en términos IRI, tendrá un valor máximo de 2,0 m/km.

Los datos de campo se han obtenido con el equipo de rugosidad “Merlín” los cuales han sido registrados en el formato “Evaluación Superficial del Pavimento – Medición de la Rugosidad”, de acuerdo a la metodología establecida por el equipo se efectúa doscientas lecturas en un tramo de 400 m, los cuales serán procesados y se determinara un valor de IRI.

Se ha procesado la información obtenida de campo, de acuerdo a las recomendaciones efectuadas por las especificaciones técnicas del MTC, encontrándose los siguientes resultados:

Cuadro N°5.2: Resultados de Rugosidad.

Descripción	Carril derecho	Carril izquierdo
	IRI (m/km)	IRI (m/km)
Valor promedio	1.81	1.78
Valor característico	1.99	1.97
Valor máximo	1.92	1.94
Valor mínimo	1.26	1.44

Fuente: Ensayos de laboratorio, Área de Calidad - Consorcio Vial Junín.

❖ Lisura

El procesamiento de los datos de campo se ha realizado mediante la comprobación con una regla de tres metros (3 m.) colocando

perpendicularmente al eje de la vía en toda su longitud y debe involucrar ambos carriles. La lisura tendrá un valor máximo de 5 mm.

Se ha procesado la información obtenida de campo, encontrándose los siguientes resultados

Cuadro N°5.3: Resultados de Lisura.

Descripción	Carril derecho	Carril izquierdo
	(mm.)	(mm.)
Valor promedio	0.97	1.04
Valor máximo	3.00	2.67
Valor mínimo	0.00	0.00

Fuente: Ensayos de laboratorio, Área de Calidad - Consorcio Vial Junín.

❖ **Medición de deflexiones sobre la carpeta asfáltica terminada**

El procesamiento de los datos de campo se ha realizado mediante la metodología desarrollado por el Consorcio Vial Sierra Sur, el cual fue ratificado mediante las especificaciones técnicas del Ministerio de Transportes y Comunicaciones. La metodología de evaluación se detalla en la norma de ensayo "Medida de la Deflexión y Determinación del Radio Curvatura en un Pavimento Flexible Empleando la Viga benkelman - MTC-E1002-2000"

Se ha efectuado la medición de las deflexiones con el equipo de viga Benkelman, las lecturas han sido obtenidas cada 50 mts, en ambos carriles

❖ **Compactación**

El procesamiento de los datos de campo se ha realizado mediante la extracción de muestras a lo largo de la vía con el equipo de diamantina las cuales fueron ensayadas en laboratorio y comparadas con el peso unitario del ensayo Marshall del día de producción y obteniéndose la verificación del porcentaje de compactación, vacíos de campo y la verificación del espesor del testigo extraído.

Previo al control del grado de compactación se ha efectuado la calibración de las densidades obtenidas mediante “el ensayo de compactación in situ – densímetro nuclear (MTC 510)”,

La densidad media del tramo (D_m) deberá ser, cuando menos, el noventa y ocho por ciento (98%) de la media obtenida al compactar en el laboratorio con la técnica. Es importante resaltar que el grado de compactación mejorara debido a la acción del tráfico, especialmente los tramos recién colocados.

5.3. CONTROL POST CONSTRUCCIÓN

La deformación permanente en las mezclas asfálticas es una combinación de densificación (cambio de volumen) y deformación por corte de las mismas bajo la acción de cargas dinámicas provocadas por el tránsito y el clima, y puede ser estimado a través de distintas ecuaciones constitutivas. Estas relaciones son alimentadas a través de datos obtenidos a partir de distintas líneas de trabajo que pueden complementarse entre sí. Las principales son:

1. Pista de ensayo a escala natural y/o equipamientos especiales sobre rutas reales (equipos simuladores de tránsito pesado) o tramos experimentales.
2. La realización de ensayos en el laboratorio y la obtención de los coeficientes de ajuste con respecto al comportamiento real de la estructura.
3. Análisis de datos de rutas reales obtenidos del seguimiento periódico de tramos en servicio.

