Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

**U N I V E R S I D A D  D E L  B I O - B I O**
**FACULTAD DE INGENIERIA**
**DEPARTAMENTO INGENIERIA CIVIL**

# "Diseño de Base tratada de Escoria de Vanadio con Asfalto espumado para Caminos Básicos"

**Proyecto de Título presentado en conformidad a los requisitos para obtener el Título de Ingeniero Civil**

Cristián Salgado Bocaz

**Prof.Guía: Marcos Pardo Rojas**

**Concepción, Noviembre del 2008**

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile




## AGRADECIMIENTOS.

Mis agradecimientos primero que todo a Dios, por darme siempre la fuerza para seguir adelante frente a cualquier adversidad. A mi familia desde mis abuelas hasta mis primos, que siempre han estado cerca y en constante apoyo, pero en especial a mis padres Eleacer y Elizabeth (in memorian), quienes se han esforzado por darnos siempre lo mejor y enseñarnos a ser mejores personas y que cada día se puede ser mejor, también hago parte a mi querido hermano Mauricio, quien me ha acompañado mis últimos años universitarios y así sentir la familia más cerca. Del mismo modo quisiera agradecer a la familia Aldana Cabezas, que por mucho tiempo fueron mi segunda familia en Concepción, a cada uno de sus integrantes por su apoyo, preocupación y amistad.

Agradecer también al Laboratorio Regional de Vialidad, especialmente al Sr. Marcos Pardo, por su disposición, ayuda y guía en la realización de este proyecto de título. Asimismo al Laboratorio Nacional de Vialidad y sus empleados quienes con apoyo profesional hicieron posible este estudio.

A mis compañeros y amigos de colegio y universidad, con quienes compartimos tantos momentos de estudio y diversión. Igualmente agradecer al equipo de Handball de la Universidad del Bio-Bio (tetra campeón ADESUP), donde creamos lazos de amistad y camaradería que hicieron de este equipo más que una selección, sino un grupo de amigos que tenían una pasión en común.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



# INDICE

**INDICE** **2**

**INTRODUCCIÓN.** **4**

**JUSTIFICACIÓN DEL TEMA.** **5**

**OBJETIVOS.** **5**

**CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES.** **6**

**1.1. Antecedentes sobre la red vial nacional.** **6**

**1.2. Caminos Básicos.** **9**

**1.3. Soluciones para caminos básicos.** **14**

**CAPÍTULO 2: CONCEPTOS GENERALES** **18**

**2.1. Definiciones fundamentales.** **18**

**2.2. Asfalto.** **19**

**2.3. Propiedades físicas de los Asfaltos.** **21**

**2.4. Tipos de asfalto utilizados en Pavimentos.** **28**
2.4.1. Cementos Asfálticos. 28
2.4.2. Asfaltos Cortados. 30
2.4.3. Emulsiones asfálticas. 32

**2.5. Agregados Pétreos.** **34**
2.5.1. Propiedades de los agregados pétreos. 35
2.5.2. Naturaleza de los agregados pétreos. 35
2.5.3. Principales características de los agregados pétreos para pavimentos. 36
2.5.4. Ensayos para caracterizar los agregados. 40

**2.6. Agentes Estabilizadores.** **45**
2.6.1. Estabilizadores cementantes. 45
2.6.2. Estabilizadores asfálticos. 48
2.6.3. Comparación entre estabilizadores cementantes versus bituminosos. 53

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



**CAPÍTULO 3: RECICLADO CON ASFALTO ESPUMADO. 56**

**3.1. Reciclado en planta. 57**

**3.2. Reciclado in situ. 57**

**3.3. Aplicaciones del Reciclado en frío. 58**

**3.4. Principales factores que afectan el reciclado en frío. 64**

**3.5. Beneficios del reciclado en frío. 65**

**3.6. Estabilización con Asfalto Espumado. 67**

**3.7. Requerimientos del material estabilizado con asfalto espumado. 77**

**CAPÍTULO 4: ENSAYOS, DISEÑO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS. 81**

**4.1. Propiedades de la base de escoria de Vanadio. 81**
4.1.1. Granulometría de la escoria de Vanadio. 81
4.1.2. Análisis Proctor modificado de la escoria de Vanadio. 83
4.1.3. Capacidad de soporte de la Escoria de Vanadio (CBR). 85
4.1.4. Desgaste de Los Angeles de la escoria de Vanadio. 86

**4.2. Diseño de la espuma óptima. 87**

**4.3. Prediseños con cantidad fija de asfalto y variación de la granulometría. 92**
4.3.1. Prediseño con cantidad fija de asfalto y variación del porcentaje de la adición de polvo de roca. 98

**4.4. Diseño de la cantidad óptima de asfalto espumado. 101**
4.4.1. Diseño de cantidad óptima de asfalto para probetas de Escoria de Vanadio. 102
4.4.2. Diseño de cantidad óptima de asfalto para probetas de Escoria de Vanadio con polvo de roca (75/25). 106
4.4.3. Diseño de cantidad óptima de asfalto para probetas de Escoria de Vanadio con polvo de roca (80/20). 111

**4.5. Diseño alternativo de base tratada de Esc. Vanadio con asfalto espumado. 114**

**CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES. 129**

**BIBLIOGRAFÍA 132**

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



Introducción.

En nuestra región, la VIII Región del Bio Bio, existe actualmente un 77% de la red vial compuesta de caminos sin pavimentar, ya sean de tierra o ripio, los cuales son susceptibles al deterioro, por efectos climáticos o producidos por la acción abrasiva del tránsito. Debido a esto es necesario realizar investigaciones para encontrar formas de "prolongar" la vida útil de la carpeta de rodadura, ya sea con agregados pétreos de mayor calidad, mejorar su estándar con la aplicación de capas de protección o una combinación de ambas.

En la Compañía Siderúrgica de Huachipato, ubicada en la Octava Región de Chile, como un subproducto del proceso de la fabricación del acero, se generan importantes cantidades de un material granular denominado "Escoria de Vanadio", también conocida como Escoria de Acería o Escoria Siderúrgica. En la zona, la Escoria de Vanadio se ha utilizado en la construcción de Bases y Sub-Bases de pavimentos, como también en carpetas de rodado granular. Los variados usos que se le ha dado a este material, es debido a, sus destacables propiedades de resistencia estructural, resistencia al desgaste y sus reacciones de cementación e hidratación, que crean una capa estabilizada similar a una hecha con cemento. Debido a esto la Escoria de Vanadio es requerida tanto en obras realizadas por el Estado como en obras privadas, principalmente en el ámbito forestal e industrial.

En la presente tesis se presentará la Escoria de Vanadio como un material para base granular tratada con asfalto espumado, donde se hará un diseño, desde las propiedades de la espuma de asfalto a utilizar, hasta la obtención de la cantidad óptima de asfalto para lograr una base tratada de alta calidad, además de ensayos y cantidades de asfalto no convencionales (sobre los porcentajes recomendados por la bibliografía) para un diseño con asfalto espumado.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



Justificación del tema.

La VIII Región, es una zona de gran carga de transito, lo cual requiere una solución estructural más estable. La Escoria de Vanadio es un material ampliamente conocido como agregado pétreo artificial, ya sea por sus cualidades de resistentes, como por sus propiedades cementantes. La Escoria de Vanadio por si sola se comporta similar a una base granular tratada con cemento, lo que la hace frágil ante cargas de tráfico. Por lo cual se busca determinar una cantidad de asfalto que maximice sus propiedades y aporte características flexibles a este material con el uso de asfalto en forma de espuma.

Objetivos.

- Objetivo General:

  Diseñar una base tratada de Escoria de Vanadio con asfalto espumado y analizar su comportamiento como un tipo de solución para caminos básicos.

- Objetivos específicos:

Como objetivos específicos para la presente tesis se tendrán los siguientes:

- Determinar el tipo de asfalto, más apropiado que maximice los resultados de espuma.
- Investigar sobre las tecnologías de reciclado en frío y sus aplicaciones.
- Análisis de las propiedades de la Escoria de Vanadio.
- Determinar una dosificación óptima de asfalto espumado para ser aplicada a la Escoria de Vanadio y analizar el comportamiento de esta con el asfalto espumado.
- Determinar una dosificación óptima de asfalto espumado, para ser utilizada como base asfáltica mediante un diseño alternativo.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



# CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES.

## 1.1. Antecedentes sobre la red vial nacional.

Nuestro país cuenta con una longitud total de red vial de aproximadamente 80 694 Km. actualizada a Diciembre de 2006, la cual es administrada por el Ministerio de Obras Publicas (MOP). De este total, el 72% corresponde a tierra y ripio (red vial no pavimentada), 7% granular estabilizado y capa protección (red vial solución básica), y finalmente el 21% restante corresponde a hormigón y asfalto (red vial pavimentada). Esta estadística considera solamente la red vial no urbana, administrada por la Dirección de Vialidad del MOP.

A continuación se muestran dos gráficos correspondientes a: Distribución de la red nacional según tipo de carpeta de rodadura Fig.1 y Distribución de soluciones viales en las distintas regiones del país Fig. 2, este último gráfico detalla regionalmente los kilómetros construidos de la red vial, comparando las soluciones entre si, como son red pavimentada, solución básica y red no pavimentada.

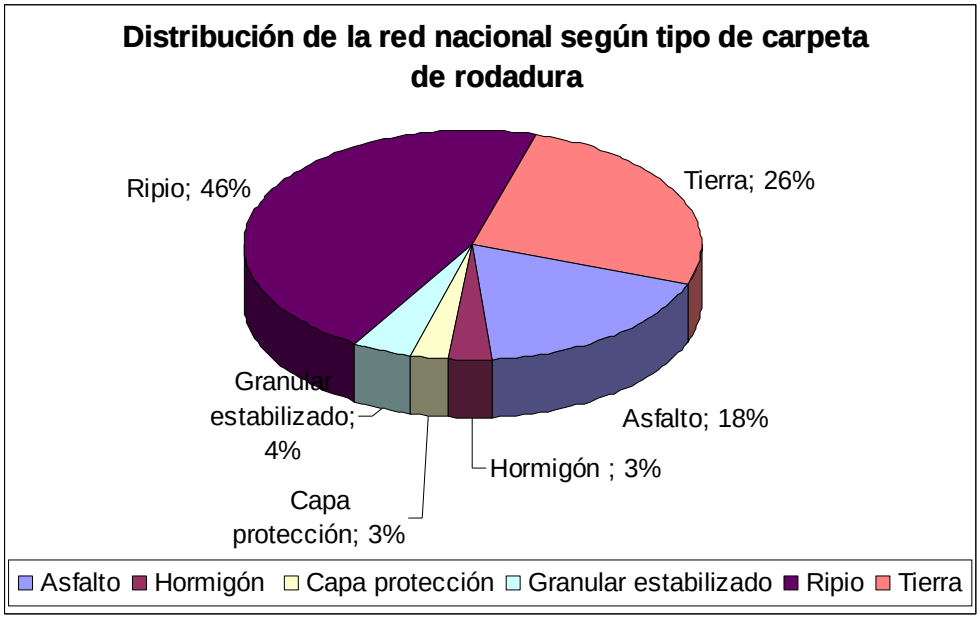



Figura 1. Distribución de la red nacional según tipo de carpeta de rodadura (Dpto. de gestión Vial, Dic. 2006)

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



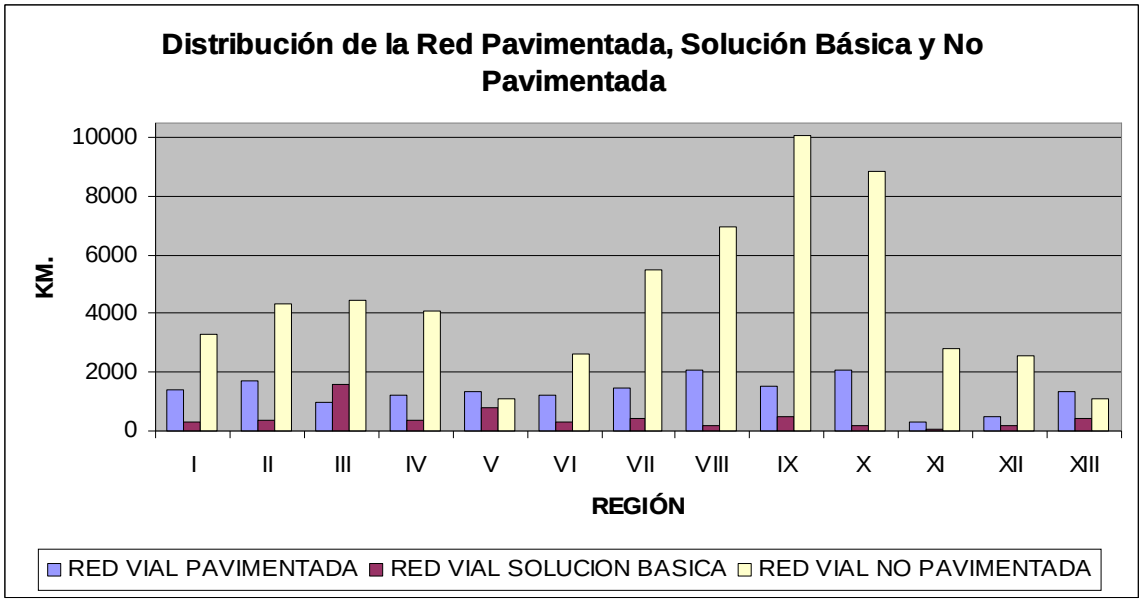



Fig. 2. Distribución regional según solución de red vial. (Dpto. de gestión Vial, Dic. 2006).

1.1.1. Distribución regional de la red vial nacional.

A continuación se muestra un cuadro resumen en el cual se detallará los kilómetros construidos de cada tipo de carpeta de rodadura según solución por regiones.

Cabe señalar que los caminos de carpeta mixta, como Asfalto/Hormigón, Asfalto/Ripio y Hormigón/Ripio es la denominación que obtuvieron debido a que sus calzadas presentan pistas con diferentes carpetas de rodadura.

Los tipos de superficie de rodadura denominados Capas de Protección y Carpeta Granular Estabilizada corresponden a una Solución Básica, la primera consta de la aplicación de una capa asfáltica de protección y la segunda se caracteriza por la utilización de algún tipo de ligante o estabilizador del suelo que mantiene cohesionada la matriz pétrea.

Se considera también en el cuadro resumen los caminos privados asociados a la actividad forestal, agrícola, minera y otro tipo de industrias, constituidos casi en su totalidad por caminos de tierra y ripio.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



| | RED VIAL PAVIMENTADA | | | | | RED VIAL SOLUCION BASICA | | RED VIAL NO PAVIMENTADA | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | Capa | Granular | | | |
| REGION | Asfalto | Hormigón | Asf./Horm | Asf./Ripio | Horm./Ripio | Protección | Estabilizado | Ripio | Tierra | TOTAL |
| I | 1417,56 | 2,66 | 1,16 | 0 | 0 | 99,47 | 209,4 | 445,67 | 2834,79 | 5010,79 |
| II | 1705,59 | 1,85 | 0 | 4,7 | 0 | 62,09 | 300,06 | 1008,93 | 3353,6 | 6436,82 |
| III | 982,64 | 4,38 | 0 | 0 | 0 | 128,12 | 1456,76 | 905,08 | 3544,87 | 7021,85 |
| IV | 1172,33 | 50,84 | 9,62 | 0 | 0 | 20,22 | 349,33 | 2752,03 | 1327,67 | 568,04 |
| V | 1055.05 | 252,65 | 25,51 | 0 | 0 | 820,14 | 2,00 | 654,69 | 420,75 | 3230,79 |
| VI | 994,64 | 176,7 | 40,7 | 0 | 0 | 283,69 | 20,07 | 1416,36 | 1204,57 | 4136,21 |
| VII | 1230,87 | 151,4 | 89,18 | 0 | 0 | 21,53 | 390,83 | 3531,58 | 1923,96 | 7385,25 |
| **VIII** | **1856,58** | **219,01** | **30,41** | **0** | **0** | **114,41** | **69,75** | **5064,11** | **1923,96** | **9278,23** |
| IX | 1275,8 | 121,72 | 107,84 | 0 | 0 | 100,13 | 358,21 | 7544,07 | 2537,68 | 12045,45 |
| X | 1691,14 | 230,27 | 151,35 | 0 | 20,88 | 199,32 | 7,3 | 8020,98 | 834,7 | 11155,94 |
| XI | 147,72 | 149,88 | 0 | 0 | 0 | 0 | 63,68 | 2556,24 | 227,76 | 3145,28 |
| XII | 26,85 | 482,93 | 0 | 0 | 0 | 7,22 | 194,71 | 2226,06 | 362,71 | 3300,48 |
| R.M. | 981,87 | 279,46 | 61,7 | 0 | 0 | 421,83 | 0 | 728,94 | 391,81 | 2865,61 |
| TOTAL | **14538,64** | **2123,75** | **517,05** | **4,7** | **20,88** | **2278,17** | **3422,1** | **36854,74** | **20934,63** | **80694,66** |

Tabla 1: Distribución regional en km. de la red vial administrada por el MOP (Dpto. de gestión Vial, Dic. 2006).

Notas: - El tipo de carpeta Asfalto incluye a las mezclas asfálticas y los tratamientos asfálticos efectuados con proyectos específicos.

- La Red Vial Solución Básica considera la aplicación de Capas de Protección y Carpetas Granulares Estabilizadas.

De los antecedentes mostrados en la tabla anterior, existe una gran probabilidad que para el caso de los caminos no pavimentados sus valores no varíen significativamente en el tiempo, debido a que en general los recursos económicos son utilizados para pavimentación y conservación de Caminos Nacionales y Regionales Primarios, como consecuencia de su mayor importancia geopolítica ya que representan el 80% del tráfico. Principalmente los caminos no pavimentados (Regionales secundarios y Comunales), se les realiza una conservación básica y en pocas ocasiones un mejoramiento de estándar, siendo requisito para este, un aumento del tráfico producto del desarrollo económico, además debe conectarse a la red principal y encontrarse en zonas de concentración de habitantes, escuelas y/o postas rurales.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



## 1.2. Caminos Básicos.

Los caminos no pavimentados (ripio y tierra) son más del 70% del total de la red vial de Chile, lo que implica que la mayor parte de las vías son de precarias condiciones tanto en nivel de serviciabilidad, como en la calidad de las condiciones de vida para los habitantes que se comunican a través de ellas. Además de un alto costo de mantención, los caminos básicos son la solución a los anteriores problemas que causaban los caminos de ripio y tierra, así las soluciones básicas pretenden aportar carpetas de rodadura más firmes capaces de permanecer activas todo el año y no expuestas a interrupciones invernales, conjuntamente con apoyar a la economía productiva rural, ampliando los accesos a los mercados, a la educación y la salud.

Sólo unos 300 - 500 Km. al año van cambiando su estándar, con mejoramientos de trazado, ancho, estructura, obras de drenaje, expropiaciones, entre otros, lo cual involucra inversiones promedio del orden de los 150 a 300 millones de pesos por Km. En nuestro país desde la década de los 90 se empezaron a desarrollar las primeras experiencias con nuevos materiales que permitirían entregar a los usuarios caminos mejor mantenidos, proporcionando un mayor nivel de servicio y más duraderos en el tiempo.

Los principales inconvenientes que presentan los caminos no pavimentados son problemas de seguridad vial y bajo nivel de servicio, producto del polvo que obstaculiza la visibilidad, conjuntamente las carpetas de rodadura deterioradas producen una lenta y difícil conducción. Además del desprendimiento de piedras de la capa de rodadura que pueden impactar en los parabrisas de los vehículos, los cuales podrían provocar graves accidentes. Del mismo modo, se produce un deterioro acelerado de los vehículos, que se traduce en un gasto excesivo para los usuarios.

### 1.2.1. Objetivos de los caminos básicos.

Estudios realizados en EEUU demuestran que en los caminos de ripio por cada vehículo que pasa se pierden 600 Kg. de material cada año por Km. Material que debe ser repuesto a través de las operaciones de mantenimiento, y por ende, aumentando los costos para el país. Finalmente, las carpetas granulares sufren de un rápido deterioro de su

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



serviciabilidad, induciendo una gran cantidad de reperfilados al año, lo que provoca elevados costos de operación en su mantenimiento. Para dar solución a los inconvenientes surgidos de las carpetas granulares y dar mayor confort a los caminos, es que, por consiguiente las soluciones básicas (capas de protección o capa granular estabilizada) tienen por objetivos primordiales los siguientes:

- Aplicar mejoras en la superficie de caminos no pavimentados, no abordados en los programas tradicionales, alcanzando una mayor serviciabilidad.
- Abordar con mayor criterio social aquellos caminos con bajo volumen de transito, donde no es posible justificar económicamente la construcción de obras de pavimentación.
- Mejorar la calidad de vida de los habitantes del entorno del camino disminuyendo o eliminando el polvo generado por el tránsito.
- Disminuir los costos de conservación originados por los frecuentes reperfilados de las ripiaduras.
- Mejorar las condiciones del rodado de los usuarios y sus vehículos, disminuyendo así los costos de transporte.
- Impulsar el desarrollo local entregando mejor conectividad para las actividades productivas en las zonas beneficiadas.
- Mejorar las condiciones de seguridad vial al disminuir o eliminar el polvo provocado por la circulación de los vehículos.
- Mejorar las condiciones ambientales para el desarrollo de la fruticultura y cultivos afectados por el polvo.
- Permitir la superación de la pobreza al tener habilitados caminos de zonas rurales. Así, niños y jóvenes pueden asistir permanentemente al colegio y acceder a una educación formal durante todo el año.

Las diferentes soluciones técnicas que contempla la red vial tipo solución básica son la aplicación de cloruros en las carpetas granulares, capas delgadas de asfalto, o si es

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



necesario, un mejoramiento del material existente para ser utilizado como base con estabilizadores químicos más una protección asfáltica en la superficie de rodadura.

### 1.2.2. Avances y Requisitos.

El Ministerio de Obras Públicas (MOP) durante los últimos años ha abordado el mejoramiento de los principales caminos estructurantes del país bajo el sistema de concesiones, para disponer de una red vial moderna, en complemento, la Dirección de Vialidad se propuso aumentar y potenciar obras a nivel de mejoras de la superficie de rodadura de los caminos públicos rurales no pavimentados. Para cumplir con lo anteriormente expuesto, la Dirección de Vialidad desarrolló un programa denominado "Caminos Básicos 5000", el cual tenía como meta lograr dar una solución básica a 5000 Km. de caminos no pavimentados desde el año 2003 hasta el año 2005.

A continuación se presentan en las siguientes tablas resumen; las inversiones y kilómetros ejecutados durante los años 2003, 2004 y 2005 a nivel nacional, Tabla 2. El detalle de Caminos Básicos en cada región del país y sus respectivas inversiones a lo largo de la duración del programa Tabla 3.

| INVERSION | EJECUTADO (MM$) | (Km.) |
|---|---|---|
| AÑO 2003 | 15.926 | 926 |
| AÑO 2004 | 37.201 | 2.680 |
| AÑO 2005 | 35.034 | 2.148 |
| AÑO 2006 | 28.553 | 1.674 |
| AVANCE A DICIEMBRE 2006 | **116.714** | **7.428** |

Tabla 2. Inversiones y Km. ejecutados durante los años 2003, 2004 y 2005 a nivel nacional.

Estas inversiones realizadas sobre el área del tipo de solución vial denominado caminos básicos, son representativas de la aplicación de nuevas tecnologías más eficientes, tanto del punto de vista del recurso, como de los tiempos de ejecución. Las tecnologías de protección de capas granulares o estabilizado de capas granulares, están abarcando parte importante de las nuevas soluciones para caminos no pavimentados sobre la red vial del país, entre ellas está el tratamiento de bases granulares con asfalto espumado.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



| Región | año 2003 | | año 2004 | | año 2005 | | año 2006 | | TOTAL | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Km. | MM$ | Km. | MM$ | Km. | MM$ | Km. | MM$ | Km. | MM$ |
| 1 | 8 | 80 | 271 | 2.846 | 235 | 1.545 | 124 | 664 | 637 | 5.137 |
| 2 | 91 | 1.110 | 290 | 4.969 | 151 | 3.133 | 106 | 1.373 | 638 | 10.585 |
| 3 | 191 | 2.162 | 507 | 4.642 | 308 | 2.149 | 480 | 3.753 | 1.485 | 12.706 |
| 4 | 136 | 1.555 | 157 | 1.283 | 160 | 1.649 | 194 | 1.859 | 647 | 6.346 |
| 5 | 163 | 1.858 | 294 | 3.757 | 122 | 2.086 | 151 | 2.662 | 730 | 10.363 |
| 6 | 57 | 1.335 | 222 | 5.045 | 170 | 4.562 | 119 | 3.864 | 567 | 14.807 |
| 7 | 22 | 353 | 199 | 2.478 | 176 | 2.080 | 153 | 1.533 | 549 | 6.444 |
| **8** | **114** | **3.356** | **141** | **1.077** | **224** | **3.222** | **79** | **2.905** | **558** | **10.560** |
| 9 | 92 | 1.940 | 257 | 2.725 | 210 | 2.244 | 29 | 1.671 | 587 | 8.581 |
| 10 | 0 | 0 | 61 | 1.964 | 70 | 3.815 | 48 | 1.790 | 179 | 7.568 |
| 11 | 0 | 0 | 23 | 798 | 26 | 275 | 29 | 910 | 78 | 1.984 |
| 12 | 13 | 31 | 130 | 1.825 | 101 | 2.119 | 43 | 1.123 | 286 | 5.099 |
| RM | 39 | 2.146 | 130 | 3.791 | 197 | 6.152 | 120 | 4.446 | 485 | 16.535 |
| **TOTAL** | **926** | **15.926** | **2.680** | **37.201** | **2.148** | **35.034** | **1.674** | **28.553** | **7.428** | **116.714** |

Tabla 3. Inversiones y Km. construidos en cada región a lo largo de la duración del programa.

A continuación se hará mención a los requisitos que debe poseer un camino no pavimentado para optar al programa de camino básico:

- Camino no pavimentado.
- Camino que tenga una carpeta granular consolidada.
- Camino con un bajo volumen de tránsito, se estima un TDMA (Tránsito medio diario Anual) no superior a 200 veh. /día.
- Pavimento definitivo esperado para muchos años más.
- Camino que tenga continuidad o se conecte a la red de caminos pavimentados, o que se encuentre en zonas de concentración de habitantes, escuelas y/o postas rurales.
- La geometría horizontal y vertical del trazado del camino debe ser coherente con los niveles de tránsito.
- Los caminos deben tener un saneamiento adecuado que asegure la durabilidad de la solución básica.
- El ancho de la calzada propuesta debe ser, en lo posible, al menos de 6.0 (m).

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



### 1.2.3. Solución Básica v/s Cambio de Estándar.

Las soluciones básicas, como aplicaciones de Cloruros, capas de Asfalto o Estabilizadores químicos más una capa asfáltica de protección, son soluciones que cuestan entre un 10 a un 30% del valor de una pavimentación tradicional, lo que convierte a los caminos básicos en proyectos económicamente rentables.

Mejorar la conectividad de las comunidades que dependen de caminos rurales mediante proyectos de alto estándar no es posible, debido a su baja rentabilidad. No obstante, el constante avance tecnológico, impulsado por la Dirección de Vialidad, ha logrado brindar diversas alternativas de solución con menor costo que los requeridos por un camino de asfalto u hormigón y, a la vez, entregar un camino con una mayor serviciabilidad. Entre las soluciones utilizadas se encuentra el uso del cloruro de sodio (sal común) y el cloruro de magnesio hexahidratado (bischofita). Ésta última, ha sido utilizada en los caminos del norte del país en más de 2.000 Km. entre la I y IV Región, con un costo promedio aproximado de 10 millones de pesos por Km., una fracción de lo que cuesta un camino pavimentado de alto estándar (mínimo 140 MM$/Km.). Este avance se une al empleo de capas asfálticas delgadas como son los tratamientos superficiales, y otras innovaciones como el Cape Seal y el Otta Seal. Con estas, se mejora la superficie de rodadura a un costo que llega a ser hasta siete veces menor al de la pavimentación de un camino tradicional.

A continuación se muestra un cuadro resumen comparativo entre los caminos con cambio de estándar y las soluciones básicas, cuadro comparativo, tabla 4.

| CAMBIO DE ESTÁNDAR (Pavimentación) | CAMINO BÁSICO |
|---|---|
| Mejoramiento geométrico. | Mejoramiento geométrico, coherente con el nivel de tránsito. |
| Movimiento de tierra. | |
| Nuevo saneamiento. | Mínimo. |
| Estructura de pavimento (muchos EE, >10años) | Estructura de pavimento (Bajos EE, ~5años) |
| Superficie de rodado mas confortable. | Mejoramiento de superficie de rodado. |
| 140 - 450 MM$/Km. | 6 - 80 MM$/Km. |

Tabla 4. Diferencias entre cambio de estándar y solución básica.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



## 1.3. Soluciones para caminos básicos.

La elección de las soluciones aplicadas está fuertemente relacionada con el tipo y cantidad de flujo vehicular, el tipo de clima de la zona, la disponibilidad de materiales y el costo. Todas estas variables se analizan en los estudios previos a la ejecución de las obras.

Las soluciones para caminos básicos pueden reunirse en tres grandes grupos. A continuación se describe brevemente cada grupo de solución básica con sus respectivos constituyentes:

- Estabilización de suelos: Consiste en adicionar al suelo productos que permitan aglomerar las partículas finas de éstos. Dentro de los estabilizantes están el Cloruro de Sodio, Cloruro de Magnesio Hexahidratado, Cloruro de Calcio, Sulfato de Calcio, Carbonato de Calcio, Ácidos fosfóricos y fosfatos, Hidróxido de Sodio.

Los estabilizantes mas usados son los siguientes:

- Cloruro de Magnesio (Bischofita): Este estabilizante se disuelve en agua en una proporción de entre 50 – 70 Kg. /$m^3$, la aplicación de esta solución salina a los caminos facilita la captación y retención de agua (propiedad higroscópica) en zonas semi-desérticas, disminuyendo el polvo las calaminas y las deformaciones y de este modo disminuir la frecuencia de la mantención rutinaria.
- Cloruro de Sodio (Sal): Este estabilizante se aplica de similar forma y concentración que la Bischofita, como solución salina, o también se puede aplicar directamente en forma sólida sobre el suelo a estabilizar. Su comportamiento es similar a la Bischofita dado a que son compuestos de comportamiento higroscópico.
- Cloruro de Calcio: El siguiente estabilizante se aplica a los caminos en forma de riego superficial, en una proporción media de 2,5 Lt./$m^2$. Su aplicación está orientada a disminuir el polvo durante el verano en la zona sur.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



- Recubrimientos asfálticos: Sobre la superficie de rodadura existente se coloca una capa delgada de asfalto mezclada con áridos. Con espesores que van desde los 6 a 10 mm. (Imprimación reforzada) hasta los 4 a 5 cm. (carpeta de mezcla asfáltica), mejorando así la superficie de rodadura y dando mayor confortabilidad al usuario.

- Imprimación reforzada: Este sello de estructuras granulares consiste en la aplicación de un riego de imprimación sobre la superficie de material granular, seguida de un segundo riego de ligante, generalmente emulsión CRS-2, recubierta por una capa de arena uniformemente distribuida, finalizando el proceso con una compactación con rodillo neumático.

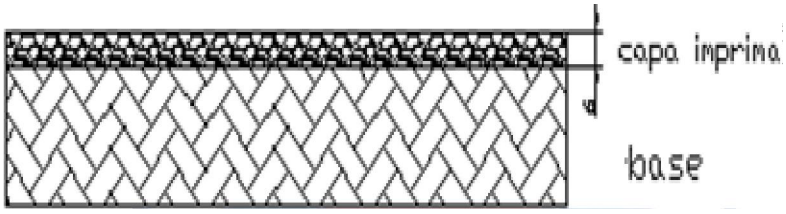



Fig. 3 Esquema Imprimación reforzada.

- Tratamiento superficial simple: Esta solución radica en la aplicación de un riego asfáltico con emulsión sobre una capa granular imprimada, seguido a continuación de un riego de gravilla de tamaño uniforme (tamaño máximo nominal 10 mm.). El espesor del tratamiento es aproximadamente el mismo que el tamaño máximo nominal del agregado.

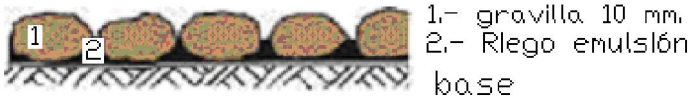



Fig. 4 Esquema Tratamiento superficial simple.

- Tratamiento superficial doble: Consiste en dos aplicaciones de material bituminoso alternado y uniformemente distribuidos, con aplicaciones de agregados pétreos colocadas sobre una capa granular imprimada. El agregado

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



pétreo de cada aplicación debe ser granulométricamente lo más uniforme posible y el tamaño nominal del primer agregado es el doble del segundo. Normalmente 20 y 10 mm. (3/4 y 3/8 pulg.).

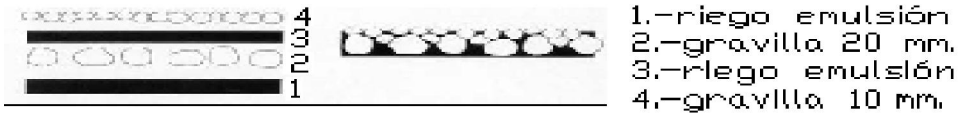



Fig. 5 Esquema Tratamiento superficial doble.

- Lechada asfáltica: Es un recubrimiento asfáltico delgado de 6 a 10 mm. de espesor, la cual es aplicada sobre una capa granular imprimada y consiste en una mezcla de arena triturada, relleno mineral (filler), agua y emulsión de quiebre lento. La dosis de agua y emulsión deben ser tales que formen una lechada de consistencia cremosa y homogénea. La textura superficial que se obtiene puede ser fina o rugosa, dependiendo de la granulometría de los agregados pétreos utilizados.

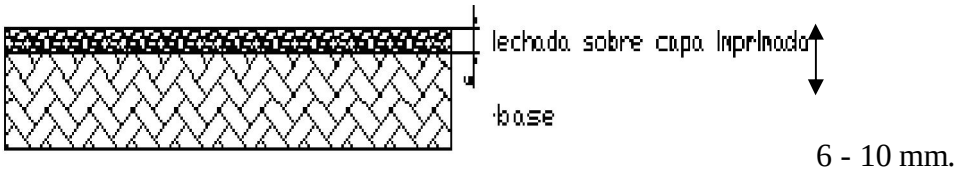



Fig. 6 Esquema de lechada asfáltica.

- Cape seal: Está constituido por una primera capa que corresponde a un tratamiento superficial asfáltico simple con tamaño máximo 3/4" (20mm.) y una segunda capa que corresponde a una lechada asfáltica de granulometría con tamaño máximo 3/8" (10 mm.). La superposición de la lechada sobre el tratamiento genera una superficie de rodadura menos rugosa que un tratamiento superficial simple o doble.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



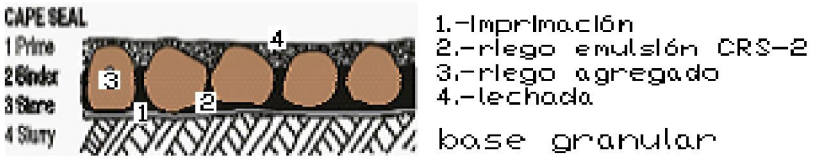



Fig. 7 Esquema de Cape seal.

- Carpeta asfáltica: Es un recubrimiento asfáltico de espesor medio 5 cm., constituido por una mezcla de áridos con tamaño máximo de 20 mm. y cemento asfáltico del tipo CA 60-80 o CA 80-100. Por su costo, se aplica sólo cuando se dan condiciones de alta conveniencia (planta de asfalto cercana).

Fig. 8 Esquema de Carpeta asfáltica.

- Otta seal: Consiste en una superficie bituminosa de 16 o 32 mm. de espesor (una o dos capas) y su ejecución incluye el riego de un asfalto blando (CA 150 – 200) aplicado en caliente, seguido del riego de un agregado integral (graduación continua uniformemente distribuida) con tolerancias bastante amplias.

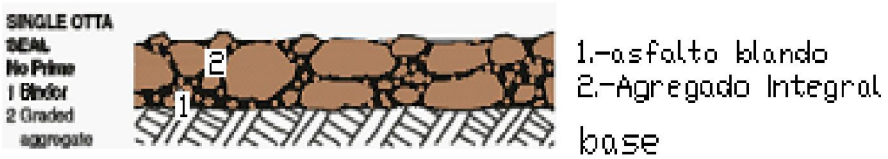



Fig. 9 Esquema Otta seal.

- Mejoramiento estructural de suelo existente y protección asfáltica: La estructura bajo el recubrimiento asfáltico se refuerza con la adición de algún producto químico. Este grupo es una combinación de los integrantes de los grupos anteriores, así es como se puede estabilizar un suelo con Cloruro de Calcio y aplicar sobre esta carpeta estabilizada una lechada asfáltica por nombrar un ejemplo.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



# CAPÍTULO 2: CONCEPTOS GENERALES

## 2.1. Definiciones fundamentales.

En el presente punto se aclararán algunos términos usados más adelante, para que el lector posea una mayor claridad al leer futuras definiciones.

- Crudo: Denominación que se le da al petróleo cuando este está en su forma natural (sin tratar) al momento en que se extrae de la tierra.

- Hidrocarburos: Moléculas que están formadas por átomos de carbono e hidrogeno. Hay Hidrocarburos Acíclicos y Cíclicos, siendo el último de estos el más importante para el presente tema.

- Hidrocarburos Cíclicos: son compuestos orgánicos formados por varios átomos de carbono adoptando la forma de una cadena cerrada que puede tener uniones simples, dobles y triples.

  Los hidrocarburos cíclicos están divididos en dos grandes grupos:

  - Hidrocarburos Nafténicos: Se caracterizan por una saturación completa de átomos de carbono que forman ciclos o cadenas cerradas.
  - Hidrocarburos Aromáticos: Caracterizado por la estructura de anillo, en la cual existe un átomo de hidrógeno por cada átomo de carbono.

- Asfalténos: Son compuestos de alto peso molecular, por tanto de mayor punto de ebullición. Principalmente de naturaleza aromática. Estos le dan la característica de dureza al asfalto, son insolubles en los malténos.

- Malténos: Fracción soluble de los hidrocarburos saturados de bajo punto de ebullición. El mayor contenido del malténos es el que le da la calidad a un

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



asfalto, esto quiere decir que la naturaleza química de los malténos regula en gran parte las propiedades químicas de los asfaltos.

La ASTM (American Society for Testing Materials) estableció las siguientes principales definiciones con el fin de distinguir los términos relativos al asfalto.

- Bitumen: Material hidrocarburado de origen natural, pirogenado, o combinación de ambos, frecuentemente acompañado por sus derivados no metálicos, el cual puede ser gaseoso, líquido o sólido.

- Material bituminoso: Sustancia que se caracteriza por poseer bitumen, o de la cual puede ser extraído.

## 2.2. Asfalto.

El asfalto es una mezcla compleja de hidrocarburos de peso molecular elevado, los cuales se presentan en forma de cuerpo viscoso más o menos elásticos, no cristalino y de color negro. Son producto de la destilación natural o artificial del petróleo. Es el residuo sólido que queda una vez que se hayan extraído los componentes más ligeros y volátiles del petróleo.

Aunque el asfalto puede considerarse como un desecho, también puede verse como un producto de gran calidad, sobre el que se fundamenta gran parte de la construcción de los pavimentos flexibles, llamados también pavimentos asfálticos, en virtud de este dúctil, flexible y tenaz material que los constituye y caracteriza.

Cabe mencionar que no todos los crudos del petróleo proporcionan asfaltos aptos para la construcción de pavimentos flexibles, como sucede con los crudos de la base parafínica los cuales están constituidos principalmente por hidrocarburos saturados, que requieren un proceso complementario de oxidación parcial. Los mejores asfaltos se pueden obtener a partir de los crudos de base nafténica, constituidos fundamentalmente por hidrocarburos no saturados. El comportamiento reológico de los asfaltos depende de su composición

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



química, la cual depende a su vez de su fuente de procedencia y del proceso de refinación. A continuación se presenta un esquema esbozando la fabricación de los distintos productos asfálticos (Fig. 10 Diagrama de fabricación de los productos asfálticos).

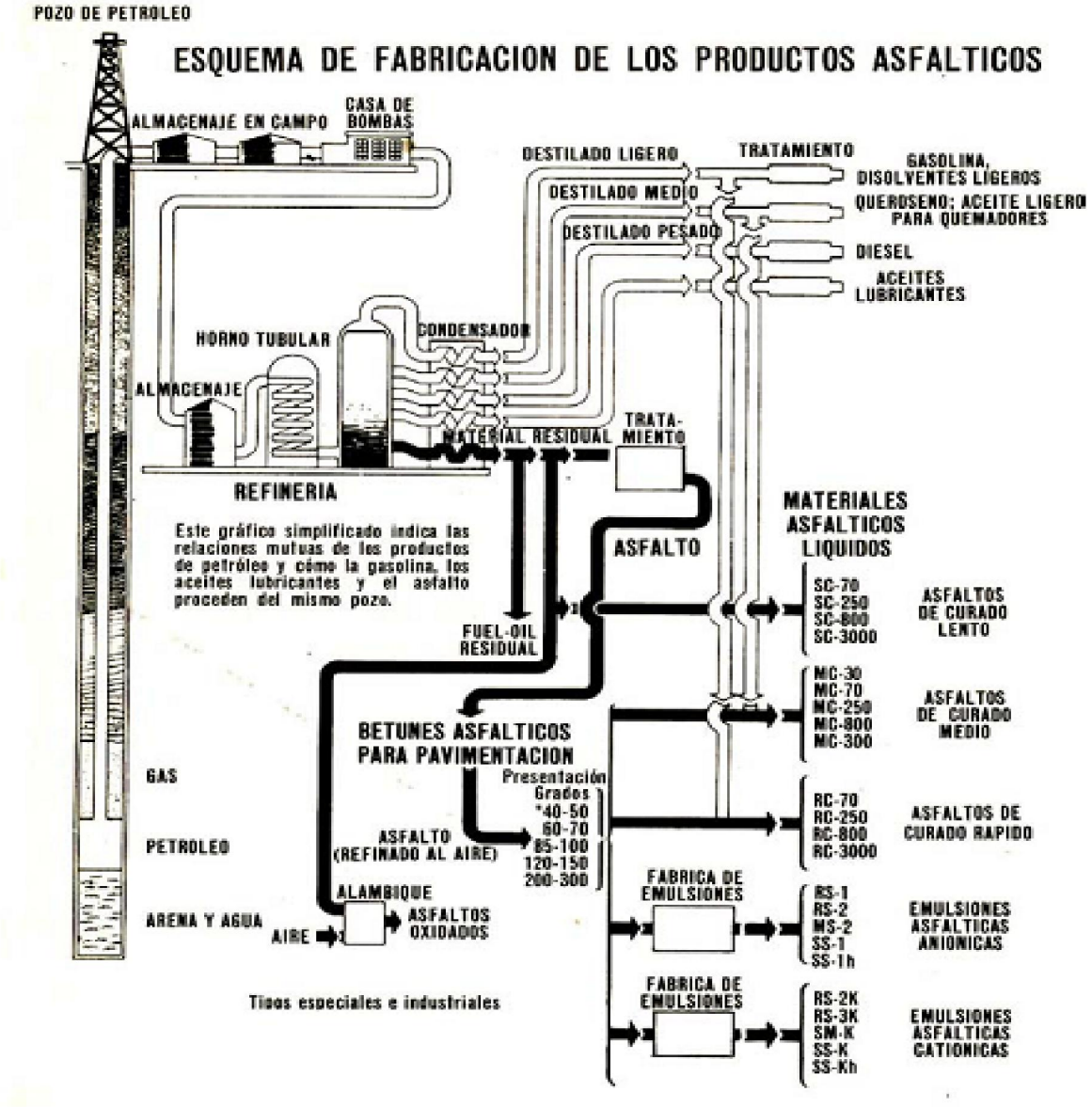



Fig. 10 Diagrama de fabricación de los productos asfálticos.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



## 2.3. Propiedades físicas de los Asfaltos.

Las propiedades físicas de los asfaltos son resultado de ensayos empíricos o semi-empíricos, en las cuales se plantea determinar sus características reológicas.

### 2.3.1. Densidad.

En los asfaltos que se utilizan en la construcción de pavimentos esta cualidad varía desde 0.9 – 1.4 Kg. /$m^3$. Los valores más altos de densidad de un asfalto corresponden a los asfaltos procedentes de crudos con un alto contenido de hidrocarburos aromáticos. La medida de la densidad sirve de control de la uniformidad de un suministro.

La densidad relativa de un asfalto es la razón entre el peso de un determinado volumen de asfalto y el peso de un volumen igual de agua a una determinada temperatura, por ejemplo veinte y cinco grados centígrados. El conocimiento de esta propiedad permite convertir de pesos a volúmenes y viceversa, esta se determina con un picnómetro. Los asfaltos poseen una densidad relativa a 25 ºC del orden de 1.03.

### 2.3.2. Penetración.

La penetración es una medida de la consistencia del asfalto, que se determina midiendo en décimas de milímetro, la longitud de una aguja normalizada que entra en una muestra en unas condiciones especificadas de tiempo, temperatura y carga.

Esta cualidad, por si sola, no permite identificar un asfalto, pero sí define si el producto que está sometido al ensayo es liquido, semilíquido, semisólido o sólido. La penetración de un producto asfáltico disminuye cuando la densidad del mismo aumenta.