Los ensayos de laboratorio tratan de reproducir lo mejor posible las condiciones de sollicitaciones in situ, e incluyen generalmente distintas posibilidades de ensayo de las muestras bajo diferentes estados de tensiones, temperatura, humedad, etc. Entre los más utilizados se encuentran:

1. Ensayo de creep en compresión axial y triaxial
2. Ensayo de creep en compresión axial y triaxial con carga pulsante
3. Ensayo en compresión triaxial con carga dinámica

4. Ensayo de tracción indirecta por compresión diametral con carga pulsante
5. Ensayo de corte simple
6. Ensayos de rueda cargada o Wheel-tracking tests

5.3.1. Ensayo de creep estático en compresión axial y triaxial

El ensayo de creep con o sin confinamiento lateral y con carga estática ha sido muy usado para evaluar las características de las mezclas asfálticas y sus resultados fueron usados en variados métodos de predicción del ahuellamiento.

Es uno de los ensayos más utilizados debido a su simplicidad. Sus resultados expresan la evolución de la deformación específica permanente en función del tiempo, para una carga aplicada y temperatura de ensayo.

Se somete a las probetas de tipo Marshall a un ensayo de compresión vertical con una carga estática, sin confinamiento lateral, para condiciones prefijadas de carga y temperatura. Los resultados encontrados solo permiten comparar el comportamiento de las mezclas ante la deformación acumulada, pero no se encontró un modelo adecuado para predecir el ahuellamiento.



Figura N°5.8: Creep Uniaxial.

5.3.2. Ensayo de creep en compresión axial y triaxial con carga pulsante

Para la medición de la respuesta de las mezclas asfálticas con carga repetida (pulso de carga repetido con determinada frecuencia en el tiempo) existe una variedad muy grande de sistemas de carga, desde el tipo mecánico pasando por

los neumáticos hasta los sistemas electrohidráulicos. Los sistemas más sofisticados como el equipo de ensayo Fast-Cell (UI-FC) de la Universidad de Illinois en EEUU, son capaces de:

- Aplicar cargas repetidas tanto axiales como laterales, en fase una con otra, para pulsos de carga con formas distintas, para un rango entre 0.01 a 1.0 segundos de aplicación de carga.
- Aplicación de la carga axial tanto en compresión como en tracción.
- Incorporar periodos de descanso entre ciclos de sollicitación.
- Medir la deformación permanente y resiliente horizontal y vertical.
- Medir la temperatura con una tolerancia de $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$.



Figura N°5.9: Equipo Fast-Cell.

5.3.3. Ensayo en compresión triaxial con carga dinámica

Estos ensayos aplican una carga sinusoidal en forma dinámica, para un rango de frecuencias. Permiten determinar sobre una probeta cilíndrica de mezcla asfáltica tanto sus propiedades dinámicas como de creep. Los ensayos triaxiales dinámicos también permiten la determinación de propiedades fundamentales como los módulos dinámicos y el Angulo de fase en función de la frecuencia de carga, el número de ciclos aplicados y la temperatura de ensayo. Este ensayo ha sido extensamente usado debido a que se aplica un estado uniforme de tensiones sobre la probeta (sobre todo si los cabezales están convenientemente lubricados), admite la aplicación y combinación de un amplio rango de presiones de confinamiento y de tensores desviadores permitiendo reproducir gran parte de los estados de tensiones in situ, tiene algunas limitaciones para reproducir los

estados de tensiones de la carga de rodamiento, y finalmente es de relativa fácil implementación.

5.3.4. Ensayo de tracción indirecta por compresión diametral con carga pulsante

El ensayo de tracción indirecta por compresión diametral con cargas repetidas es un ensayo que ha alcanzado un gran desarrollo a nivel de la técnica vial mundial. Este ensayo, destinado a caracterizar originariamente la resistencia a la tracción de hormigones de cemento portland, fue luego adaptado en los Estados Unidos y en Brasil para la determinación del módulo de deformación y la resistencia a la fatiga de mezclas asfálticas.