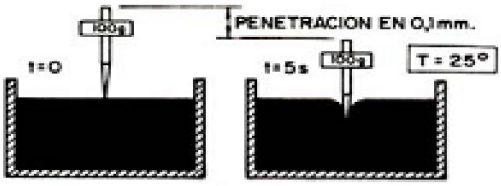



Fig. 11 Ensayo de penetración.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



### 2.3.3. Viscosidad.

La viscosidad es la relación entre la fuerza aplicada a un fluido y la velocidad con la que fluye. Por lo tanto la viscosidad de un asfalto es una de sus características esenciales desde el punto de vista de su comportamiento en el momento de su aplicación cuando su consistencia es suficientemente reducida. La viscosidad depende de la temperatura, por lo que su determinación a diferentes temperaturas da una idea de cual es su susceptibilidad térmica.

Solo para ciertas investigaciones se utilizan viscosímetros capilares para la obtención de la viscosidad absoluta del producto a una temperatura. En la práctica se suele recurrir a determinar la viscosidad relativa. Los viscosímetros mas utilizados son los de Saybolt (Furol y Universal). Se basan en la determinación del tiempo en que una cierta cantidad de producto asfáltico a una temperatura prefijada fluye por un orificio por la acción de la gravedad en unas condiciones normalizadas.

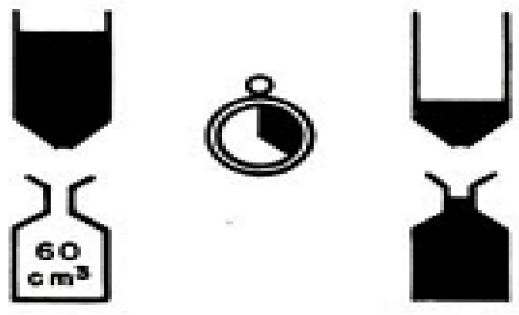



Fig. 12. Esquema de la determinación de la Viscosidad relativa, Saybolt.

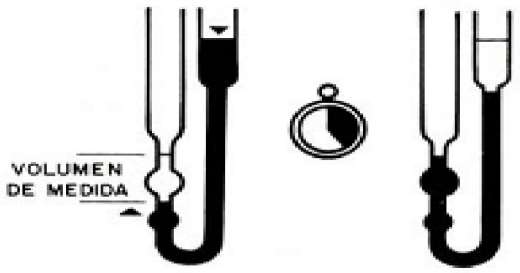



Fig. 13. Esquema de Viscosímetro capilar.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



### 2.3.4. Punto de ablandamiento

Para poner en obra un material asfáltico, se requiere que tenga una viscosidad baja, lo cual puede conseguirse por medio de una disolución en un solvente volátil, por emulsión en agua o por un aumento en la temperatura, el cual este último es el procedimiento frecuentemente utilizado.

La susceptibilidad térmica de un producto asfáltico, es la aptitud que presenta para variar su viscosidad en función de la temperatura. Es muy importante la susceptibilidad debido a que se puede conocer la temperatura adecuada para que el producto asfáltico adquiera la viscosidad requerida para el uso que se le de.

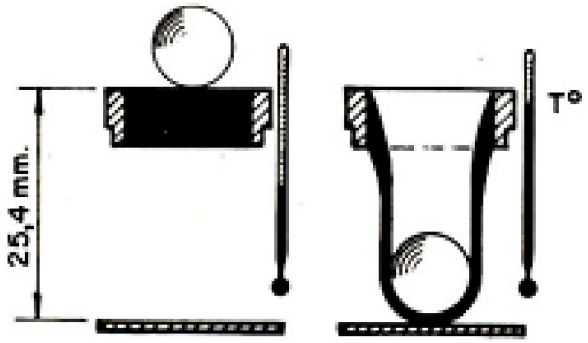



Fig. 14. Diagrama de ensayo de punto de ablandamiento (anillo y bola).

### 2.3.5. Ductilidad.

La ductilidad se mide por alargamiento, antes de producirse la rotura de una probeta de material asfáltico estirada por sus extremos con una velocidad constante.

Los materiales asfálticos están sometidos frecuentemente a variaciones de temperatura que le provocan cambios dimensionales, para esto es necesario que el material asfáltico sea suficientemente dúctil para alargarse sin producir grietas, pero una ductilidad excesiva es riesgosa debido a que se pueden presentar ondulaciones por efectos de las cargas de tráfico.

Puede comprobarse experimentalmente que para un mismo material, la ductilidad crece cuando crece la temperatura, y para materiales distintos, pero del mismo tipo, la ductilidad aumenta cuando la penetración aumenta o cuando la viscosidad disminuye.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



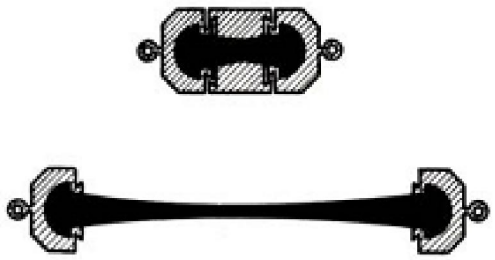


Fig. 15. Diagrama del ensayo de ductilidad.

2.3.6. Punto de inflamación.

Es la temperatura a la cual arden los vapores del asfalto al aproximar la superficie del material bituminoso a una llama de prueba. Su determinación es útil para el manejo en obra del asfalto para implementar precauciones, especialmente si su punto de inflamación es cercano a la temperatura de manejo en obra. El punto de inflamación de un asfalto debe estar alrededor de los 215 ºC. Este ensayo se lleva a cabo en un equipo normalizado llamado copa Cleveland.

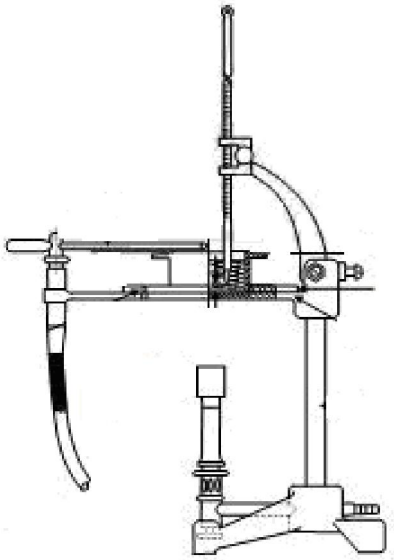


Fig. 16. Esquema de la copa Cleveland.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



### 2.3.7. Volatilidad.

Indica la cantidad de aceites volátiles que contiene un asfalto, mediante calentamiento a una temperatura determinada durante un cierto tiempo. Esta propiedad da un índice de inalterabilidad del asfalto durante las operaciones previas a su puesta en obra.

### 2.3.8. Solubilidad.

Por definición, un asfalto es totalmente soluble en sulfuro de carbono. Si al realizar el ensayo de un material quedara un residuo insoluble, el resultado del ensayo permitiría juzgar sobre la cantidad de asfalto puro que contiene dicho material. Por otro lado, la propiedad de solubilidad, sirve para comprobar la uniformidad de composición de un producto de este tipo y para determinar la cantidad de asfalto de que consta un pavimento.

### 2.3.9. Adherencia.

Es la resistencia que presenta un producto asfáltico al intentar despejarlo de un agregado pétreo, pero esta adherencia no puede tener lugar más que si el agregado mineral es mojado por el asfalto. Además de esto, tiene que existir afinidad entre las moléculas de uno y otro cuerpo.

### 2.3.10. Envejecimiento.

El asfalto está compuesto por moléculas orgánicas que reaccionan con el oxigeno del aire oxidándose lo que les hace más duros y frágiles. Se debe tener en cuenta que gran parte del envejecimiento o endurecimiento oxidativo tiene lugar antes de que el asfalto esté compactado, durante el proceso de mezcla en el que el ligante está sometido a altas temperaturas y en forma de película fina, lo que hace que el proceso sea más rápido, pudiéndose producir en este periodo otros tipos de envejecimiento, como la pérdida de los componentes más volátiles del asfalto, que se traduce en un endurecimiento del mismo. Por lo cual si se desea comparar las propiedades del asfalto con su comportamiento en la mezcla, se debe estudiar el asfalto en el estado de envejecimiento en que va a estar el material cuando esté en uso, y por lo tanto habrá que someterlo a un envejecimiento artificial acelerado antes de estudiar alguna de sus propiedades.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



### 2.3.11. Comportamiento mecánico.

Las características mecánicas y funcionales de un asfalto son decisivas para el comportamiento de la mezcla asfáltica tendrá al momento de entrar en servicio, por esta razón se presta una mayor atención a la característica mecánica y resistente de los asfaltos, en especial a su deformación a baja carga (reología), su poder aglomerante y su comportamiento y resistencia a la rotura.

#### 2.3.11.1. Comportamiento reológico.

La reología estudia la respuesta mecánica de un material, cuyas propiedades varían en función de la temperatura y el tiempo de aplicación de una carga, excluyéndose los fenómenos de rotura. Los asfaltos son materiales visco-elásticos que presentan un comportamiento reológico muy complejo. La respuesta de un asfalto frente a una solicitación, depende de la temperatura, de la magnitud y el tiempo de aplicación de la carga.

El comportamiento visco-elástico se puede caracterizar por al menos dos propiedades: la resistencia total a la deformación (G* llamado módulo complejo) y la distribución relativa en esa resistencia, entre la parte viscosa y la parte elástica (δ llamado ángulo de fase).

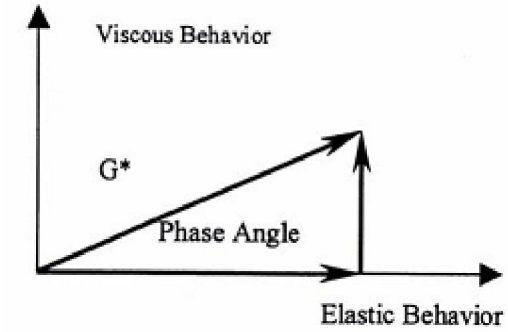



Fig. 17. Rigidez del ligante asfáltico y ángulo de fase.

La forma experimental mas extendida de caracterizar este comportamiento es a través de ensayos dinámicos de oscilación, en los que se mide un Módulo complejo G* que representa la relación entre la tensión aplicada y la deformación experimentada por el

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



material y un ángulo de fase δ, que es la diferencia de fase entre la tensión y la deformación, y que da una idea sobre la distribución de las dos componentes, elástica y viscosa del material.

A bajas temperaturas y altas frecuencias los asfaltos tienden a un G* limite próximo a 1.0 GPa. y a un δ=0 grados. Este valor de G* refleja la rigidez de los enlaces carbono-hidrógeno al alcanzar los ligantes su volumen mínimo. Al aumentar la temperatura o disminuir la frecuencia, G* disminuye de forma continua y aumenta δ. La forma en que cambien será función de la composición del ligante, lo harán de forma muy rápida y otros de forma lenta.

A continuación se presentan diferentes intervalos de temperatura relacionados con las propiedades reológicas de un ligante asfáltico incluyendo también el posible deterioro del pavimento que puede originarse.

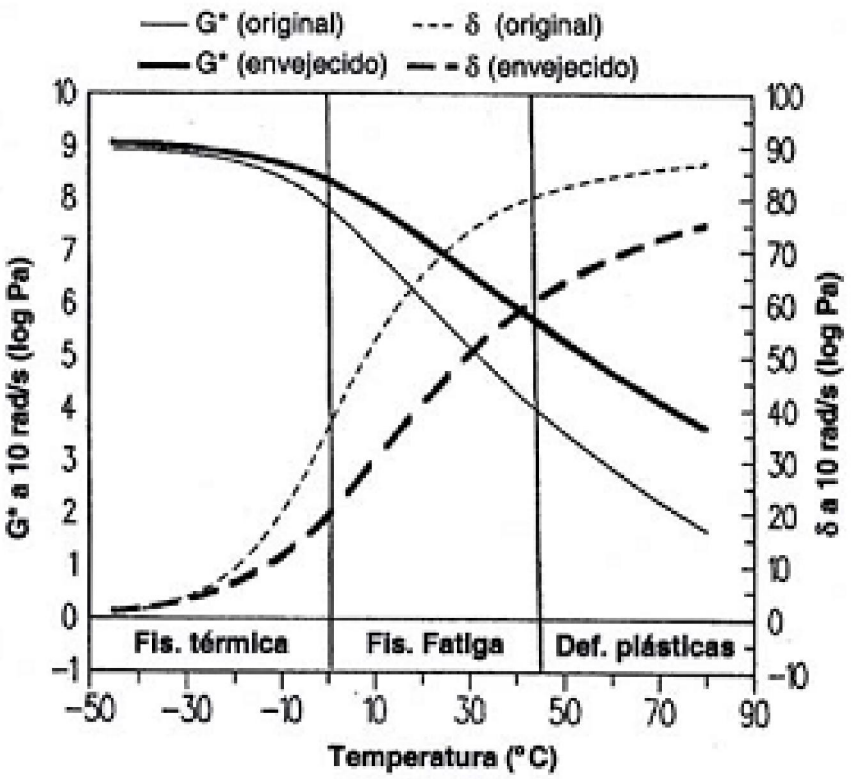



Fig. 18. Propiedades del ligante asfáltico en función de la temperatura.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



## 2.4. Tipos de asfalto utilizados en Pavimentos.

En el presente ítem se presentará una breve descripción de cada tipo se asfalto utilizado en soluciones viales de pavimentos flexibles, además de algunas aplicaciones de cada tipo de estos ligantes.

### 2.4.1. Cementos Asfálticos.

Los Cementos Asfálticos son designados como CA, y son asfaltos obtenidos especialmente de la destilación del petróleo, para presentar características adecuadas para uso en la construcción de pavimentos, la mayor o menor dureza que presenten los cementos asfálticos dependen principalmente de las condiciones de destilación de las cuales fueron extraídos, tales como presión, temperatura de destilación y tiempo. Por lo cual estos ligantes se pueden diferenciar por el grado de dureza que estos presentan, medido mediante el ensaye de penetración anteriormente mencionado, el cual es inverso a la dureza. El conocimiento del cemento asfáltico, sus características y comportamiento es de suma importancia para la presente tesis, dado que desde él se elabora el asfalto espumado.

Para elegir el tipo adecuado de cemento asfáltico a utilizar deben considerarse los siguientes criterios:

- Si se desea tener una mayor estabilidad se debe utilizar un asfalto de baja penetración dado que mientras menor sea su penetración, mayor ha de ser la dureza de este y aportará mayor rigidez a la mezcla.
- Para climas con bajas temperaturas deben usarse asfaltos con penetraciones más altas (80 – 100, 120 – 150), debido a que los asfaltos duros tienden a cristalizarse fácilmente ante heladas, fracturándose y perdiendo finalmente su estructura. En cambio para climas calidos deberían usarse asfaltos con penetraciones mas bajas (60 – 80), dado que las temperaturas elevadas incitan una disminución en la viscosidad del asfalto, provocando una perdida de estabilidad.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



- El clima es solo uno de los factores importantes en la elección de un asfalto, otro limitante de la elección del tipo de asfalto a utilizar es el tipo de trafico dado que en zonas de transito pesado ha de seleccionarse asfaltos con menor penetración dado que estos son más estables.
- Otro factor importante es el tipo de áridos, como por ejemplo para agregados finos debe aplicarse asfaltos con penetraciones bajas por razones de un buen esparcido y bañado de los áridos en asfalto.
- Los asfaltos de altas penetraciones (120 – 150, 200 – 300) son utilizados mayormente en tratamientos doble, no utilizándose en la construcción de carpetas estructurales.

Por consiguiente los Cementos Asfálticos más utilizados en Chile son los siguientes:

- CA 40 – 50 : Comúnmente utilizado para relleno de juntas y grietas de pavimentos de hormigón a través de un mastic (mezcla con filler).
- CA 60 – 80 : Utilizado en la elaboración de Bases, Binder, Carpetas y para la elaboración de Asfalto espumado.
- CA 80 – 100 : Principalmente utilizado en la elaboración de Carpetas asfálticas y Asfalto espumado.
- CA 120 – 150 : Utilizado en la confección de tratamientos superficiales.

Cabe mencionar que la nomenclatura que se poseen los cementos asfálticos han sido modificadas a partir del año 2005, donde a partir del mes de septiembre de ese año el capítulo 8.300 "Asfaltos", sección 8.301 "Especificaciones para asfaltos" del Manual de Carreteras fue innovado en la clasificación de los cementos asfálticos, donde ahora su especificación se hará según grado de viscosidad.

Las siguientes especificaciones envuelven los cementos asfálticos CA 24 cuya viscosidad absoluta será mayor o igual a 2400 poises, y CA 14 cuya viscosidad será mayor o igual a 1400 poises y menor a 2400 poises. La viscosidad será medida a 60ºC y 300 mm. Hg.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



A continuación se mostrará las especificaciones para los cementos asfálticos, de acuerdo a su grado de viscosidad. Tabla 5 "Especificaciones para los cementos asfálticos según grado de viscosidad".

| Ensayes | Grado de viscosidad | |
|---|---|---|
| | CA 24 | CA 14 |
| Viscosidad absoluta a 60ºC, 300 mm. Hg., poises | Mayor o igual a 2400 | Mayor o igual a 1400 y menor a 2400 |
| Ductilidad 25 ºC, 5 cm./min., cm. | Min. 100 | Min. 100 |
| Ensayo de la Mancha (% Xilol). | Máx. 30% | Máx. 30% |
| Solubilidad en tricloroetileno, % | Min. 99 | Min. 99 |
| Punto de Inflamación, ºC | Min. 232 | Min. 232 |
| Punto de Ablandamiento, ºC | Informar | Informar |
| Índice de Penetración. | -1.5 a +1.0 | -1.5 a +1.0 |
| Película delgada rotatoria:<br>- Pérdida por calentamiento (%).<br>- Viscosidad absoluta a 60 ºC, 300 mm. Hg., poises.<br>- Ductilidad | <br>Máx. 0.8<br>Informar<br><br>Min. 100 | <br>Máx. 0.8<br>Informar<br><br>Mín. 100 |
| Índice de Durabilidad. | Máx. 3.5 | Máx. 3.5 |

Tabla 5. Especificaciones para los cementos asfálticos según grado de viscosidad.

### 2.4.2. Asfaltos Cortados.

Los asfaltos cortados son diluciones de cementos asfálticos en solventes volátiles derivados del petróleo, estas diluciones son de consistencia más fluida, es decir poseen una menor viscosidad, y su característica menos viscosa hace que se salga del rango en que se aplica el ensaye de penetración, el cual posee como limite máximo el valor de 300.

El uso de solventes es proporcionar trabajabilidad al asfalto para ser mezclado con agregados a bajas temperaturas, luego de esto el solvente se evapora, dejando el residuo asfáltico que envuelve y cohesiona los áridos en la mezcla final.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



Conforme al tipo de solvente utilizado en la mezcla estos asfaltos pueden clasificarse tres tipos dependiendo de la velocidad de volatización del solvente.

- Asfalto cortado de curado rápido.
- Asfalto cortado de curado medio.
- Asfalto cortado de curado lento.

Todos los asfaltos cortados poseen una nomenclatura específica para cada tipo, donde las letras van acompañadas de un número el cual indica su grado de viscosidad cinemática en centistokes medida a 60 ºC.

2.4.2.1 Asfalto cortado de curado rápido.

Este tipo de asfalto cortado se designa con las letras RC (Rapid Curing), cuyo fluidificante es Bencina, la cual permite un menor tiempo de evaporación, por su alto nivel de volatización.

A continuación los principales asfaltos de curado rápido:

| **Grado** | **Residuo Asfáltico en Volumen** |
|---|---|
| RC – 70 | 55% |
| RC – 250 | 65% |
| RC – 800 | 75% |
| RC – 3000 | 80% |

Tabla 6: Asfaltos cortados de curado rápido.

2.4.2.2. Asfalto cortado de curado medio.

Asfalto cortado cuyo fluidificante es Kerosene, el cual es un solvente menos volátil que el solvente anterior. Estos asfaltos poseen como nomenclatura las letras MC (Medium Curing).

Los asfaltos cortados de curado medio más utilizados son los de a continuación:

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



| **Grado** | **Residuo Asfáltico en Volumen** |
|---|---|
| MC – 30 | 50% |
| MC – 70 | 55% |
| MC – 250 | 67% |
| MC – 800 | 75% |
| MC - 3000 | 80% |

Tabla 7: Asfaltos cortados de curado medio.

2.4.2.3. Asfalto cortado de curado lento.

Corresponden a asfaltos cortados cuyo fluidificante es aceite, por o que el grado de volatización es mínimo. Estos ligantes se designan con las letras SC (Slow Curing), seguidos por el número correspondiente a la viscosidad cinemática que posee.

Los asfaltos de cuado lento más utilizados fueron los SC – 70 y SC – 250, pero actualmente la norma AASHTO ha discontinuado su uso debido al tiempo de quiebre que requerían.

2.4.3. Emulsiones asfálticas.

Las emulsiones asfálticas corresponden a un asfalto líquido cuyo fluidificante es el agua. Estos dos líquidos inmiscibles conforman una mezcla en la cual uno de ellos se dispersa en el otro, en forma de gotas diminutas, denominándose al primero fase dispersa (Asfalto) y al segundo fase continua (Agua). Para lograr una estabilidad entre la fase continua y dispersa es necesario incorporar un agente emulsificador, generalmente de base jabonosa o solución alcalina.

Los agentes emulsificantes forman una película protectora alrededor de los glóbulos de asfalto instituyéndoles una determinada polaridad en la superficie, lo que hace que estos se repelan manteniendo estable la emulsión. Cuando la emulsión se pone en contacto con los áridos, se produce un desequilibrio eléctrico que rompe la emulsión llevando las partículas de asfalto a unirse a los áridos y el agua fluye o se evapora separándose de la mezcla. Existen agentes emulsificadores que permiten que este quiebre sea instantáneo y otros más

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



poderosos que retardan este fenómeno. Lo que implica que las emulsiones se clasifiquen en:

- Emulsiones asfálticas de quiebre rápido, RS (Rapid Setting).
- Emulsiones asfálticas de quiebre medio, MS (Medium Setting).
- Emulsiones asfálticas de quiebre lento, SS (Slow Setting).

2.4.3.1. Emulsiones asfálticas de quiebre rápido.

Emulsiones designadas con las letras RS (Rapid Setting). Poseen un porcentaje relativamente bajo de emulsificante y es menos estable, este tipo de ligante es el más adecuado para la construcción de tratamientos superficiales por su facilidad de empleo y excelente adherencia a los áridos.

2.4.3.2. Emulsiones asfálticas de quiebre medio.

Segundo tipo de emulsión reconocida por sus siglas en Inglés MS (Medium Setting). Son utilizadas Principalmente para mezclas en frío ya sea esta en planta o en sitio.

2.4.3.3. Emulsiones asfálticas de quiebre lento.

Emulsión asfáltica designada por las siglas SS (Slow Setting). De igual modo que la emulsión anterior es usada para mezclas en frío, además de utilizarse en estabilización de suelos, riegos de liga en proporción 1:1 en agua, lechadas asfálticas y riegos negros.

Dado la existencia de áridos cargados eléctricamente, con polaridad positiva ó negativa, se ha de necesitar emulsiones eléctricamente afines con los áridos. Esta característica se la da el agente emulsificador, el cual puede cargar positiva o negativamente la emulsión, las primeras llamadas emulsiones catiónicas las cuales son afines a áridos de carga negativa (que son los más comunes en Chile), como son los de origen silíceo o cuarzoso y las segundas llamadas emulsiones aniónicas que son afines con áridos de carga positiva, como los de origen calizo.

Las Emulsiones Catiónicas se designan con las mismas letras anteriormente descritas y anteponiéndoles la letra mayúscula "C", como por ejemplo CRS – 1 ó CSS – 1.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



Si el residuo asfáltico de las emulsiones medias y lentas es de penetración 40 – 90 se le agrega la letra minúscula "h", como por ejemplo CSS – 1h ó MS – 2h.

Lo anteriormente señalado se mostrará en la siguiente figura de la nomenclatura de una emulsión:

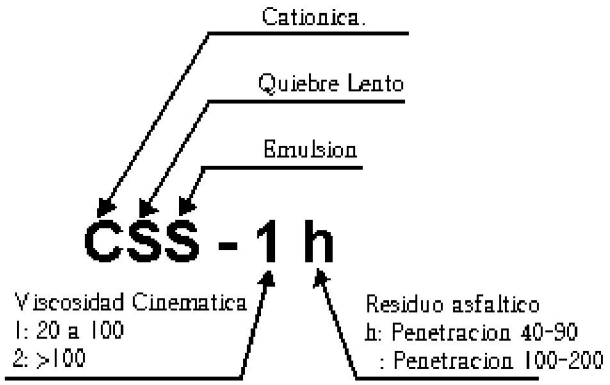



Fig. 19. Nomenclatura Emulsión Asfáltica.

La cantidad de emulsificantes y aditivos químicos utilizados varía generalmente entre 0.2% a 0.5% y la cantidad de asfalto es del orden del 60% a 70%.

## 2.5. Agregados Pétreos.

Los agregados pétreos son materiales granulares inertes con granulometrías adecuadas, que se emplean en los caminos ya sea como base granular para pavimentos en carreteras o simplemente como base granular de carpeta de rodadura para caminos básicos.

Los tipos de agregados pétreos se pueden clasificar en los siguientes tipos:

- Agregados Naturales: Son aquellos que se utilizan solamente después de su distribución de tamaño para adaptarse según su disposición final.
- Agregados de Trituración: Son aquellos que se obtienen de la trituración de rocas de canteras ó de las granulometrías de rechazo de los agregados naturales.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



- Agregados Artificiales: Son agregados subproductos de procesos industriales, como ciertas escorias ó materiales precedentes de demoliciones, utilizables y reciclables.

### 2.5.1. Propiedades de los agregados pétreos.

Las propiedades de los agregados se puedes ver desde bajo dos puntos de vista: uno como elementos aislados, o individuales, y otro como un conjunto.

Los agregados como elementos aislados tienen propiedades físicas macroscópicas: dimensión, forma, densidad, propiedades de superficie, porosidad conductividad térmica, dilatación, entre otros.

Las propiedades de los agregados como un conjunto, son sus características como un todo. Su distribución de rodados y desgaste de los agregados son propiedades de gran interés, por cuanto van influir sobre el rozamiento entre los elementos del agregado.

### 2.5.2. Naturaleza de los agregados pétreos.

Desde el punto de vista práctico, los agregados se pueden clasificar en tres grandes grupos: Agregados calizos, agregados silíceos y agregados ígneos y metamórficos.

- Agregados calizos: La roca caliza se ocupa en muy pocas ocasiones como agregado grueso en las capas de rodadura, debido a la facilidad que tiene de pulimentarse en condiciones de servicio, su carácter básico no presenta mayor problema de adhesividad, es decir, de afinidad con los ligantes asfálticos. En mezclas asfálticas se utiliza para mejorar esta característica cuando se emplea otro tipo de agregados, más duros pero más ácidos (silíceos, pórfidos, entre otros).
- Agregados silíceos: los agregados silíceos es un material de amplia utilización en las capas de pavimentos. Pueden no aportar una suficiente adhesividad con los ligantes asfálticos, sin embargo, si el material obtenido tiene un elevado contenido de sílice y de caras fracturadas, sus características mecánicas y su rozamiento interno proporcionan un esqueleto

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



mineral bueno para utilizarlo incluso en mezclas asfálticas sometidas a la acción directa del tráfico.

- Agregados Ígneos y metamórficos: Son materiales que por sus características resultan muy adecuados para utilizarlos como agregados grueso en las capas de rodadura. Pueden incluirse en este grupo los basaltos, gabros, granitos, etc. Sus cualidades para resistir el pulimento los hacen idóneos para garantizar la textura superficial necesaria en un periodo de tiempo, incluso con tráficos muy intensos. En este grupo los agregados de naturaleza más ácida pueden presentar una deficiente adhesividad con los ligantes asfálticos, pero en la mayoría de los casos el problema se puede resolver con activantes que son sustancias que tiene la misión de mejorar la adhesividad con los ligantes, o también se resuelve empleando emulsiones adecuadas y en el caso de mezclas asfálticas, con el empleo de finos de naturaleza básica y un polvo mineral adecuado.

### 2.5.3. Principales características de los agregados pétreos para pavimentos.

Las principales características que se deben tener en cuenta en los agregados para la construcción de pavimentos son las siguientes:

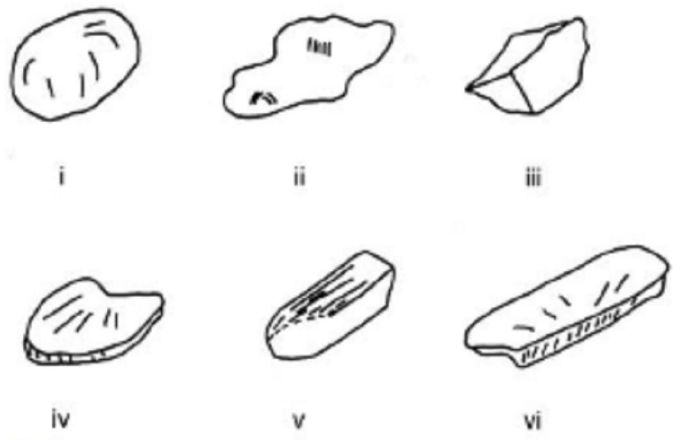
#### 2.5.3.1 Forma y angulosidad.

La forma de las partículas del agregado grueso afecta fundamentalmente, al esqueleto mineral. Según su forma, las partículas pueden clasificarse en rodados, irregulares, angulares, lajosas, alargadas y alargadas-lajosas.

Las lajosas y alargadas-lajosas (agujas), puede romperse con facilidad durante la compactación o después bajo la acción del tráfico, modificando con ello la granulometría del agregado inicial. Se deben imponer limitaciones en el contenido de las partículas de mala forma. Aparte de la forma de los elementos del agregado grueso, se debe tener en cuenta su angulosidad, que influye junto a la textura superficial de las partículas, en la resistencia del esqueleto mineral, por su contribución al rozamiento interno. Forma de las partículas del agregado pétreo. Fig. 20.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile






i. Redondeada, ii. Irregular, iii. Angular, iv. Lajosa, v. Alargada, vi. Alargada - Lajosa.

Fig. 20. forma de las partículas del agregado pétreo.

2.5.3.2. Resistencia al desgaste.

La resistencia mecánica del esqueleto mineral es un factor predominante en la evolución del comportamiento de una capa de pavimento después de su puesta en servicio. La evaluación de dicha resistencia se realiza mediante diversos ensayos de laboratorio; sin embargo, ninguno de ellos caracteriza el estado tensional del agregado en el conjunto del pavimento. Se realizan una serie de ensayos que tienden a reproducir en laboratorio de manera más sencilla el comportamiento que luego tendrán los agregados en servicio, para ello se prepararán las muestras con granulometrías próximas a las que van a ser puestas en obra, sometiéndolas a un desgaste que, de forma indirecta, proporciona información de la resistencia mecánica del material. La prueba de desgaste de Los Ángeles es un ejemplo de este tipo de ensayos.

2.5.3.3. Resistencia al pulimento.

La resistencia al pulimento de las partículas del agregado, es la resistencia a perder aspereza en su textura superficial, tiene gran importancia desde el punto de vista de la resistencia al deslizamiento cuando dichas partículas van a ser empleadas en una capa de rodadura. Para su evaluación se han desarrollado los ensayos de pulimento acelerado.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



2.5.3.4. Adhesividad y resistencia al desplazamiento.

La adhesividad de los agregados pétreos con los ligantes asfálticos es de gran importancia, debido a que se pueden presentar fenómenos fisicoquímicos en la superficie de los agregados empleados en las capas de pavimento. En estos fenómenos complejos intervienen tanto factores físicos del agregado como la textura, la porosidad del mismo, en conjunto con la viscosidad y tensión superficial del ligante, espesor de la película de ligante, etc. Y a su vez factores químicos relativos al ligante y al agregado. Si los agregados están absolutamente secos, se dejan mojar fácilmente por los ligantes asfálticos; sin embargo la situación es muy diferente con algo de humedad que siempre puede existir, ya que la superficie del agregado se polariza con un signo u otro dependiendo de su naturaleza. Atendiendo a ese criterio los agregados se clasifican en ácidos y básicos.

2.5.3.5. Plasticidad y limpieza.

Para que un agregado pétreo se comporte adecuadamente dentro de cualquier capa de pavimento, debe estar completamente limpio, libre de partículas de naturaleza orgánica, polvo o arcillas. Se establece en las normativas que todos los finos deben tener reducida su plasticidad e incluso que no sean plásticos en la mayoría de los casos. Las fracciones gruesas deben estar exentas de polvo, fijando los límites admisibles a través del denominado coeficiente de limpieza.

Se debe garantizar que en presencia de agua, la capa en cuestión conserve sus características resistentes y que, en su caso, no haya problemas de adhesividad con los ligantes asfálticos. En ocasiones aunque el agregado fino no sea plástico, puede estar contaminado por partículas no arcillosas, que no se hayan podido detectar mediante los límites de Atterberg, pero igualmente nocivas. Un ensayo muy utilizado para caracterizar desde este punto de vista el agregado fino (todo el material bajo malla 5 mm.) es el denominado Equivalente de arena.

2.5.3.6. Alterabilidad.

Los fallos detectados en un pavimento al poco tiempo después de su puesta en servicio, comúnmente suelen ser ocasionados por procesos de alteración de los agregados

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



en alguna de sus capas, los cuales pueden desencadenarse debido a alguna reacción química con alguno de los componentes de los ligantes asfálticos o conglomerantes, por la acción de la helada o, simplemente, por la siempre inevitable presencia de agua.

Existe la necesidad de evaluación de la alterabilidad de un agregado pétreo por el procedimiento que sea, y se pueden señalar a titulo indicativo, los siguientes caminos: análisis petrográfico, acción de soluciones salinas o de agua oxigenada, ciclos hielo-deshielo, inmersión en agua y ciclos de humedad-sequedad.

2.5.3.7. Resistencia al desprendimiento.

Los defectos de adhesión significan la quiebra de las fuerzas de unión entre el agregado y su cubierta de conglomerante asfáltico, lo que conduce a una separación física. Una posible consecuencia de los defectos de adhesión, es el fallo mecánico por desgaste y por desflecado de la superficie, pero el fallo mecánico no se produce inmediatamente después del fallo de adhesión, si el desprendimiento, aunque sea permanente, se produce a un nivel inferior de la construcción y el grado de entrecruzamiento de las partículas de agregado es suficiente para resistir el esfuerzo del tráfico, dado que el desprendimiento es un fenómeno asociado a la presencia de agua. Se deduce que los pavimentos densos, de bajo contenido en huecos, son prácticamente inmunes y que el comportamiento de los agregados pétreos en los ensayos de deslizamiento es bastante irrelevante en dicho uso.

2.5.3.8. Contribución a la resistencia y rigidez de la mezcla en conjunto.

Esta propiedad se refiere tanto a los agregados grueso, fino y polvo mineral; siempre que se cumpla que la resistencia y durabilidad intrínseca de las partículas del agregado, es la adecuada a las propiedades de la masa de pétreos entrecruzados y rozamiento interno. Respecto tanto la angularidad como la irregularidad de la textura superficial contribuyen en gran medida a las resistencias mecánicas y a la deformación de la mezcla asfáltica.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



### 2.5.4. Ensayos para caracterizar los agregados.

#### 2.5.4.1. Esqueleto mineral.

Análisis granulométrico.

Por medio de este ensayo se puede determinar la distribución de tamaños de las partículas, el cual consiste en hacer pasar una cierta cantidad de muestra de agregado por una serie de tamices normalizados, en América los tamices ASTM y en Europa los tamices UNE, en un orden sucesivo de mayor a menor abertura del tamiz, quedando retenida parte de la muestra en cada tamiz. Se representan en una grafica el porcentaje que pasa en cada uno de ellos, pudiéndose observar si la curva granulométrica es continua, o sea que contenga todos los tamaños.

#### 2.5.4.2. Agregado grueso (partículas sobre malla 5 mm.).

Estudio petrográfica.

En este ensayo se determina la composición mineralógica y las características de la naturaleza de los agregados pétreos, haciendo primero una descripción macroscópica del agregado, analizando su aspecto y determinando las características físicas como homogeneidad, dureza y tenacidad.

Índice de lajas y agujas.

La forma de las partículas de agregado grueso afecta al esqueleto mineral, las formas pueden ser redondeadas, cúbicas, lajas o agujas, siendo estas dos últimas las más peligrosas, porque durante el proceso de compactación o por las tensiones del trafico, se pueden romper y eso varía su contenido en la granulometría. Se definen los índices de lajas y agujas como los porcentajes en peso, respecto a la muestra total, de las partículas que son, respectivamente lajas o agujas. Los métodos utilizados para la determinación de dichos índices de forma se basan generalmente en la medida directa de las dimensiones de las partículas.

Los ensayos se realizan por calibres de ranuras para determinar el índice de lajas y los calibres de las agujas para sacar el índice de agujas. (Fig. 21 y 22 respectivamente).

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



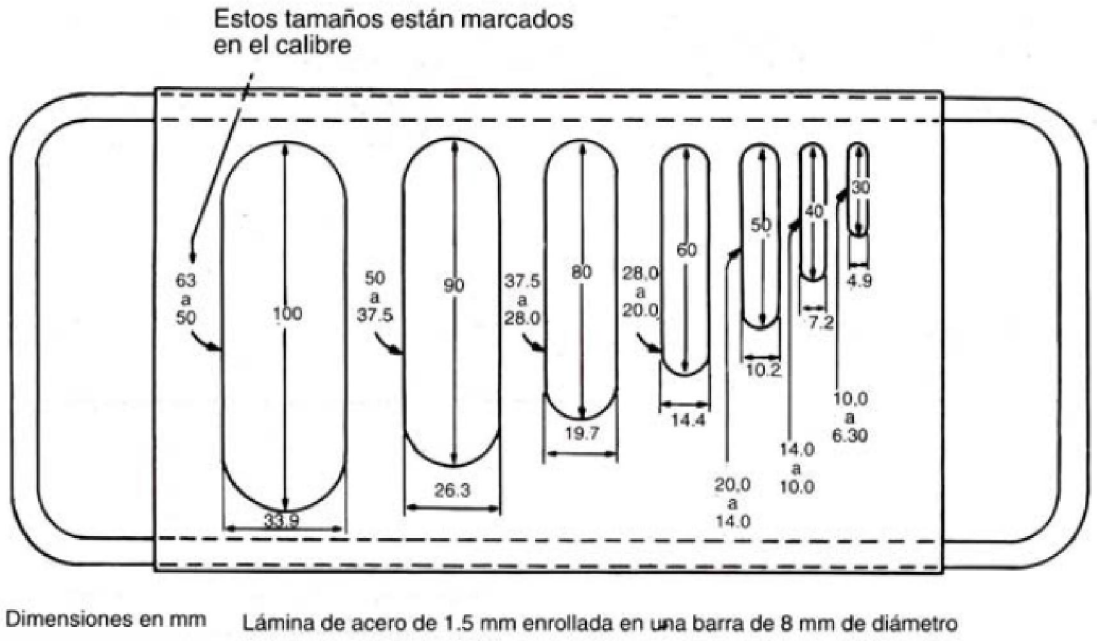



Fig. 21. Calibre para la determinación del índice de lajas.

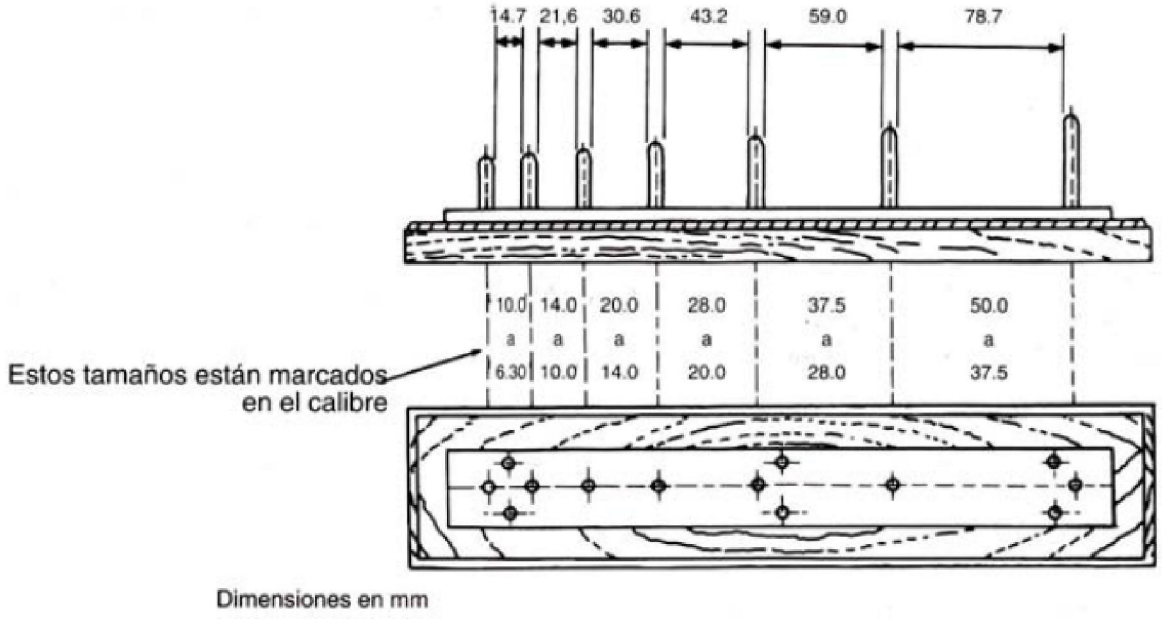



Fig. 22. Calibre para la determinación del índice de agujas.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



Forma y caras de fractura.

La forma de las partículas de mayor o menor angulosidad influye en la resistencia del esqueleto mineral. Para realizar este ensayo se determina el porcentaje de partículas con dos o más caras fracturadas.

Ensayo de desgaste de Los Ángeles.

Este ensayo caracteriza la resistencia que presentan los agregados al desgaste. La maquina de Los Ángeles consiste en un cilindro hueco de acero. Con sus extremos cerrados y una abertura para introducir los áridos, que gira en posición horizontal. Se introducen en el cilindro unas bolas de acero como la carga abrasiva y se hace girar un determinado número de vueltas. Luego se separa la parte de la muestra que pasa por el tamiz 1.7 mm. (ASTM Nº 12). Se determina el coeficiente de desgaste de Los Ángeles que es la diferencia entre el peso original y el de después del ensayo expresada en porcentaje del peso inicial.

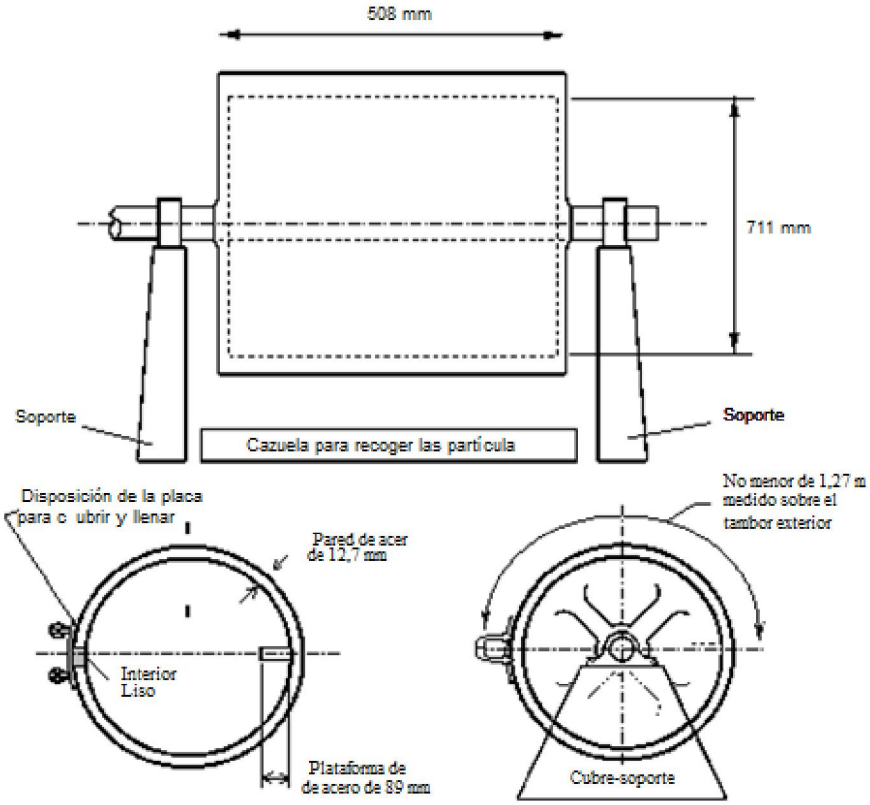



Fig. 23. Máquina de los Ángeles.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



Ensayo de péndulo de fricción.

La maquina de pulido acelerado simula la acción de una rueda llena de polvo sobre las muestras de agregado pétreo colocadas sobre una lámina de resina de poliéster y montadas en moldes normalizados sobre una pista rotatoria. El pulido de las muestras se mide posteriormente utilizando un péndulo de fricción normalizado.

Primero se introducen los agregados a analizar en una probeta de mortero hidráulico y se someten a ciclos de pulido mediante abrasivos introducidos en húmedo entre las probetas colocadas periféricamente en una rueda de ensayo durante tres horas en arena silícea normalizada y tres horas en palo esmeril.

El grado de pulimento conseguido para cada muestra se mide mediante el ensayo de fricción con un péndulo, calculando la perdida de energía del mismo por un ángulo suplementario de oscilación.