Las razones básicas en las que se apoyó esta aplicación son:

- Es sencillo de efectuar y de fácil implementación.
- Las probetas requeridas son comunes a las de otros ensayos (Marshall) pudiendo utilizarse muestras obtenidas del camino o elaboradas en laboratorio.
- Posee buena repetibilidad con bajo coeficiente de variación de sus resultados.
- Pueden efectuarse ensayos con cargas repetidas o en condición de carga estática.



Figura N°5.10: Fatiga por compresión.

5.3.5. Ensayo de corte simple

El ensayo de corte simple ha sido muy usado en mecánica de suelos para la determinación de las propiedades al corte de los suelos. Para mezclas asfálticas su uso se justifica cuando la causa predominante del ahuellamiento es la fluencia plástica de corte.

El equipo más apropiado es el que permite la aplicación de una carga repetida o dinámica sobre un rango de frecuencias que permita además la determinación de los módulos de corte resiliente y dinámico.

Si bien pocos investigadores han usado esta técnica de ensayo, es aplicable para establecer las propiedades de las mezclas asfálticas al ahuellamiento ya que este es provocado principalmente por la fluencia por corte.



Figura N°5.11: Corte simple - SUPERPAVE.

5.3.6. Ensayo de Rueda cargada o Wheel-Tracking Tests

Los ensayos de rueda cargada se encuentran dentro de los ensayos de simulación. Para alcanzar una validación correcta entre lo que sucede en laboratorio e in situ, el ensayo debe reproducir las condiciones de tensiones que se desarrollan dentro del pavimento y para un rango de temperaturas amplio que permita abarcar condiciones desfavorables del orden de los 60°C.

El procedimiento general de ensayo consiste en medir la velocidad de deformación o la deformación vertical que se produce en un espécimen de mezcla asfáltica, prismático o cilíndrico, ante la aplicación de una carga

dinámica, aplicada mediante una rueda cargada. Entre los más difundidos tenemos:

- Georgia Loaded Wheel Tester (GLWT).
- Asphalt Pavement Analyzer (APA).
- Hamburg Wheel-Tracking Device (HWT D).
- Equipo de Pista de ensayo de laboratorio según la normativa española e inglesa.
- Purdue University Laboratory Wheel-Tracking Device.
- French Wheel Tracker (FWT).
- Model Mobile Load Simulator (MMLS3).

Cuadro N°5.4: Comparación de las principales características de los ensayos de Rueda Cargada.

	LCPC	Hamburgo	Georgia	GB (BS)	BS EN (CEN)	ESPAÑA (NLT)
Carga de la rueda (N)	5000	705	700	520	Variable	-
Presión sobre la probeta (kPa)	600	1.5	700	-	Variable	900
Frecuencia de carga (Ciclos por minuto)	60	53	45	21	26	21
Tipo de rueda	Rueda Neumática	Rueda de acero	Rueda de caucho	Rueda de caucho	Rueda de caucho y Neumática	Rueda de caucho
Medio del Ensayo	Aire	Agua	Aire	Aire	Aire	Aire
Masa de la probeta (kg)	20	10	5	Variable	Variable	Variable
Espesor de la probeta (mm)	100	Variable	75	35-55	Variable	51
Temperatura del Ensayo (°C)	60	50	40	45 , 60	Variable	60
Máxima deformación permitida	10 mm.	4 mm.	7 mm.	15 mm	Variable	-

5.6. EVALUACIÓN ECONÓMICA

Debido a que la evaluación económica se hará en función a 01 m³ de mezcla asfáltica y los insumos como el PEN 60/70, Filler Mineral y Radicote están en kilogramos. Calcularemos el peso de cada uno de ellos por m³ de mezcla asfáltica:

Cuadro N°5.5: Calculo del peso del PEN 60/70 por m³ de mezcla asfáltica.