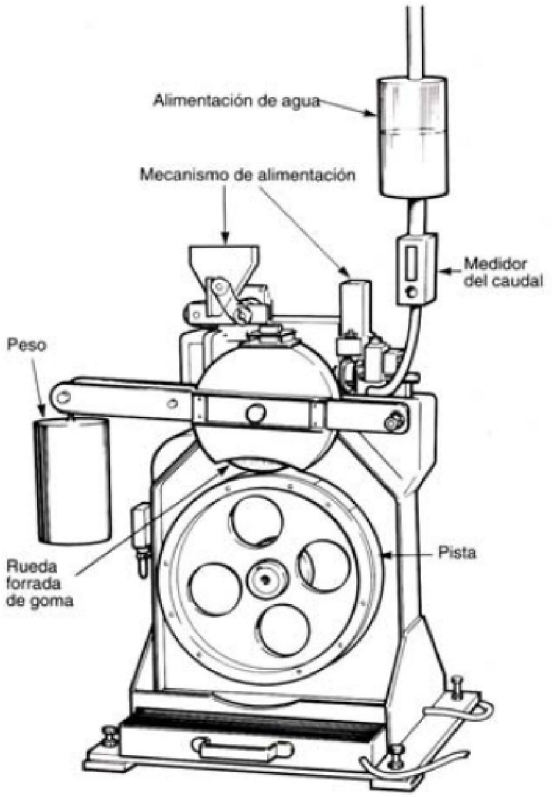



Fig. 24. Maquina de pulimento acelerado.

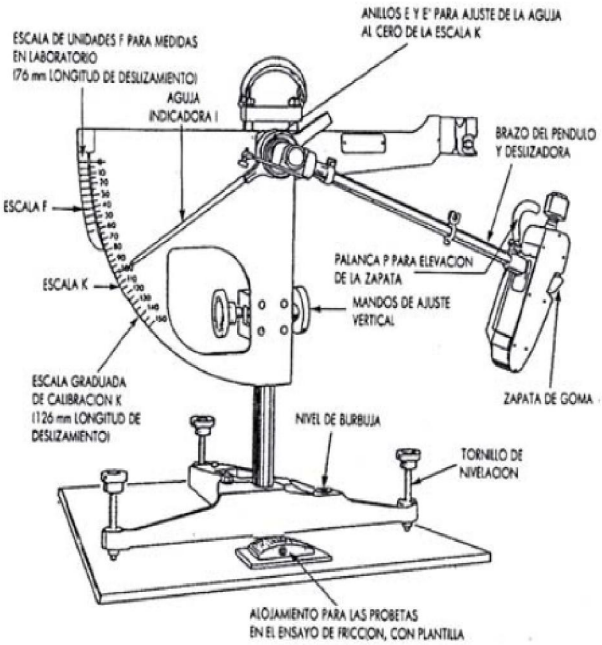



Fig. 25. Péndulo de fricción.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



2.5.4.3. Agregado fino. (Bajo tamiz 5 mm.).

Equivalente de arena.

Con este ensayo se puede evaluar la limpieza y plasticidad de los agregados finos. El ensayos consiste en introducir una muestra de agregado en una probeta que contiene una solución floculante, se mezcla el agregado con la solución y se agrega agua, dejando reposar el conjunto durante 20 minutos. Después de este tiempo se puede observar el agregado limpio en la parte inferior, en la zona intermedia las partículas contaminantes en suspensión y en la superficie el líquido relativamente limpio. Con la relación de alturas de estas zonas se determina el equivalente de arena. Se define como agregado muy contaminado el que posea un equivalente de arena menor de 20 y como agregado muy limpio el que tiene un equivalente de arena mayor que 50.

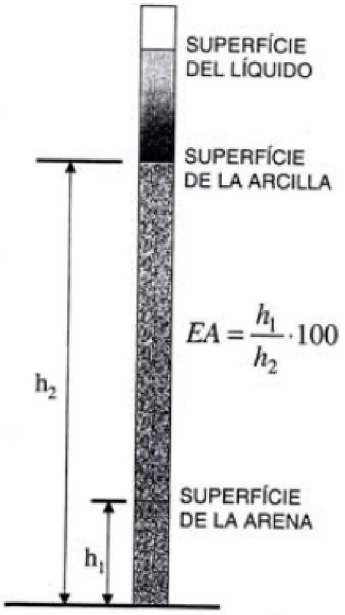



Fig. 26. Equivalente de arena.

Coeficiente de limpieza.

Consiste en comparar dos granulometrías de una misma muestra de agregados, antes y después de un lavado y secado del material. Las distorsiones entre las dos curvas no deben superar unos valores determinados.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



Límites de Atterberg.

El índice de plasticidad es la diferencia entre los límites líquido y plástico obtenidos mediante dos ensayos, que consisten en determinar el porcentaje de humedad existente en la muestra a partir del cual esta cambia de estado, pasando del fluido al semisólido para el primer caso y del semisólido al sólido en el segundo caso.

El ensayo para determinar el límite líquido se realiza mediante la maquina de Casagrande y el ensayo del límite plástico se realiza fabricando unos cilindros de 3 mm. de diámetro aproximadamente.

## 2.6. Agentes Estabilizadores.

En muchas partes del mundo, los materiales de buena calidad simplemente no están disponibles para la construcción de caminos. Los costos de transporte de importar material adecuado han promovido el desarrollo de técnicas de estabilización para poder utilizar los recursos localmente disponibles. En muchas ocasiones, las resistencias requeridas pueden obtenerse de un material local de baja calidad, a través de la adición de pequeñas cantidades de agentes estabilizadores (estabilizadores cementantes, asfálticos, entre otros) a un costo relativamente bajo. Estas técnicas son aplicables tanto al reciclado como a nuevas construcciones. A través del suplemento de un agente estabilizador, el material recuperado de un pavimento existente puede ser mejorado, eliminando así la necesidad de importar nuevos materiales que cumplan con las resistencias requeridas por la estructura del pavimento.

### 2.6.1. Estabilizadores cementantes.

Los agentes estabilizadores más utilizados son la cal, el cemento y mezclas de estos productos con cenizas volantes, escoria de alto horno y otros materiales puzolánicos. Aparte de los primeros experimentos romanos con cal, el cemento ha sido usado por un periodo más largo de tiempo.

La función primaria de estos agentes es aumentar la capacidad de soporte. La cal es un agente estabilizador más adecuado para materiales más plásticos. La cal liberada durante el

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



proceso de hidratación reacciona con las partículas de arcillosas en los suelos plásticos, reduciendo esa propiedad. El uso de mezclas de cemento puede, sin embargo, estar limitado al tratamiento de materiales con índice de plasticidad menor que 10.

La resistencia adquirida está determinada por la cantidad de agente estabilizador agregado y el tipo de material que se esté tratando. Contrariamente a la percepción de algunas personas, el agregar más cemento para aumentar la resistencia puede ser perjudicial para el desempeño de la capa. El material tratado con un agente estabilizador cementado tiende a ser relativamente frágil, luego de aumentar la resistencia hace que el material sea aún más frágil con la consecuente reducción en la flexibilidad de la capa estabilizada. Esto lleva inevitablemente a una proliferación de las grietas ante cargas repetitivas de tráfico, reduciendo así el desempeño estructural.

#### 2.6.1.1. Estabilización con Cemento.

El cemento es el agente estabilizador más comúnmente utilizado, una de las razones principales para esto es la disponibilidad, el cemento se fabrica en la mayoría de los países. Otra razón es su comprobado historial como material de construcción. Existe gran cantidad de estándares de ensayos y especificaciones disponibles, y además, las capas estabilizadas con cemento han superado las expectativas de desempeño en miles de kilómetros de pavimentación a lo largo de décadas. Pese a esto, la estabilización con cemento requiere de un adecuado enfoque de diseño. La función primaria de la adición de cemento es aumentar la resistencia del material y la resistencia de compresión no confinada (UCS, Unconfined Compressive Strength) ha alcanzado una aceptación global como el principal criterio de diseño. Sin embargo, muchos otros factores distintos de la UCS también deben ser considerados, como la tasa de ganancia de resistencia, la Resistencia a la Tracción Indirecta (ITS, Indirect Tensile Strength), el potencial de agrietamiento y la durabilidad. Estos factores son tratados a continuación.

##### 2.6.1.1.1. Durabilidad.

La durabilidad de un material natural está principalmente relacionada con el desgaste y la degradación de partículas individuales bajo la influencia de condiciones

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



climáticas y cargas repetitivas de tráfico. Tal degradación es un proceso lento y las partículas del material usualmente se mantienen inalteradas a lo largo de la vida útil del camino, en particular cuando se utilizan materiales de alta calidad. Sin embargo, cuando se estabilizan materiales de calidad pobre con agentes cementantes, se deben tener en cuenta aspectos adicionales relacionados a la durabilidad. Bajo ciertas condiciones climáticas, sus propiedades pueden cambiar durante cortos periodos de tiempo debido a la carbonatación y a influencias del medio ambiente.

El ensayo de Razón de Soporte de California (CBR, California Bearing Ratio) ha sido utilizado ampliamente como indicador de la resistencia natural de los materiales granulares, pero no es suficientemente sensible para medir las altas resistencias alcanzadas en materiales cementados. El ensayo UCS fue adoptado para determinar la resistencia de materiales estabilizados con cemento y los límites máximos y mínimos de resistencia son usados mundialmente. Sin embargo, investigaciones han mostrado que la UCS no es un indicador confiable de la durabilidad; un material estabilizado que cumpla con los requerimientos del ensayo de UCS puede deteriorarse o desintegrarse en un periodo corto de tiempo. Por ende, se deben realizar ensayos adicionales para asegurar que el material estabilizado con cemento sea suficientemente duradero, particularmente frente a los potenciales efectos destructivos de la carbonatación.

La carbonatación es un nombre que se le da a una compleja reacción química, y ocurre entre un material cementado y dióxido de carbono en presencia de agua. Esta reacción produce carbonato de calcio a partir de los iones libres de calcio (siempre en presencia de un material cementado) y el cambio resultante en la estructura molecular esta asociado con un aumento de volumen. Cuando las fuerzas expansivas ejercidas, debido al aumento de volumen, excede la resistencia a la tracción del material, este se destruye.

2.6.1.1.2. Resistencia.

Tanto la UCS como la ITS son parámetros importantes para la evolución de resistencia de un material estabilizado con cemento.

- El valor de UCS es usualmente determinado en probetas que han sido curadas por 7 días a una temperatura de 22 °C y una humedad superior al 95%. Se debe tener un cuidado

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



especial cuando se utiliza un material de granulometría gruesa. Existe la probabilidad que se produzcan "columnas de piedra" en el cuerpo de la probeta por lo cual se puede obtener una medición falsa de UCS, que se aproxima más a la resistencia de la piedra que a la de la mezcla estabilizada. Si se producen resultados de UCS muy altos (no esperados), se debería investigar el espécimen inspeccionándolo visualmente para observar la forma de falla.

- El ensayo de ITS se ha vuelto cada vez más importante como medida de durabilidad de largo plazo. Investigaciones recientes han mostrado que un valor mínimo de ITS de 250 KPa. se requiere para resistir las fuerzas destructivas generadas por carbonatación.

### 2.6.2. Estabilizadores asfálticos.

El uso del asfalto como agente estabilizador ha incrementado enormemente su popularidad, aplicado tanto en su forma de emulsión como asfalto espumado. El tratamiento con asfalto cortado (cut back) no es considerado como un proceso de estabilización, ya que el asfalto se dispersa en una manera similar al asfalto de las mezclas en caliente. Sin embargo, debido a razones ambientales, tal tratamiento ha sido prohibido en la mayoría de los países y por lo tanto no ha sido incluido.

Estabilizar con asfalto es una manera efectiva, desde el punto de vista de los costos, porque, se puede mejorar la resistencia de un material y reducir al mismo tiempo los efectos perjudiciales del agua. La estabilización con asfalto produce una capa relativamente flexible en comparación al mismo material tratado con cemento.

Reciclar con un agente estabilizador asfáltico crea un material que no tiene la apariencia típica de un pavimento asfáltico. Típicamente una base de asfalto de graduación continua presenta un contenido de vacíos entre un 3 a un 6% y cada partícula es cubierta con una capa delgada de asfalto, actuando como un "adhesivo de contacto". El material estabilizado con asfalto está caracterizado por la dispersión de asfalto, principalmente entre las partículas finas, típicamente, la fracción menor a 0.075 mm. para asfalto espumado y una fracción más gruesa para emulsión asfáltica. Por lo tanto, se conforma un material granular con una matriz rica en asfalto.

A continuación se mostrará una tabla comparación entre los diferentes tipos de aplicaciones con asfalto. Tabla 8.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



| Factor | Emulsión asfáltica | Asfalto espumado | Mezcla en caliente |
|---|---|---|---|
| Tipo de agregados en que se puede aplicar técnica | - Roca chancada<br>- Grava natural<br>- RAP, mezcla en frío<br>- RAP, estabilizado | - Roca chancada<br>- grava natural<br>- RAP, estabilizado<br>-Materiales marginales (arenas) | - Roca chancada<br>- 0% a 50% RAP |
| Temperatura de mezclado del asfalto | 20 °C – 70 °C | 160 °C – 180 °C (antes de espumar) | 140 °C – 180 °C |
| Temperatura del agregado durante la mezcla | Ambiente (en frío) | Ambiente (en frío) | Sólo en caliente (140 °C – 200 °C) |
| Contenido de humedad durante la mezcla | 90 % de OMC menos el 50 % del contenido de emulsión | Entre 65 – 90 % de la OMC | Seca |
| Tipo de recubrimiento de partículas del agregado | Recubrimiento parcial de partículas gruesas y cohesión de la mezcla con mortero asfalto/fino | Recubrimiento en zonas puntuales de la mezcla, gracias a mortero asfalto/finos | Recubrimiento de todas las partículas de agregado, verificándose mediante espesor de película |
| Temperatura de colocación y compactación | Ambiental | Ambiental | 140 °C – 160 °C |
| Velocidad para adquirir resistencia | Lento | Medio | Rápido |
| Asfalto modificado | Si | No apropiado | Si |
| Parámetros importantes del binder | - Tipo de emulsión (aniónica, catiónica)<br>- Asfalto residual<br>- Tiempo de quiebre<br>- Curado | - Vida media<br>- Razón de expansión | - Penetración<br>- Punto de ablandamiento<br>- Viscosidad |

Tabla 8. Comparación entre los diferentes tipos de aplicaciones con asfalto.

2.6.2.1. Estabilización con Emulsión Asfáltica.

Las emulsiones asfálticas fueron originalmente desarrolladas para resolver dificultades constructivas asociadas a la construcción con asfalto caliente, y también fueron ideadas como aplicaciones para eliminar la emisión de polvo. El incentivo para reducir el consumo de combustibles en la crisis energética de los años 70 hizo que se generara un

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



explosivo aumento en el uso de las emulsiones en la estabilización de agregado mineral, incluyendo el mezclado con material húmedo a temperaturas ambientales.

Las emulsiones utilizadas como agentes estabilizadores tienen una componente de "asfalto residual" de 60%, esto significa que el 60% del volumen de la emulsión está compuesto de asfalto disperso en un 40% de volumen de agua. El porcentaje de asfalto puede, sin embargo, variar entre 30% y 70%, pero los porcentajes de asfalto mayores al 60% no son recomendables para el reciclado debido a que la emulsión se torna viscosa, más difícil de bombear y por lo tanto es más difícil cubrir el agregado.

Después de mezclar la emulsión con el suelo a estabilizar se produce el proceso de "quiebre", que es la separación del asfalto de la fase de agua y la unión de las gotitas de asfalto con el agregado para producir una película continua de asfalto sobre la superficie de agregado. El exceso de agua del agregado se deposita en la mezcla. El lapso de tiempo entre el mezclado hasta la separación del agua de los glóbulos de asfalto se conoce como el tiempo de "quiebre" (setting). El proceso de quiebre es seguido por el curado, que es la pérdida de agua de la mezcla (principalmente a través de la evaporación) y el incremento de la rigidez y la resistencia a la tracción de la capa estabilizada de asfalto. Esto es importante debido a que una mezcla requiere adquirir rigidez y cohesión entre las partículas antes de permitir el tránsito sobre la nueva capa.

El quiebre y posterior curado está afectado principalmente por:

- La tasa de absorción de agua del agregado (los agregados de textura rugosa y porosa reducen el tiempo de quiebre y de fijación al absorber el agua contenida en la emulsión).
- El contenido de humedad de la mezcla previo al mezclado influye en el tiempo de quiebre.
- El contenido de humedad de la mezcla después de la compactación influye en el tiempo de curado.
- La granulometría del agregado y el contenido de vacíos de la mezcla (densidad alcanzada)
- El tipo y calidad de la emulsión. Mayores concentraciones de emulsificador iónico producen emulsiones más estables.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



- Fuerzas mecánicas causadas por la compactación y el tráfico.
- La composición mineral del agregado (por ejemplo, la tasa de curado puede ser afectada por posibles interacciones fisicoquímicas entre la emulsión y la superficie del agregado).
- La intensidad de carga eléctrica del agregado en relación a la de la emulsión.
- La temperatura del agregado y del aire, debido a que el calor cataliza las reacciones químicas y va a causar que el agua sea disipada y evaporada más rápidamente.
- Tipo y porcentaje activo de filler (por ejemplo, cantidad de cal o cemento).

El cemento se utiliza normalmente en conjunto con la emulsión asfáltica. Además de mejorar la resistencia retenida y proveer resistencia mejorada a la humedad, el cemento actúa como una forma de catalizador al controlar el quiebre, incrementando las propiedades resistentes iniciales. Las investigaciones realizadas acerca de los efectos de combinar cemento con emulsión asfáltica han mostrado que hasta un 1.5% en masa de cemento puede ser añadido sin reducir significativamente las características de fatiga de la capa estabilizada.

2.6.2.1.1. Contenido total de fluido.

Cuando se trabaja con emulsión asfáltica, el "contenido total de fluido" es utilizado en vez del "Contenido de humedad" al momento de definir la relación humedad/densidad. La densidad máxima se alcanza con el Contenido Óptimo de Fluido Total (Optimum Total Fluid Content, OTFC), que es la combinación de agua de compactación y emulsión asfáltica en la mezcla. Antes de quebrar, la emulsión asfáltica es un fluido con una viscosidad ligeramente mayor que la del agua. Tanto los componentes del agua como del asfalto de una emulsión actúan como lubricante para ayudar a la compactación, por lo que ambos deben ser considerados como un solo fluido. A continuación un ejemplo grafico del contenido óptimo total de fluido. Fig. 27.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



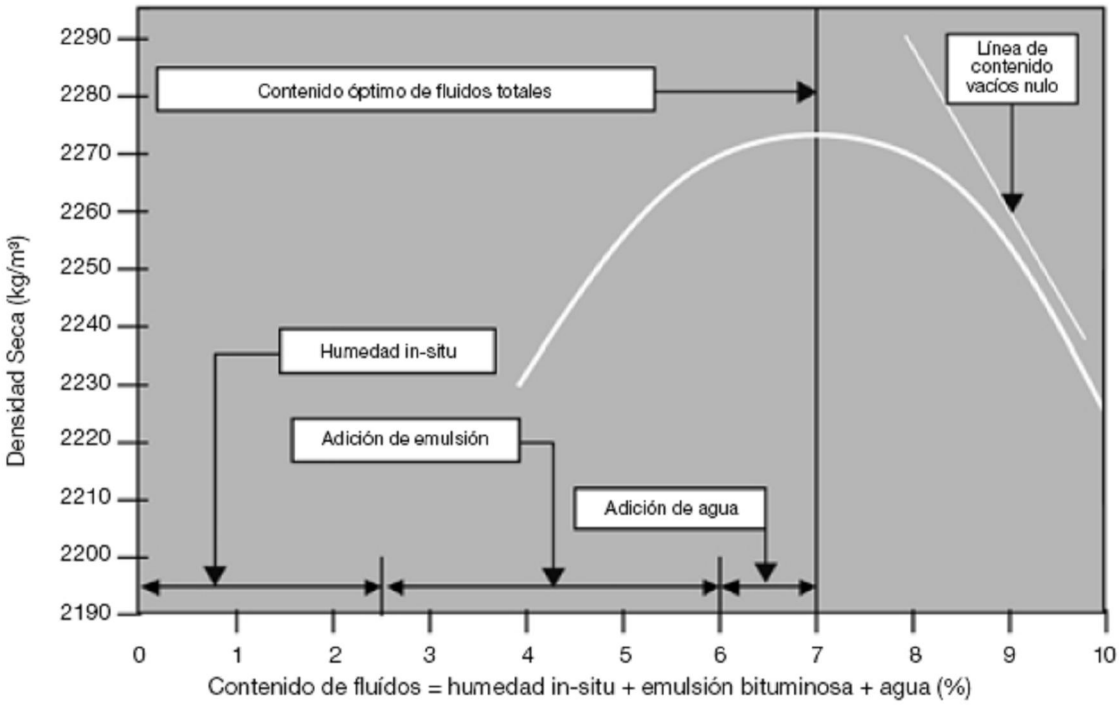



Fig. 27. Consideración de fluido total en la estabilización de materiales con emulsión.

La figura anterior muestra el contenido de humedad in-situ de un 2.5%, con una 3.5% de emulsión asfáltica aplicada. El material tiene un OTFC de un 7% bajo una compactación estándar. Un porcentaje de 1.0% adicional de agua se puede agregar durante el reciclado para llegar al contenido total de fluido al óptimo, o aplicar un esfuerzo adicional para alcanzar la densidad máxima. Si el contenido total de fluido del material se acerca al nivel de saturación (indicada por el nivel de porcentaje de vacíos nulo), se desarrollaran presiones hidráulicas bajo el rodillo causando que el material se hinche o descompacte.

2.6.2.1.2. Dosificaciones típicas de estabilizados con emulsión asfáltica.

Para obtener un material estabilizado con emulsión asfáltica con propiedades de ingeniería aceptables, es necesario alcanzar una tasa de aplicación óptima de emulsión asfáltica, determinada a partir de un procedimiento de diseño de mezclas. A continuación en la tabla siguiente se muestra los rangos de emulsión asfáltica y asfalto residual para distintos tipos de material. Tabla 9.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



| Tipo de material | Emulsión asfáltica (%) | Asfalto residual (%) |
|---|---|---|
| RAP/Piedra chancada (mezcla 50/50) | 2.5 a 5.0 | 1.5 a 3.0 |
| Piedra chancada graduada | 4.0 a 6.5 | 2.5 a 4.0 |
| Grava natural (IP <10, CBR <30) | 5.0 a 7.5 | 3.0 a 4.5 |

Tabla 9. Cantidad de emulsión típica y contenido de asfalto residual.