CALCULO DEL PESO DEL PEN 60/70 POR M3		
PORCENTAJE SEGÚN DISEÑO (en peso)	5.80	%
DENSIDAD DE MAC	2,367.00	kg/m ³
PESO DE LA MEZCLA ASFALTICA	2,367.00	kg
PESO DEL PEN	137.29	kg
VOLUMEN DEL PEN	137.29	lt
VOLUMEN DEL PEN	36.27	gln

Fuente: Fuente Propia.

Para un metro cubico de mezcla asfáltica, tenemos que utilizar 137.29 kg de Cemento Asfaltico.

Cuadro N°5.6: Calculo del peso del Filler por m³ de mezcla asfáltica.

CALCULO DEL PESO DE FILLER POR M3		
DOSIS SEGÚN DISEÑO PROYECTO (Del peso de MAC)	1.00	%
PESO DE LA MEZCLA ASFALTICA	2,367.00	kg
PESO DE FILLER MINERAL	23.67	kg

Fuente: Fuente Propia.

Para un metro cubico de mezcla asfáltica, tenemos que utilizar 23.67 kg de Filler Mineral.

Cuadro N°5.7: Calculo del peso RADICOTE por m³ de mezcla asfáltica.

CALCULO DEL PESO DE RADICOTE POR M3		
DOSIS SEGÚN PROVEEDOR (Del peso del PEN)	0.40	%
PESO DE RADICOTE	0.55	kg

Fuente: Fuente Propia.

Para un metro cubico de mezcla asfáltica, tenemos que utilizar 0.55 kg de Aditivo Mejorador de Adherencia.

Por lo tanto:

Para un metro cubico de mezcla asfáltica sin aditivo mejorador de adherencia el costo es de:

Cuadro N°5.8: Costo de Mezcla Asfáltica sin Aditivo Mejorador de Adherencia.

PARTIDA	UNID.	CANTIDAD	PRECIO	PARCIAL
COLOCACION DE CONCRETO ASFÁLTICO EN CALIENTE	m3	1.00	18.96	18.96
PREPARACIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE (SIN ASFALTO)	m3	1.00	203.40	203.40
CEMENTO ASFÁLTICO DE PENETRACIÓN 60-70	kg	137.29	2.36	324.00
FILLER MINERAL	kg	23.67	0.53	12.55
ADITIVO MEJORADOR DE ADHERENCIA	kg	0.00	18.00	0.00
				558.91

Fuente: Fuente Propia.

Así mismo para un metro cubico de mezcla asfáltica con aditivo mejorador de adherencia (AR RED RADICOTE), el costo será:

Cuadro N°5.9: Costo de Mezcla Asfáltica con Aditivo Mejorador de Adherencia (Radicote).

PARTIDA	UNID.	CANTIDAD	PRECIO	PARCIAL
COLOCACION DE CONCRETO ASFÁLTICO EN CALIENTE	m3	1.00	18.96	18.96
PREPARACIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE (SIN ASFALTO)	m3	1.00	203.40	203.40
CEMENTO ASFÁLTICO DE PENETRACIÓN 60-70	kg	137.29	2.36	324.00
FILLER MINERAL	kg	23.67	0.53	12.55
ADITIVO MEJORADOR DE ADHERENCIA	kg	0.55	18.00	9.90
				568.81

Fuente: Fuente Propia.

Cabe señalar que este análisis de costos se realizó en el mes de octubre del 2014, para mayor detalle se adjunta en el **Anexo VII**, los análisis de precios unitarios utilizados para dicha evaluación económica.