Los datos de la tabla anterior poseen además una tasa de cemento el cual se agrega entre un 1% y 1.5%. Una filosofía de diseño alternativa permite utilizar porcentajes bajos de cemento (0.5 a 1.5%) sólo con el objetivo de ayudar a la compactación y mejorar el comportamiento del material en condiciones húmedas, pero no necesariamente para mejorar propiedades de corte y resistencia.

2.6.2.1.3. Resistencia y rigidez.

Resientes investigaciones en Sudáfrica han demostrado que un material estabilizado con emulsión asfáltica tiene características de rigidez y resistencia similares a las logradas con asfalto espumado. Estas características serán descritas más adelante en el punto de estabilización con asfalto espumado.

2.6.3. Comparación entre estabilizadores cementantes versus bituminosos.

Para lograr realizar una adecuada elección al momento de estabilizar un material se debe saber las ventajas y desventajas de cada agente estabilizador, los cuales se darán a continuación en las siguientes tablas.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



| **Estabilización con Cemento** | |
|---|---|
| **Ventajas** | **Desventajas** |
| *Disponibilidad.* El cemento se puede obtener en cualquier parte del mundo, a granel o en bolsas.<br>*Facilidad de aplicación.* El cemento puede ser esparcido a mano si no se encuentran disponibles esparcidores mecánicos o mediante lechadas.<br>*Aceptación.* El cemento es conocido y ampliamente aceptado en la industria de la construcción. Métodos estándares y especificaciones se encuentran disponibles. | El agrietamiento por retracción es inevitable. Sin embargo, puede ser minimizado.<br><br>Aumenta la rigidez en pavimentos flexibles.<br><br>Requiere de un curado apropiado y protección para el tráfico a temprana edad una vez puesto en servicio, particularmente de vehículos pesados que se desplazan a baja velocidad. |
| **Estabilización con Emulsión Asfáltica** | |
| **Ventajas** | **Desventajas** |
| *Flexibilidad.* La estabilización con asfalto produce un material con propiedades viscoelásticas con una flexibilidad mejorada y resistencia a la deformación.<br>*Facilidad de aplicación.* Un tanque se acopla a la recicladora y se aplica a través de la barra roceadora.<br>*Aceptación.* Las emulsiones asfálticas son relativamente bien conocidas en la industria de la construcción. Métodos de ensayo estándares y especificaciones se encuentran ampliamente disponibles. | *Costo.* Las emulsiones de asfalto generalmente no se producen en terreno. Este proceso requiere de un estricto control, y los emulsificadores son caros. Los costos de transporte se ven incrementados debido al transporte (la emulsión además de asfalto tiene una cantidad importante de agua).<br><br>Donde el contenido de humedad del material sea cercano a la OMC, es posible que se alcance un estado de saturación del mismo.<br>*Disponibilidad.* La formulación requerida |

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



| | |
|---|---|
| | para una aplicación de reciclado no siempre está disponible. |
| **Estabilización con Asfalto Espumado** | |
| **Ventajas** | **Desventajas** |
| *Flexibilidad.* La estabilización con asfalto produce un material con propiedades viscoelásticas con una flexibilidad mejorada y resistencia a la deformación.<br>*Facilidad de aplicación.* Un tanque se acopla a la recicladora y el asfalto caliente es bombeado y esparcido mediante una barra roceadora, donde la espuma de asfalto es inyectada en la cámara de mezclado.<br>*Costo.* El asfalto espumado utiliza cemento asfáltico de penetración estándar. No existen costos adicionales de producción del mismo.<br>*Velocidad para adquirir resistencia.* El material puede ser transitado inmediatamente después de ser colocado y compactado. | El asfalto espumado requiere que el asfalto esté caliente, generalmente sobre los 160 °C. Frecuentemente esto requiere de instalaciones para calentar el mismo, y medidas especiales de seguridad.<br><br>Condición y tipo de material. El material saturado y pobre en la fracción fina (menor a 0.075 mm.) no puede ser tratado con asfalto espumado sin un tratamiento previo o la adición de material nuevo. |

Tabla 10. Comparación de agentes estabilizadores, Manual Wirtgen GmbH.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



# CAPÍTULO 3: RECICLADO CON ASFALTO ESPUMADO.

La técnica de reciclado, consiste en el tratamiento de materiales de pavimento antiguo, después de haber sido fragmentado o disgregado mecánicamente mediante un equipo fresador y recuperado para su uso. Este fresado puede ser profundo o superficial, lo cual depende del daño de la estructura del pavimento, cabe señalar que si la estructura de un pavimento se encuentra deteriorada, no significa que los materiales que lo conforman también lo estén. En el contexto de la tesis a desarrollar, se propone el fresado de una capa de rodado granular compuesta de una base de escoria de Vanadio, recuperada para tratarse con asfalto espumado in situ.

Más adelante en este capítulo, se describe las diferentes etapas para realizar el proceso de reciclado. También se expondrá los beneficios que se obtienen al aplicar este método, y los principales factores que afectan la viabilidad del reciclado en frío en un proyecto específico.

El reciclado en frío puede ser en planta o in-situ. En planta, el reciclado se logra mediante el transporte del material recuperado de un pavimento existente a un depósito central, donde el material se trabaja con una unidad de procesamiento (como un mezclador continuo). In-situ, el reciclado se logra utilizando una maquina recicladora móvil.

En general, el proceso en planta es la opción más cara en términos de costo por metro cúbico de material. Esto se debe principalmente a los costos de transporte, que no existen en el reciclado in-situ. En la actualidad, el tratamiento in-situ de los materiales de pavimentos es de uso generalizado, debido a la llegada de potentes máquinas recicladoras que pueden rehabilitar pavimentos a una fracción del costo de los métodos de reconstrucción convencionales. Además, considerando la situación de los pavimentos a nivel mundial, la rehabilitación de pavimentos existentes excede ampliamente la demanda por caminos nuevos. Como consecuencia de estos, el reciclado in-situ ha sido adoptado en muchos países como el método recomendado para abordar el enorme trabajo pendiente en términos de rehabilitación de pavimentos.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



## 3.1. Reciclado en planta.

El tratamiento en planta permanece siempre como una opción que debería ser considerada cuando el reciclado tiene aplicación, particularmente en aquellos que requieren una mezcla de materiales vírgenes a ser tratados, y también cuando son tratados con asfalto espumado y luego almacenados en acopios para su uso posterior.

Los principales beneficios del reciclado en planta versus in situ son:

- Control de los materiales de entrada. Mientras que in-situ permite un control limitado del material recuperado del pavimento existente, el reciclado en planta permite producto final específico al mezclar distintos tipos de agregado. Los materiales de entrada pueden ser almacenados en acopios y ser sometidos a ensayos antes de producir la mezcla, y también es posible cambiar la proporción de los mismos en la mezcla.
- Calidad de mezclado. Es posible realizar modificaciones en la operación de mezclado continuo para variar el tiempo en que el material es retenido dentro de la cámara de mezclado, cambiando la calidad de la mezcla.
- Posibilidad de acopiar el material. Particularmente en los materiales tratados con asfalto espumado, el producto producido puede ser almacenado y ser utilizado cuando sea requerido, y de ese modo evitar la dependencia de la producción de la mezcla y la colocación de la misma.

## 3.2. Reciclado in situ.

Este proceso se lleva a cabo mediante el uso de las llamadas maquinas de reciclado o recicladoras, las cuales están especialmente diseñadas para lograr reciclar capas de pavimento de gran espesor en una sola pasada. Las recicladoras modernas tienden a ser grandes y potentes las cuales pueden estar montadas sobre orugas o neumáticos de flotación. El elemento más importante de una maquina recicladora es el rotor fresador-mezclador equipado con un gran número de puntas, especialmente diseñadas para este

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



proceso. A continuación se muestra un esquema explicativo de cómo funciona un rotor fresador-mezclador en el proceso de reciclado.

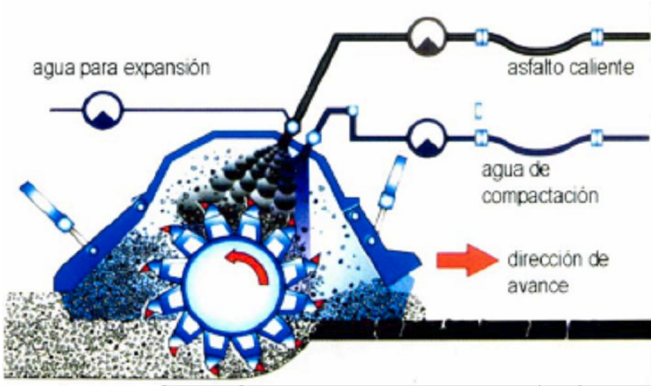



Fig. 28. Proceso de reciclado.

A medida que la máquina avanza con el tambor rotando, el agua es suministrada por un camión, acoplado a la recicladora, que mediante mangueras es conducida hacia la cámara de mezclado de la recicladora. El flujo de agua es medido con precisión mediante un microprocesador el cual controla el sistema de bombeo, mientras que en el tambor es mezclada el agua con el material reciclado para alcanzar el contenido necesario de humedad. De esta forma es posible conseguir altos niveles de compactación.

Agentes estabilizadores poderosos, como la cal hidratada, son normalmente repartidos en la superficie del pavimento existente, delante de la recicladora. La recicladora pasa trabajando sobre el estabilizador en polvo, mezclándolo a este con el material recuperado, para luego inyectarle agua, todo esto en una sola pasada.

## 3.3. Aplicaciones del Reciclado en frío.

El reciclado en frío es un proceso con múltiples aspectos que puede satisfacer muchas necesidades en el mantenimiento y rehabilitación de la estructura vial. Dependiendo si el material es tratado o no con un agente ligante, se pueden identificar dos categorías de reciclado en frío. Nótese que la abreviación RAP utilizada en la Fig. 25 y en otras partes de esta tesis se refiere a "Recycled Asphalt Pavement" (Pavimento Asfáltico Reciclado).

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



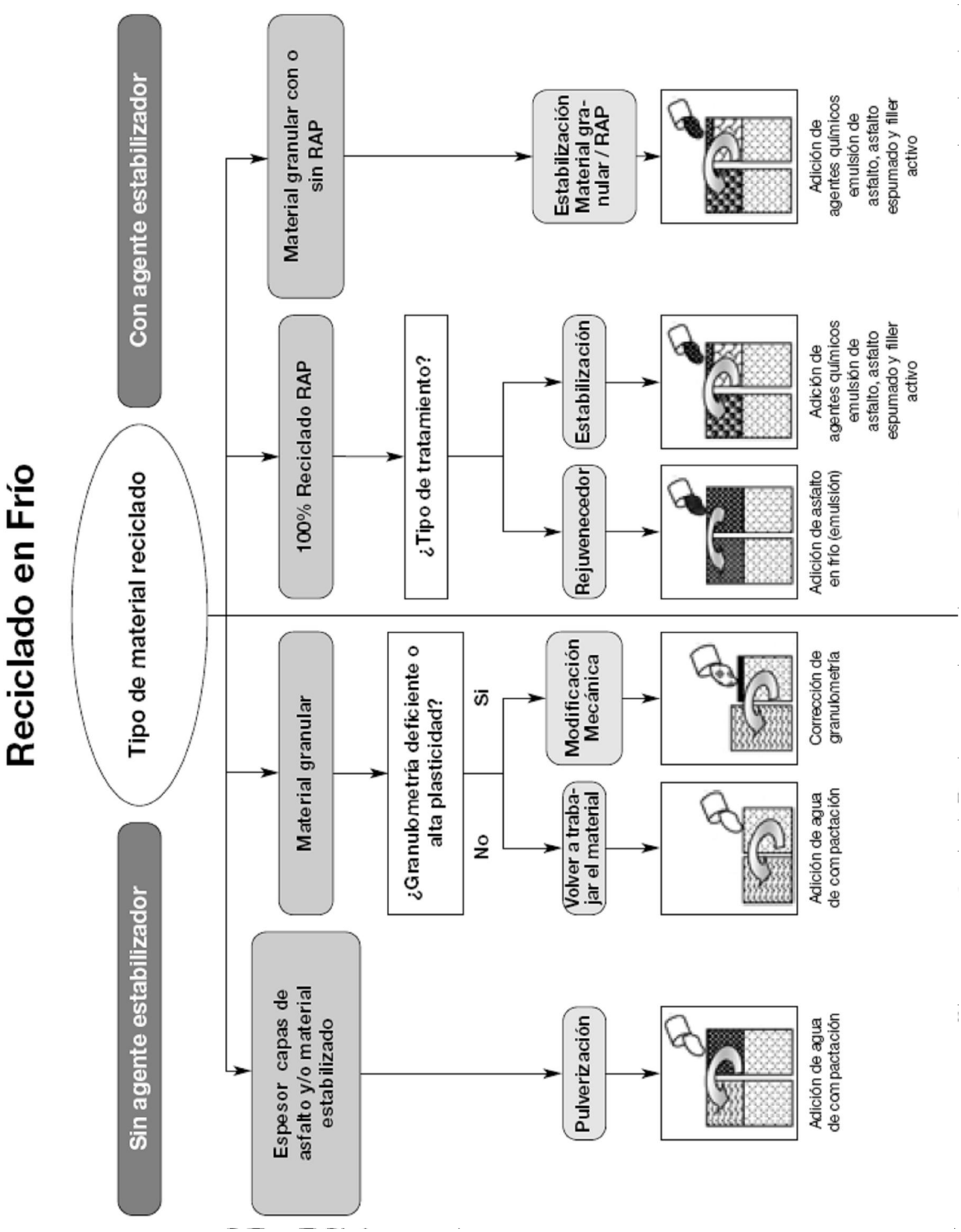



Fig. 29. Categorías de Reciclado.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



Las distintas categorías de la Fig. 29; 100% reciclado RAP, estabilización de material granular y/o RAP, modificación mecánica, recompactación y pulverización serán discutidas a continuación dando una breve explicación de cada una.

### 3.3.1. Reciclado 100% RAP.

Esta categoría cubre exclusivamente el reciclado 100% RAP requiere considerar los siguientes factores:

- Naturaleza y composición del pavimento existente (por ejemplo; tipo de mezcla asfáltica granulometría, contenido de asfalto, envejecimiento, etc.).
- Tipo y causas del deterioro (por ejemplo; agrietamiento o deformación permanente).
- Severidad del deterioro (por ejemplo; aislado a la capa superficial o deterioro profundo).
- Objetivo de la rehabilitación (por ejemplo; restauración de la integridad estructural).

Existen dos tecnologías distintas que pueden ser aplicadas para reciclar el 100% del material RAP.

- Construcción de una capa de mezcla asfáltica en frió, mediante la adición de emulsión como un rejuvenecedor, a una capa reciclada delgada (normalmente de 100 mm. de espesor o menos).
- Estabilización del RAP con cemento, emulsión o asfalto espumado en una capa más profunda (usualmente mayor a 100 mm.).

El reciclado del 100% del material RAP como una mezcla asfáltica en frío requiere el aporte de asfalto adicional en forma de emulsión. Esto es esencial en un proceso de rejuvenecimiento del asfalto. Sin embargo, agregar cemento asfáltico a una mezcla de cemento asfáltico sin estudiar las propiedades volumétricas del material reciclado requiere una aproximación de diseño cuidadosa. La granulometría de la capa reciclada será diferente a la del asfalto original, y además, la fracción fina en general adherida al material reciclado.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



Generalmente esto significa que una cantidad adicional de finos debe ser añadida a la mezcla mientras se realiza el proceso de reciclado.

Cuando el 100% del material de RAP es reciclado con un agente estabilizador, las propiedades del producto son diferentes a cuando rejuvenece.

Normalmente se requiere una superficie adecuada sobre la capa reciclada con el objetivo de alcanzar las propiedades funcionales, como la resistencia al deslizamiento y la calidad de rodado. Para caminos de tráfico menor, esto puede conseguirse con un riego con gravilla o con una capa de mezcla asfáltica en caliente delgada (< 40 mm.). Si un mejoramiento de estándar es aplicado al pavimento para que se pueda soportar trafico pesado, en ocasiones puede ser requerida una base asfáltica, además de la capa asfáltica superficial.

### 3.3.2. Estabilización con RAP/ Base granular.

Esta categoría de reciclado es típicamente aplicada como una medida para tratar estructuras de pavimentos deterioradas compuestas por bases granulares y superficies asfálticas delgadas, constituidas tanto por concreto asfáltico como por varias capas de sellos superficiales. El deterioro en este tipo de pavimentos generalmente se manifiesta como capas asfálticas severamente agrietadas, capas granulares deformadas, y baches. El objetivo de aplicar agentes estabilizadores mientras se recicla es recuperar la integridad estructural mediante le mejoramiento de las propiedades de ingeniería de los materiales recuperados, al mismo tiempo que es posible alcanzar una calidad de rodado óptima.

La estabilización RAP/Granular puede ser efectuada mediante el reciclado a distintas profundidades, generalmente entre 150 mm. y 250 mm. Cuando la capacidad estructural necesita ser mejorada ara ajustarse a mayores demandas de tráfico, la profundidad del reciclado puede incrementarse, alcanzando un aumento en el espesor de la nueva capa estabilizada. Sin embargo, es necesario que el pavimento existente tenga un espesor mínimo de material natural de buena calidad para aplicar esta alternativa. Los pavimentos deteriorados compuestos por capas estabilizadas (por ejemplo; con cemento o cal hidratada) también pueden ser reciclados.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



En esta categoría también se incluye el mejoramiento de los caminos sin recubrimiento superficial. Generalmente, el mejoramiento de estándar de estos caminos no pavimentados se debe a:

- Razones económicas. Usualmente, altos costos de mantenimiento están asociados a incrementos en cargas de transito.
- Razones medio ambientales. La pérdida anual de agregados entre 25 mm. y 35 mm. es común en caminos no pavimentados, lo que requiere de un aporte continuo de material de empréstito. Además, se ha mostrado que la generación de polvo en caminos no pavimentados es dañina para la salud.
- Razones estratégicas. Necesidades políticas gubernamentales.

El reciclado de las capas granulares superficiales existentes generalmente es realizado con agentes estabilizadores. La estabilización con emulsión o asfalto espumado es realizada a una profundidad promedio de entre 125 mm. a 150 mm. más una capa superficial delgada, como riego con gravilla o una lechada. Estabilizar con cemento o cal hidratada requiere que la profundidad de reciclado sea aumentada a 150 – 250 mm. para alcanzar un producto similar en términos de vida estructural. Una aplicación adicional que cae dentro de esta categoría es la modificación del material plástico mediante el reciclado con cal hidratada. Durante el proceso de reciclado, sólo la cal requerida es agregada al material recuperado para eliminar o reducirla plasticidad. Por lo tanto, la adicción de cal no es considerada como una estabilización, ya que la razón de agregar este estabilizador no es conseguir un aumento en la resistencia del material (pese a que a largo plazo es posible conseguir algún incremento en la resistencia).

### 3.3.3. Pulverización.

No siempre es necesario adicionar un agente estabilizador cuando se recicla un pavimento existente que contiene capas asfálticas gruesas. En ocasiones, las capas asfálticas gruesas que presentan un estado de agrietamiento por fatiga severos, se tratan mejor mediante pulverización previa de la capa asfáltica completa. Posteriormente, se compacta este material para crear un "granular reconstituido". La base asfáltica nueva y las

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



capas superficiales se construyen sobre esta capa asfáltica reconstituida obteniéndose una estructura de pavimento "equilibrada". Los pavimentos que incorporan capas deterioradas de base estabilizadas también pueden ser tratados en forma efectiva utilizando pulverización. Las capas ligadas deterioradas usualmente exhiben fallas tipo "en bloque". En un comienzo estas fallas se producen en forma espaciada, pero con el tiempo aumentan su frecuencia en la superficie del pavimento. Al pulverizar estos materiales, se elimina el potencial riesgo del reflejo de grietas en las capas que se construirán sobre el material pulverizado.

### 3.3.4. Reprocesamiento.

Los caminos de grava o no pavimentados generalmente mejoran su estándar a caminos pavimentados sin la incorporación de agentes estabilizadores. Sin embargo, es beneficioso volver a trabajar y recompactar la capa superior del pavimento existente para alcanzar una uniformidad adecuada antes de recapar con una nueva capa de material importado. A pesar de que no se agrega material asfáltico, la humedad del material in-situ normalmente requiere un ajuste. Esto es posible lograrlo con el procedimiento constructivo del reciclado, para asegurar que se consigue el nivel óptimo de compactación. Aplicar la técnica de reprocesamiento también es aplicable a los caminos nuevos construidos con materiales disponibles in-situ. Si la subrasante existente es adecuada, la opción de reprocesamiento es un método equivalente a escarificar y recompactar, tradicionalmente utilizado en la construcción de caminos nuevos. De esta forma, es posible conseguir una capa homogénea y con propiedades de capacidad de soporte consistentes.

### 3.3.5. Modificación de las propiedades mecánicas.

Se ha determinado que unas de las causas del deterioro de los pavimentos se debe a la granulometría deficiente de los materiales que componen las capas superiores del pavimento. Corregir la granulometría es posible mediante la adición del material faltante para lograr una granulometría adecuada sobre la capa granular existente, antes de aplicar la técnica de reciclado. El contenido de humedad se ajusta durante el proceso de reciclado, para alcanzar las condiciones optimas de compactación del material reutilizado. La

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



modificación de las propiedades mecánicas puede ser utilizada en el tratamiento de materiales que presentan una plasticidad inaceptable. En algunos casos, es posible tratar arcillas que se encuentran en terreno, mediante el mezclado de materiales arenosos sin cohesión, reduciendo la plasticidad efectiva del material existente. Esta técnica debe ser aplicada con cuidado, ya que la separación mecánica de partículas plásticas en realidad no produce ningún tipo de reducción química de la plasticidad y, a menos que la graduación de la arena sea compatible con la naturaleza y graduación del material plástico, el desempeño del material existente no necesariamente será mayor.

### 3.4. Principales factores que afectan el reciclado en frío.

Cuando se decide rehabilitar un pavimento, los métodos que poseen una mejor relación costo-efectividad tienden a ser especificados para cada proyecto. Cada proyecto es único en términos de la estructura del pavimento existente y la calidad de los materiales que conforman los mismos. Por lo tanto, es importante utilizar la solución más apropiada y práctica para cada proyecto, tomando en cuenta los siguientes factores:

- Ubicación: La solución más efectiva para cada zona está definida por el medio ambiente local, así como las condiciones de tráfico del proyecto. Si este es una calle urbana de alto tráfico donde sólo el trabajo nocturno está permitido, o si es un camino rural secundario sin pavimentar (camino básico), y se debe aumentar su estándar. Soluciones y estándares de servicio muy distintos son requeridos en ambos casos extremos. Es Importante tomar conocimiento de los estándares locales de la construcción de caminos, así como la percepción y aceptación de la población local de los niveles de servicio.
- Medio ambiente físico: La topografía y la geología deberían ser tomadas en consideración cuando se determina el método apropiado para la rehabilitación de un camino. Específicamente, pendientes pronunciadas que pueden hacer que algunos tipos de técnicas constructivas sean imposibles de aplicar en la práctica. El clima también juega un rol importante en la

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



elección y aplicación de distintas soluciones. Las condiciones y soluciones en regiones desérticas con una escasa o nula precipitación serán distintas a las requeridas en proyectos de zonas lluviosas. El efecto de temperaturas extremas, como el agrietamiento térmico inducido por los ciclos hielo-deshielo, también influyen en el tipo de solución adoptada.

- Disponibilidad de materiales: La factibilidad de varias opciones de rehabilitación es significativamente influenciada por la disponibilidad de materiales, especialmente de los agentes estabilizadores. Estos deben ser provistos en cantidades suficientes y que alcancen niveles adecuados de calidad y consistencia. Las recicladoras utilizan grandes volúmenes de agentes estabilizadores y es necesario establecer una fuente de abastecimiento confiable de estos materiales.

Siempre existirá más de una solución para la rehabilitación de un camino deteriorado. El reciclado profundo es un concepto nuevo en la ingeniería de pavimentos y, debido a la inherente reducción de costos que implica aplicar la técnica, siempre debería ser considerada como una opción.

## 3.5. Beneficios del reciclado en frío.

Algunos de los beneficios mas evidentes del reciclado en frío para la rehabilitación de pavimentos son:

- Calidad de la capa reciclada. Se logra una alta y consistente calidad de mezclado de los materiales in-situ con el agua y los agentes estabilizadores. La adición e fluidos es precisa debido al microprocesador que controla los sistemas de bombeo. El material reciclado, más los aditivos, son mezclados en forma intensa en la cámara del tambor fresador-mezclador.
- Menores tiempos de construcción. Las recicladoras son capaces de producir con altas tasas de rendimiento que reducen significativamente los tiempos de construcción comparados con métodos alternativos de rehabilitación.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



Esta reducción de tiempos también disminuye los costos y generan un beneficio intangible para los usuarios del camino, ya que las interrupciones de tráfico son menores.

- Integridad estructural. El proceso de reciclado en frío produce capas ligadas gruesas que son homogéneas y no contienes interfaces débiles con otras capas más delgadas.
- Factores medio ambientales. Se hace uso del 100% de los materiales del pavimento existente. No se necesita crear sitios de empréstito de materiales, y el volumen del nuevo material que debe ser importado a la obra desde pozos de agregados es minimizado. Esto reduce los efectos en el medio ambiente, los cuales son inevitables cuando se abre una zona para extraer materiales de empréstito. Además, el transporte es reducido en forma drástica. El consumo de energía total es reducido en forma considerable, así como el efecto destructivo de los vehículos de transporte en la red vial.
- La alteración de la subrasante es mínima. La alteración de la estructura de pavimentos subyacentes es mínima comparada a la rehabilitación utilizando técnicas tradicionales de construcción. El reciclado en frío generalmente es una operación que requiere de una sola pasada de máquina. En ocasiones el material de pavimento que se vuelve a trabajar con maquinaria convencional somete a la subrasante a cargas repetitivas con un alto estado de tensiones, causando problemas de levantamiento en esta, lo que se traduce en excavar y rellenar con material importado.
- Seguridad. Uno de los beneficios más importante del proceso de reciclado en frío es la seguridad vial que es posible conseguir. El tren de reciclado completo se puede acomodar en el ancho de una pista.
- Costo-efectividad. Los beneficios expuestos anteriormente se combinan para hacer el reciclado en frío una alternativa altamente atractiva para la rehabilitación de pavimentos en términos de costo-efectividad.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



## 3.6. Estabilización con Asfalto Espumado.

La espuma de asfalto se produce cuando el asfalto caliente (160 – 180 °C) se mezcla con una pequeña cantidad de agua atomizada (generalmente un 2% en masa) en una cámara de expansión especial. En el estado espumado (estado temporal de baja viscosidad), el asfalto puede ser agregado y mezclado con los agregados pétreos a temperatura ambiente y con contenidos de humedad in-situ.

El proceso de espumado del asfalto es dependiente del cambio de estado del agua de liquido a vapor, un proceso que está acompañado de una expansión de unas 1500 veces el volumen original del líquido a una presión atmosférica normal. Cuando las partículas de agua entran en contacto con el asfalto caliente, la energía calórica del asfalto se trasfiere al agua. Tan pronto como el agua alcanza su punto de ebullición ésta cambia de estado, y al hacerlo, crea una burbuja con una delgada película de asfalto llena de vapor de agua.

El descubridor del potencial del asfalto espumado como agente estabilizador fue el profesor Ladis Csanyi en la Estación Experimental de Ingeniería (Engineering Experiment Station) en la Universidad Estatal de Iowa (Iowa State University) en 1956. Esta tecnología fue refinada más tarde por la organización Mobil Oil que desarrolló la primera cámara de expansión para mezclar agua con asfalto para generar espuma, una empresa fabricante de maquinas recicladoras, a mediados de los '90 desarrollo un sistema que inyectaba tanto aire como agua al asfalto en la cámara de expansión y así lograr una mejor calidad de espuma.

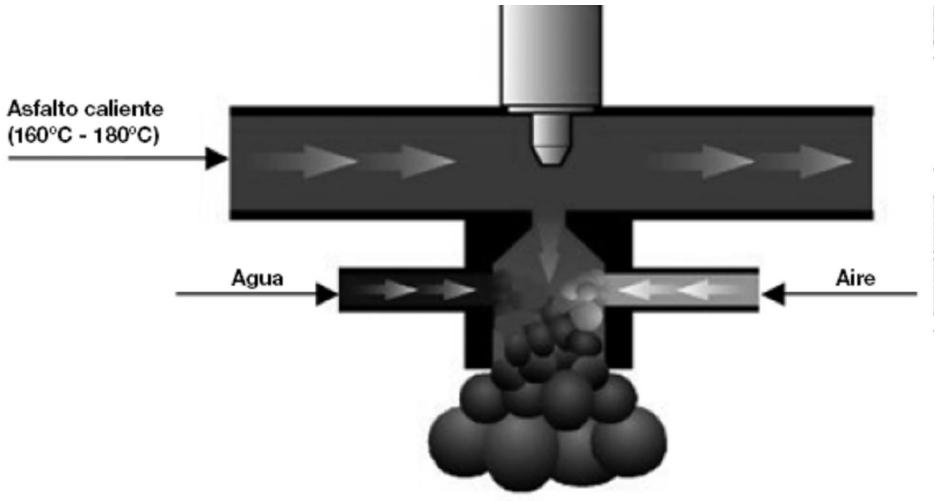



Fig. 30. Producción de asfalto espumado.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



El asfalto espumado se puede utilizar como un agente estabilizador con una variedad de materiales, desde piedra chancada de buena calidad hasta gravas marginales con cierto grado de plasticidad. Las principales ventajas de estabilizar con asfalto espumado en comparación a la emulsión asfáltica son:

- reducción de los costos de ligante, ya que el asfalto espumado comprende un asfalto de penetración estándar y sólo un pequeño porcentaje de agua, típicamente un 2% en masa del asfalto.
- Reducción de costos de transporte. Para una misma proporción de asfalto residual una emulsión contiene 40% de agua la cual debe ser transportada con el asfalto.
- El material tratado con asfalto espumado puede ser colocado, compactado y abierto al tráfico inmediatamente.
- El material tratado con espumado se mantiene trabajable por extensos periodos de tiempo y puede ser acopiado en condiciones climáticas adversas sin que el asfalto sea lavado del agregado.
- El proceso de asfalto espumado puede ser usado para tratar materiales in-situ con contenidos de humedad de terreno relativamente altos, debido a que el ligante puede ser agregado sin usar agua adicional.

Al igual que la estabilización con emulsión asfáltica, se debe agregar pequeñas proporciones de cemento o cal con el asfalto espumado. El objetivo es similar, mejorar la resistencia retenida en condiciones de humedad. El empleo de un filler activo ayuda además a la dispersión del asfalto al incrementar la fracción menor a 0.075 mm. del material así como también mejorar la trabajabilidad de la mezcla y la reducción del índice de plasticidad.

### 3.6.1. Características del asfalto espumado.

El asfalto espumado se caracteriza por dos propiedades principales:

- Razón de expansión, es una medida de la viscosidad de la espuma y va a determinar qué también se va a dispersar el asfalto en la mezcla. Se calcula

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



como la razón entre el máximo volumen de la espuma relativo a su volumen original.

- Vida media, medida de estabilidad de la espuma y provee una indicación de la tasa de colapso de la espuma. Se calcula como el tiempo, en segundos, que transcurre para que la espuma colapse a la mitad de su volumen máximo.

Las propiedades señaladas anteriormente se ilustran en la fig. 31.

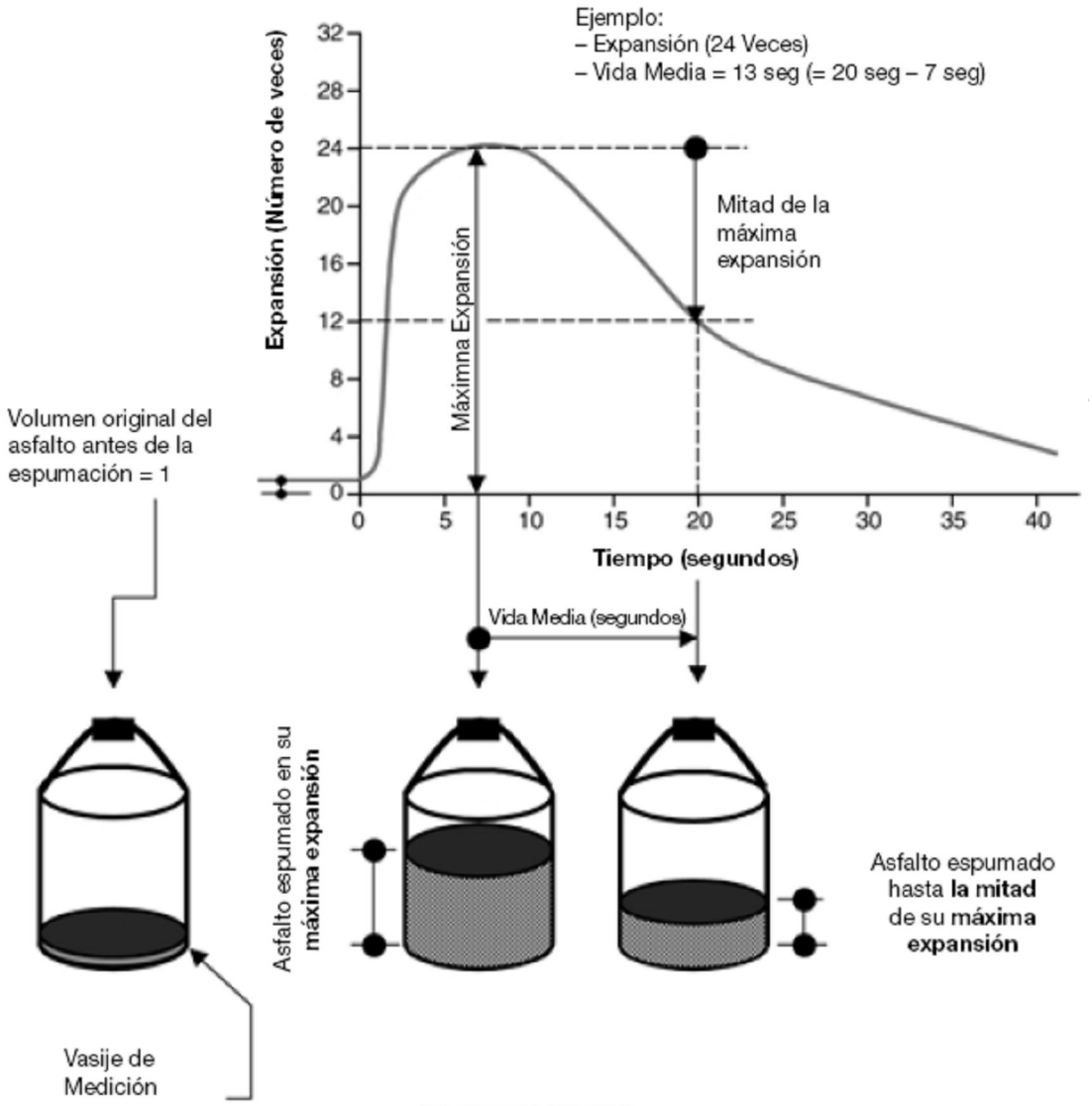



Fig. 31. Características del asfalto espumado, Manual Wirtgen GmbH.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



Se considera que la mejor espuma es la que optimiza tanto la expansión como la vida media.

3.6.2. Factores que afectan las propiedades de la espuma.

La razón de expansión y la vida media del asfalto espumado están afectadas por:

- Adición de agua. Aumentar la cantidad de agua inyectada al asfalto aumenta efectivamente el volumen de espuma producido por un factor multiplicador de 1500. Así, aumentar la cantidad de agua añadida aumenta el tamaño de las burbujas creadas, causando que aumente la tasa de expansión. Sin embargo, el aumentar el tamaño individual de las burbujas reduce el espesor de la película del asfalto que las rodea, haciéndolas menos estables y resultando en una reducción de la vida media. Por ello la razón de expansión y la vida media están relacionadas de forma inversa a la cantidad de agua que es añadida. En la figura de a continuación se muestra un gráfico de tipo para obtener la tasa óptima de agua. Fig. 32.

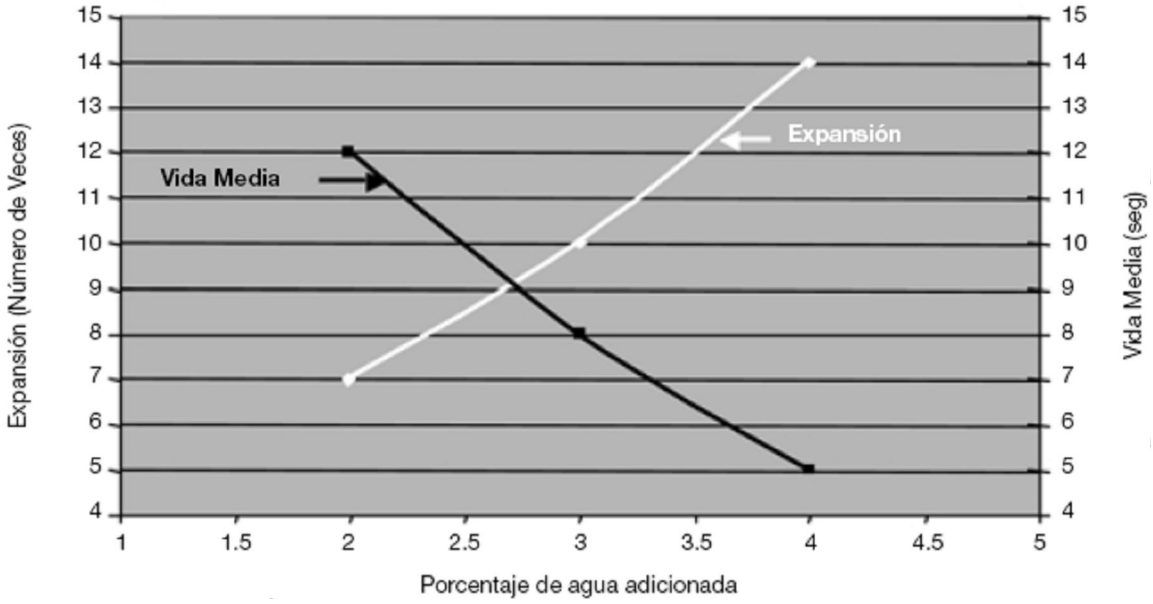



Fig. 32. Relación entre propiedades del asfalto espumado.

- Tipo de asfalto. Generalmente se utilizan asfaltos con valores de penetración entre 80 y 150 para espumar, pese a que asfaltos más rígidos

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



que cumplen con los requisitos mínimos de espumado se han utilizados en el pasado. Por razones prácticas, los asfaltos más rígidos son generalmente evitados ya que producen una espuma de peor calidad, generando una dispersión más pobre.

- Temperatura del asfalto. La viscosidad del asfalto goza de una relación inversa con la temperatura; a medida que la temperatura aumenta, la viscosidad se reduce. Lógicamente, mientras más baja es la viscosidad, mayor es el tamaño de la burbuja que se formará cuando el agua cambie de estado en el proceso de espumado. Debido a que este proceso saca energía del asfalto, la temperatura antes del espumar debe exceder los 160 °C para obtener un producto satisfactorio.
- Presión del asfalto y del agua. El asfalto y el agua son inyectados en la cámara de expansión a través de pequeñas aberturas. El aumentar la presión en las tuberías de suministro causa que el flujo que pasa a través de estas aberturas se atomice. Mientras más pequeña son las partículas individuales, mayor es el área de contacto disponible, mejorando así la uniformidad de la espuma.
- Aditivos. Existen muchos productos en el mercado que van a afectar las propiedades espumantes del asfalto, tanto negativamente (anti-espumantes) como positivamente (espumantes). Usualmente, los espumantes son sólo requeridos cuando el asfalto ha sido tratado con agentes anti-espumantes (normalmente en el proceso de refinado). La mayoría de los espumantes son añadidos al asfalto antes de calentar a las temperaturas de aplicación y tienden a ser sensibles a la temperatura, siendo su vida efectiva bastante corta. Para obtener los beneficios de añadir un espumante, el asfalto debe ser utilizado dentro de pocas horas. Sin embargo, estos productos son generalmente caros y se consideran sólo como último recurso para mejorar las propiedades de un asfalto difícil de espumar. El cortar asfalto con petróleo diesel ha probado ser exitoso en reducir suficientemente su

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



viscosidad como alcanzar una espuma aceptable. No obstante, esto no es recomendable a menos que sea llevado a cabo por un proveedor de asfalto.

### 3.6.3. Material adecuado para tratamiento con asfalto espumado.

El asfalto espumado es aplicable a una gran variedad de materiales, que van desde arenas, gravas, hasta piedras chancadas y RAP. Tanto granulares seleccionados como marginales, vírgenes o reciclados, han sido utilizados en forma satisfactoria en el proceso de reciclado. No obstante, es importante establecer los límites de tolerancia requerida en los agregados, así como identificar la composición óptima del material que va a ser sometido al tratamiento con espuma de asfalto.

Los materiales que son pobres en finos no se mezclan en forma adecuada con el asfalto espumado. Como se indica en la figura más abajo, el porcentaje mínimo de finos es del 5%, considerando como finos a la fracción del material que pasa la malla de 0.075 mm. (N° 200). Cuando un material no tiene la cantidad adecuada de finos, el asfalto espumado no se dispersa en forma apropiada y tiende a formar lo que se conoce en el material reciclado como "filamentos" de asfalto (aglomeraciones de material fino con asfalto), los que varían en tamaño dependiendo de la escasez de finos.

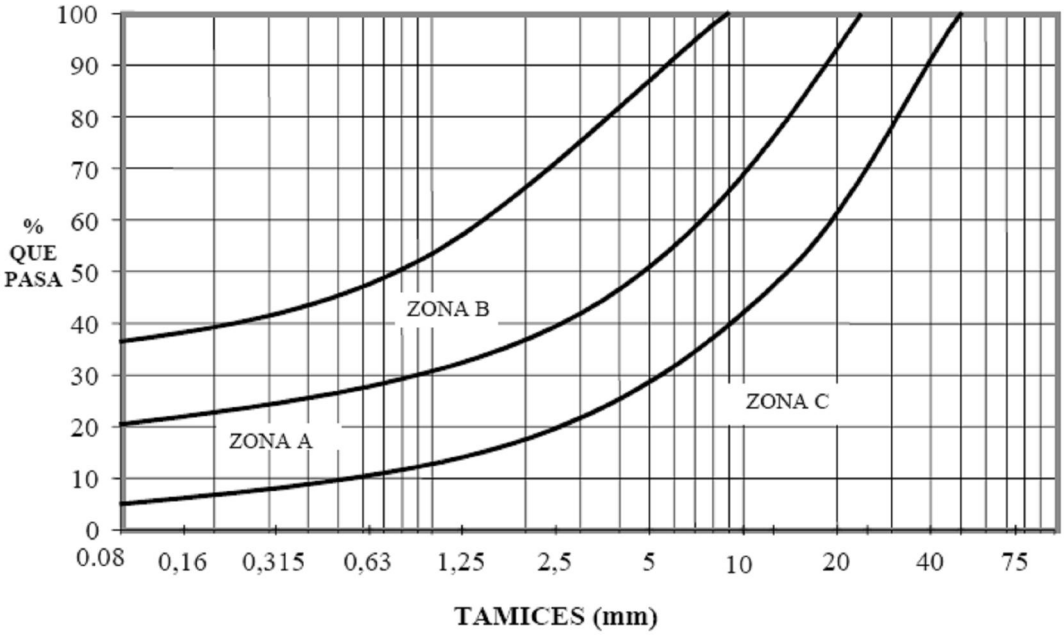



Fig. 33. Bandas granulométricas para material adecuado tratado con asfalto espumado.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



Estas bandas fueron desarrolladas por Akeroyd & Hicks para Mobil Oil en 1988. Las bandas granulométricas presentadas anteriormente poseen un amplio rango de tolerancia y pueden ser ajustadas con el objetivo de obtener una granulometría con un bajo contenido de vacíos, y obtener un material estabilizados con asfalto espumado con excelentes propiedades. Es importante obtener una granulometría continua en el tamaño del agregado menor a 2 mm., debido a la dispersión del asfalto espumado y a la facilidad en la compactación, ya que se reducen los vacíos y por lo tanto la susceptibilidad al ingreso de agua. Por lo tanto, cuando sea necesario, debe considerarse la posibilidad de mezclar dos materiales para mejorar una granulometría deficiente.

### 3.6.4. Temperatura del material.

La temperatura del agregado es uno de los factores más importantes en la dispersión adecuada del asfalto espumado en el material reciclado y, por lo tanto, en la resistencia de la nueva capa de pavimento.

A fines de los '90, el profesor Kim Jenkins desarrollo el concepto de "Índice de Espumación" para medir la combinación de la razón de expansión y vida media. Definió el Índice de Espumación como el área bajo la curva obtenida de graficar la vida media versus la razón de expansión, resolviendo que a mejores propiedades de espumado, mejor Índice de Espumación y mejor producto estabilizado. Su investigación comparó el efecto del Índice de Espumación con la temperatura del material al tiempo del mezclado, concluyendo que para obtener una buena mezcla a temperatura más baja son necesarios Índices de Espumación más altos (mayor razón de expansión y vida media).

La calidad de la espuma producida en la unidad de laboratorio es siempre inferior a las que realmente se presentan en terreno por la recicladora, esto se debe a que las presiones de trabajo utilizadas son mayores y, a que la continuidad de operación del tren reciclador permite trabajar a temperaturas más altas.