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

- ✓ En el Perú generalmente se diseñan las mezclas asfálticas según Marshall, y los controles de calidad para éstas, se basan generalmente en ensayos de laboratorio empíricos; se deberían implementar pistas de ensayo ya que reflejarían de forma más real el comportamiento de la carpeta asfáltica en condiciones reales.
- ✓ En acuerdo a los resultados obtenidos con el Ensayo AASHTO T 283 2003 METODO D ENSAYO ESTÁNDAR PARA RESISTENCIA MEZCLAS ASFALTICAS COMPACTADAS AL DAÑO INDUCIDO POR HUMEDAD, (LOTTMAN) el cual se realizó con aditivo y sin aditivo mejorador de adherencia, se está asegurando la buena adhesión entre el asfalto y el agregado en general al cumplir con el mínimo recomendado por el ensayo (80 %); por lo tanto la mezcla asfáltica requiere la adición de mejorador de adherencia.
- ✓ El uso de aditivos mejoradores de adherencia es una buena solución para prever las fallas prematuras en los pavimentos en condiciones extremas de clima y tráfico, ya que incremento la resistencia a la tracción y por ende mejora la afinidad entre los áridos y el cemento asfáltico; siendo una solución económica ya que el costo se incrementa solo en un 1% del costo de la preparación y colocación de la mezcla asfáltica por metro cubico.

7.2. Recomendaciones

- ✓ Para una mejor concepción del comportamiento Asfalto vs. Agregado y en acuerdo a los antecedentes presentados se recomienda tomar en consideración el uso del mejorador de adherencia en zonas lluviosas y zonas donde hayan cambios de temperatura, ya que la impermeabilidad

de la carpeta asfáltica está basado en la relación polvo asfalto, por capilaridad los materiales espesantes como el cemento asfáltico, filler mineral y aditivo mejorador de adherencia suben a la parte superior de la carpeta asfáltica, consecuencia de esto se impermeabiliza la parte superior; evitando el ingreso de agua por las porosidades y evita que la carpeta presente deformaciones o fallas prematuras.

- ✓ Se debe tener máximo cuidado al dosificar el aditivo con esto se evitara el envejecimiento prematuro del asfalto ya que pierde adhesividad al volatizarse los componentes aceitosos del mismo o por absorción de los áridos porosos. Este envejecimiento empieza durante el proceso de elaboración de la Mezcla asfáltica en planta al elevarse a altas temperaturas y continúa durante el transporte, colocación y compactación de la misma en obra.

BIBLIOGRAFÍA

Referencia Hemerográfica:

1. Huamán Guerrero, Néstor (2011). La Deformación Permanente en las Mezclas Asfálticas y el consecuente deterioro de los pavimentos asfálticos en el Perú. UNI, PERU.
2. Garnica, P.A. y Gómez, L.J., (2001). Publicación Técnica No 176: Deformaciones permanentes en Materiales Granulares para la sección estructural de carreteras. Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). Instituto Mexicano de Transporte (IMT).México.
3. Padilla Alejandro Rodríguez (2007). Tesis de Grado: Deformaciones plásticas en capas de rodaduras en pavimentos asfálticos. Universidad UPC. México.
4. Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2013). Especificaciones Técnicas Generales para Construcción de Carreteras EG 2013. Perú
5. Geissler, W.: Bitumen 4 (1934), Pág. 191
6. Vetlesen, E. Van: Meddeker fra Veindirektoren. Oslo
7. Valton, P.A.: Highways and Bridges, 3 (1937), página 5
8. Ponencias CILAS: Quito 2003, Costa Rica 2005, Cuba 2007. Diferentes autores sobre trabajos de investigación, referidos al tema de la adhesión Ligante Asfáltico vs. Agregado en general.

Referencia Electrónica:

1. Páginas Web visitadas: Trabajos de Investigación presentados en Congresos Internacionales, Artículos Técnicos publicados en revistas especializadas (2003 - 2011)
 - Wikipedia, la enciclopedia libre (2011). www.wikipedia.org/wiki/Perú
 - Asociación Española de la Carretera: www.aecarretera.com
 - Asociación Mejicana del Asfalto: www.amaac.org.mx
 - Comisión Permanente del Asfalto - argentina: www.cpasfalto.org
 - Instituto Chileno del Asfalto: www.ichasfalto.com
 - Instituto Brasileño de Petróleo: www.ibp.org.br
 - Ministerio de Transportes y Comunicaciones: www.mtc.gob.pe