En pos de la investigación desarrollada por el profesor Jenkins se realizaron numerosas mediciones en la cual se obtuvo la siguiente tabla de recomendaciones. Tabla 11.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



| **Índice de Espumación** | **Razón de Expansión** | **Temperaturas del agregado (°C)** | | |
|---|---|---|---|---|
| | | **< 15 °C** | **15 °C a 25 °C** | **> 25 °C** |
| < 75 | < 8 | Muy mala | Mala | Moderada |
| 75 a 150 | 8 a 12 | Moderada | Buena | Buena |
| > 150 | >12 | buena | Muy buena | Muy buena |

Tabla 11. Recomendación Índice de Espumación y temperatura del material, Manual Wirtgen GmbH.

El trabajo con asfalto espumado no se debiera realizar cuando la temperatura del agregado esté bajo los 10 °C, debido a que las bajas temperaturas del agregado afectan directamente a la vida media del espumado, perjudicando la dispersión en la mezcla, según estudios realizados por el profesor Jenkins.

3.6.5. Contenidos típicos de asfalto espumado relativo a la granulometría.

Para propiedades de ingeniería como rigidez, resistencia, densidad entre otras, que sean aptas y aceptables, se obtienen sólo cuando la aplicación de asfalto espumado es óptima, de acuerdo a un procedimiento de diseño. Los rangos de aplicación de asfalto espumado presentados en la tabla 12. son útiles para definir un contenido asfáltico aproximado. Dependiendo de la aproximación del diseño, un rango de contenido asfáltico bajo el óptimo puede ser suficiente para conseguir las propiedades requeridas. Este rango de aplicación se denomina "contenido mínimo de asfalto".

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



| **Porcentaje que pasa la malla (%)** | | **Porcentaje de asfalto espumado (% en peso sobre el agregado seco)** |
|---|---|---|
| **4.75 mm.** | **0.075 mm.** | |
| < 50 | 3.0 – 5.0 | 2.0 a 2.5 |
| | 5.0 – 7.5 | 2.0 a 3.0 |
| | 7.5 – 10.0 | 2.5 a 3.5 |
| | > 10.0 | 3.0 a 4.0 |
| > 50 | 3.0 – 5.0 | 2.0 a 3.0 |
| | 5.0 – 7.5 | 2.5 a 3.5 |
| | 7.5 – 10.0 | 3.5 a 4.0 |
| | > 10.0 | 3.5 a 4.5 |

Tabla 12. Contenidos típicos de asfalto espumado relativos a la granulometría, Manual Wirtgen GmbH.

.

Los contenidos de asfalto espumado presentados en la tabla son sólo indicadores aproximados. El contenido óptimo de asfalto está definido por muchos otros factores además de la granulometría del agregado.

### 3.6.6. Resistencia.

Para evaluar la resistencia de los materiales estabilizados con asfalto espumado se utiliza la resistencia a la tracción indirecta (Indirect Tensile Strenght, ITS), en vez del ensayo Marshall.

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

$$TSR = \left( \frac{ITS_{saturado}}{ITS_{seco}} \right) * 100 \qquad \text{[Ecuación 1]}$$

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



El valor de ITS saturado se obtiene sumergiendo las probetas curadas en agua durante 24 horas antes de realizar en ensayo.

La tabla posterior señala valores típicos de ITS y TSR para distintos materiales con probetas de 100 mm. tipo Marshall.

| **Tipo de material** | **Probetas 100 mm. Marshall** | |
|---|---|---|
| | **$ITS_{seco}$ (KPa.)** | **TSR (Razón)** |
| RAP/ Piedra chancada (mezcla 50/50) | 250 a 600 | 0.8 a 1.0 |
| Piedra chancada graduada | 200 a 500 | 0.6 a 0.9 |
| Grava natural (IP <10, CBR <30) | 150 a 450 | 0.3 a 0.75 |

Tabla 13. ITS y TSR de materiales estabilizados con asfalto espumado, Manual Wirtgen GmbH.

Investigaciones recientes han introducido la Resistencia a la Compresión no Confinada (Unconfined Compressive Strength, UCS) como un indicador de la capacidad de soporte del material estabilizado (resistencia a la deformación permanente). Este es un valor importante, especialmente cuando se estabiliza material de baja calidad. Se propone un valor mínimo UCS de 700 KPa. para probetas de 150 mm. de diámetro, confeccionadas con un esfuerzo de compactación del 100% del Proctor modificado. (Curada y ensayada en el contenido óptimo de humedad).

### 3.6.7. Rigidez.

La rigidez de un pavimento o de un material estabilizado se mide a través del Módulo Resiliente (MR), el cual puede ser medido en el laboratorio si se somete a un ensayo de carga repetitiva. El ensayo de probetas Marshall de 100 mm. de diámetro (curadas y secas) a tracción indirecta a 10 Hz. y 25 °C, los valores de la tabla de a continuación muestra los rangos de valores generalmente obtenidos.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



| Tipo de material | Módulo Resiliente (MPa.) |
|---|---|
| RAP/Piedra chancada (mezcla 50/50) | 2500 a 4000 |
| Piedra granular chancada | 2000 a 3000 |
| Grava natural (IP <10, CBR <30) | 1500 a 3000 |

Tabla 14. Rangos de MR típicos para material estabilizado con asfalto espumado, Manual Wirtgen GmbH.

Los modelos de diseño de pavimentos propuestos por la "TG2: Guía Técnica: Diseño y uso de materiales tratados con asfalto espumado" (TG2: Interin Technical Guideline: The design and use of foamed bitumen materials), asumen que el material presenta dos fases definidas como:

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

Mediciones realizadas en terreno han demostrado que la rigidez de una capa estabilizada con asfalto efectivamente se reduce durante su vida útil. Después de la construcción, la rigidez aumenta en la medida que el material se "cura", y el contenido de humedad se reduce hasta alcanzar los niveles óptimos. Posteriormente, pareciera existir una fase de "acomodo" acompañada por una pérdida en la rigidez y también por una pequeña deformación permanente, presumiblemente debido a la consolidación del material producto de las cargas de tránsito. Las densidades de construcción van a determinar finalmente la magnitud de la deformación permanente que se producirá mientras la capa se asienta. Los nombres asociados a cada fase respectivamente debieran ser: fase de asentamiento y estado de régimen.

## 3.7. Requerimientos del material estabilizado con asfalto espumado.

Las principales propiedades que debe cumplir una base granular según las especificaciones técnicas del Manual de Carreteras (M.C. – V5), son la granulometría, la capacidad de soporte (CBR), el desgaste de Los Ángeles y propiedades plásticas, entre

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



otras. Las cuales deben hallarse dentro de un rango que asegura la calidad, comportamiento y resistencia de la base.

### 3.7.1. Granulometría.

Como se señalo anteriormente el material para base debe cumplir con lo establecido en el Manual de Carreteras, en el cual se señala lo siguiente: "Los materiales para bases granulares deberán ajustarse a los requisitos pertinentes de calidad y graduación, según lo establecido en la Especificación LNV 102 para bases estabilizadas", pero como se planteo precedentemente, el material tratado con asfalto espumado posee una banda granulométrica distinta a las que comúnmente se utilizan. A continuación se procede a ilustrar la banda granulométrica sugerida para un tratamiento con asfalto espumado y a continuación la tabla de datos, cabe señalar que se utilizará la zona A de las bandas granulométricas de Akeroyd & Hicks. (Figura 33 del punto 3.6.3.)

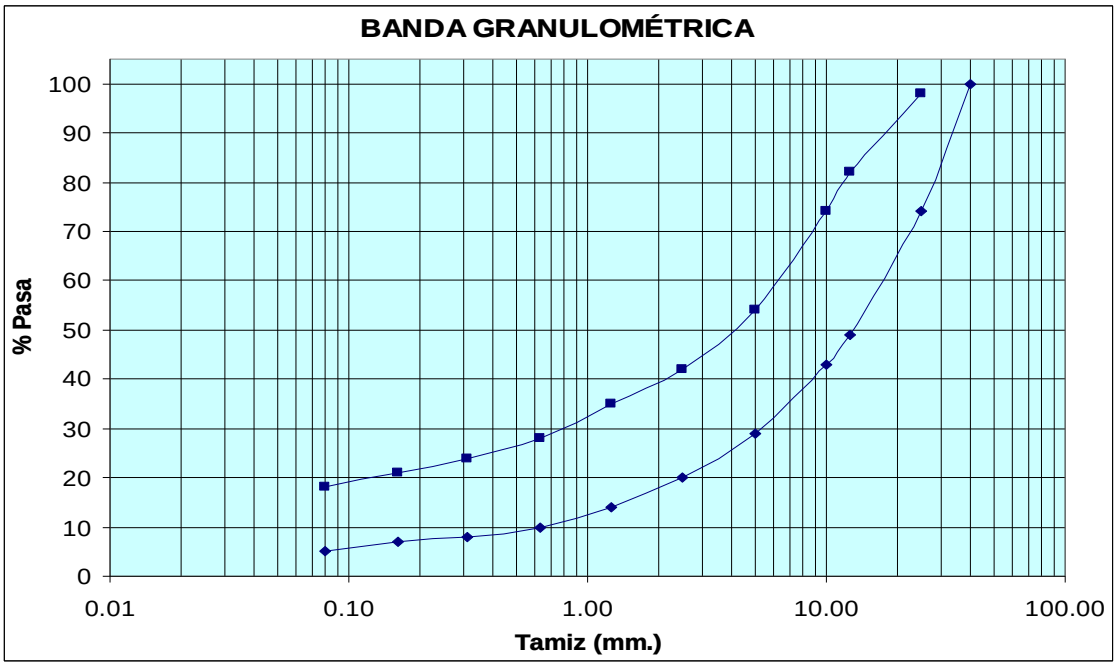



Fig. 34. Banda granulométrica para asfalto espumado (Fuente, MC Vol. 5).

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



| TAMIZ | | BANDA GRANULOMÉTRICA |
|---|---|---|
| **mm.** | **ASTM** | **(% Pasa)** |
| 40 | 1 1/2" | 100 |
| 25 | 1" | 74 – 98 |
| 12.5 | 1/2" | 49 – 82 |
| 10 | 3/8" | 43 – 74 |
| 5 | Nº 4 | 29 – 54 |
| 2.5 | Nº 8 | 20 – 42 |
| 1.25 | Nº 16 | 14 – 35 |
| 0.63 | Nº 30 | 10 – 28 |
| 0.315 | Nº 50 | 8 – 24 |
| 0.16 | Nº 100 | 7 – 21 |
| 0.08 | Nº 200 | 5 – 18 |

Tabla 15. Banda granulométrica para asfalto espumado (Fuente MC Vol. 5).

3.7.2. Capacidad de soporte y desgaste.

Los requisitos de razón de soporte de California (CBR) y la cantidad de material chancado, para una base granular de graduación cerrada, posee ciertas variaciones dependiendo de la capa de rodadura que ha de ir sobre ella. La presente tabla muestra los requisitos señalados anteriormente para la base granular (tabla 5.302.201.A del Manual de Carreteras).

| Descripción | Concreto asfáltico | Tratamiento superficial | Tratamiento superficial tamaño único | Ensaye |
|---|---|---|---|---|
| Capacidad de Soporte (CBR) al 95% de la D.M.C.S., según el Método LNV 95. | Mín. 80% | Mín. 100% | Mín. 120% | LNV 92 |
| Material Chancado | Mín. 50% | Mín. 70% | Mín. 90% | LNV 3 |

Tabla 16. Requisitos para bases granulares según tipo de carpeta de rodadura, M.C. Vol. 5.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



En cuanto a la resistencia al desgaste, la fracción gruesa deberá tener una resistencia medida por el ensaye de Los Ángeles, de no más de 30%.

Con respecto a la plasticidad del material este debe cumplir con las siguientes condiciones, "la fracción del material que pasa la malla Nº 40 deberá tener un límite liquido inferior a 25% y un índice de plasticidad inferior a 6", estos según las especificaciones técnicas sobre bases granulares estabilizadas.

A continuación una tabla resumen con las propiedades que debe satisfacer un material para ser considerado para base granular.

| Propiedad | Requerimientos |
|---|---|
| Capacidad de soporte: | |
| CBR 95% de la DMCS, a 5.08 mm. de penetración (%) | Mín. 120 |
| Desgaste de Los Angeles (%) | Máx. 30 |
| Material Chancado (%) | Mín. 90 |
| Límite Líquido (LL) | < 25% |
| Índice de Plasticidad (IP) | < 6 |

Tabla 17. Resumen de requerimientos.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



# CAPÍTULO 4: ENSAYOS, DISEÑO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

El presente capítulo tiene como finalidad principal describir y analizar la metodología utilizada en el laboratorio para cumplir los objetivos planteados inicialmente, además, obtener las propiedades de la escoria de Vanadio como base y sus propiedades finales como base tratada con asfalto espumado.

Al finalizar el presente capítulo se muestra el óptimo de asfalto espumado para obtener una base tratada con propiedades de ingeniería aceptables para el transito.

## 4.1. Propiedades de la base de escoria de Vanadio.

En seguida se muestra las propiedades mecánicas que posee la escoria de Vanadio, las cuales la hacen sugerible como base granular de alta calidad y realizar la experiencia de ser tratada con asfalto espumado.

La escoria de Vanadio o escoria de acería es un subproducto de la fabricación del acero, para la presente tesis el material proviene de la siderúrgica Huachipato, este subproducto está compuesto mayoritariamente por óxidos de Hierro, Silicio, Magnesio y Calcio, además de carbonatos de Calcio ($CaCO_3$) y Magnesio, donde el primero, junto al óxido de Calcio son los principales causantes de cambios volumétricos de expansión en escorias jóvenes. Sin embargo, cabe señalar que el material ha utilizar para este estudio son escorias estabilizadas, expuestas a oxidación y lixiviación mediante la exposición de acopios al intemperismo, principalmente lluvias invernales, por periodos mayores a dos años, disminuyendo así efectos perjudiciales en una carpeta granular de pavimento.

### 4.1.1. Granulometría de la escoria de Vanadio.

A continuación se exponen los resultados del análisis granulométrico realizado según la normativa vigente y el procedimiento descrito en el anexo A, los cuales han sido recopilados del Manual de Carreteras Vol. 8. La granulometría es un método que permite, mediante tamizado, determinar la distribución por tamaños de las partículas mayores a 0.08 mm. de un agregado pétreo.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



Los resultados mostrados en la tabla siguiente caracterizan el tamaño de la escoria de Vanadio con un tamaño máximo de 2".Las características plásticas de la escoria son nulas, las cuales se clasifican como NP.

| **TAMIZ** | | **GRANULOMETRÍA** |
|---|---|---|
| **mm.** | **ASTM** | **(% Pasa)** |
| 50 | 2" | 100 |
| 40 | 1 1/2" | 96 |
| 25 | 1" | 83 |
| 20 | 3/4" | 72 |
| 10 | 3/8" | 46 |
| 5 | Nº 4 | 29 |
| 2 | Nº 10 | 18 |
| 0.5 | Nº 40 | 10 |
| 0.08 | Nº 200 | 5 |
| Límite Líquido (%) | | -- |
| Límite Plástico (%) | | -- |
| Índice de Plasticidad (IP) | | NP |
| Clasificación AASHTO | | A – 1 – a |
| Clasificación USCS | | GP – GM |

Tabla 18. Granulometría de la escoria de Vanadio.

Para una mejor apreciación de los datos señalados anteriormente se expondrán en un gráfico, ver figura 35.

En la siguiente figura, se puede apreciar si la granulometría de la escoria de Vanadio cumple con los requisitos según la banda recomendada para asfalto espumado, la banda para asfalto espumado según el Manual de Carreteras Vol. 5.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



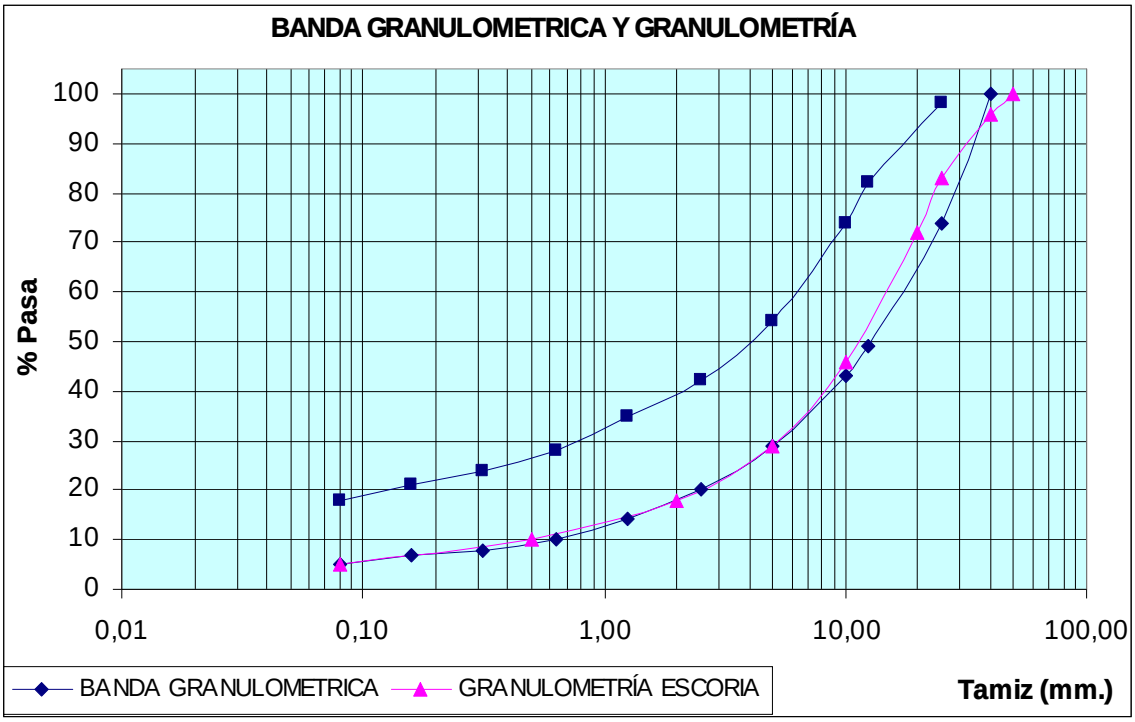



Fig. 35. Banda granulométrica y granulometría de escoria.

Como se observa en la figura anterior la granulometría de la escoria cumple en la mayor parte de la banda, escapando unos valores al finalizar esta, como se observa también el tamaño máximo de la banda es distinto al de la escoria. Que la escoria no este cien por ciento dentro de la banda no es una complicación para realizar la experiencia. Sin embargo, la granulometría de la escoria de Vanadio es pobre en finos, y está muy ajustada al límite inferior de la banda, se puede realizar la conjetura de que el asfalto no podrá dispersarse óptimamente para formar el mortero asfáltico, esto puede provocar probetas de baja calidad. Han de realizarse pruebas con adiciones de filler (cemento) y polvo de roca para mejorar la granulometría y lograr una mejor dispersión de asfalto en la fracción fina.

### 4.1.2. Análisis Proctor modificado de la escoria de Vanadio.

El ensaye de Proctor es utilizado para obtener la relación entre la humedad y la densidad de un suelo, lográndose así el valor de la cantidad de agua a agregar en la compactación de las capas del pavimento, pero en el caso del diseño en laboratorio, el valor

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



obtenido del Proctor es el agua de mezclado de las probetas para realizar el futuro diseño con asfalto espumado, este dato es de mucha importancia debido a que si se empleará un valor erróneo perjudicaría notoriamente la calidad resistente de las probetas, además de no poder obtenerse un dato verdadero de diseño de acuerdo al tipo de material y sus condiciones en terreno.

A continuación se muestra el gráfico de donde se obtuvo el valor de la humedad óptima de compactación para la escoria de Vanadio.

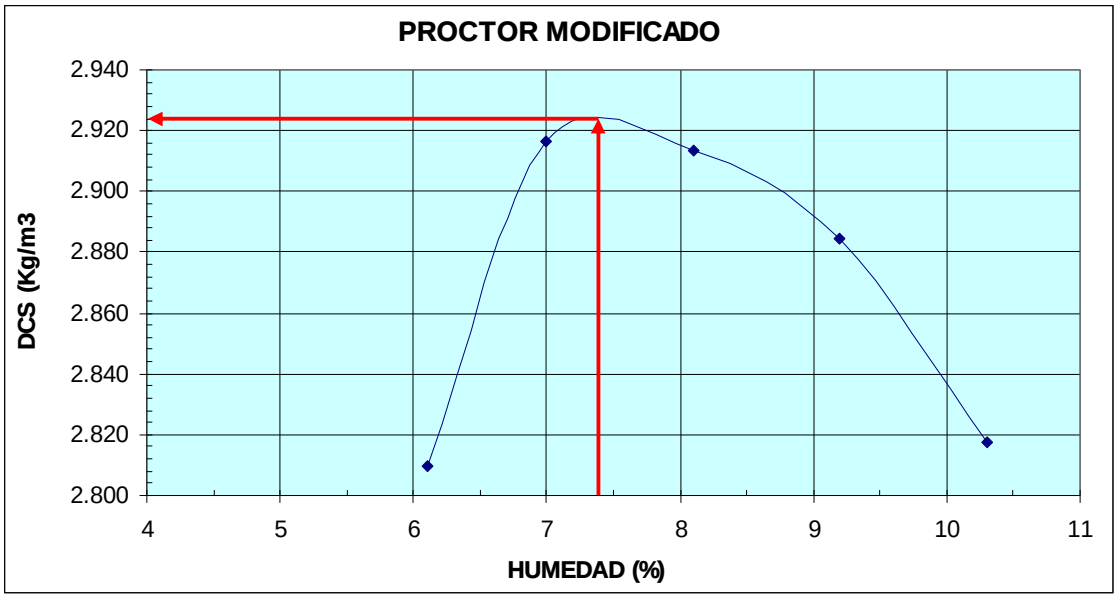



Fig. 36. Gráfico Proctor modificado de la escoria de Vanadio.

A partir de la curva del ensayo Proctor modificado se obtiene el valor de la densidad compactada seca, al buscar este valor con la humedad óptima de la escoria de Vanadio.

En base a lo mostrado en el gráfico anterior se puede obtener los siguientes resultados que caracterizan la escoria de Vanadio, en la tabla que continúa.

| | | |
|---|---|---|
| D.M.C.S | 2.922 | (Kg./m$^3$) |
| 95% D.M.C.S. | 2.776 | (Kg./m$^3$) |
| % Wo | 7.4 | % |

Tabla 19. Humedad óptima y densidad máxima de compactación.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



4.1.3. Capacidad de soporte de la Escoria de Vanadio (CBR).

Ya obtenido el valor de humedad óptima se compactan tres moldes con distintas energías, para así conseguir mediante el ensayo de CBR (California Bearing Ratio), que cuantifica la resistencia al corte del suelo, la capacidad de soporte del suelo. La medida obtenida es relativa ya que se refiere a un patrón.

A continuación los resultados de los ensayes de CBR para la escoria de Vanadio, en el primer gráfico se obtiene la capacidad del material en MPa. según la penetración del pistón.

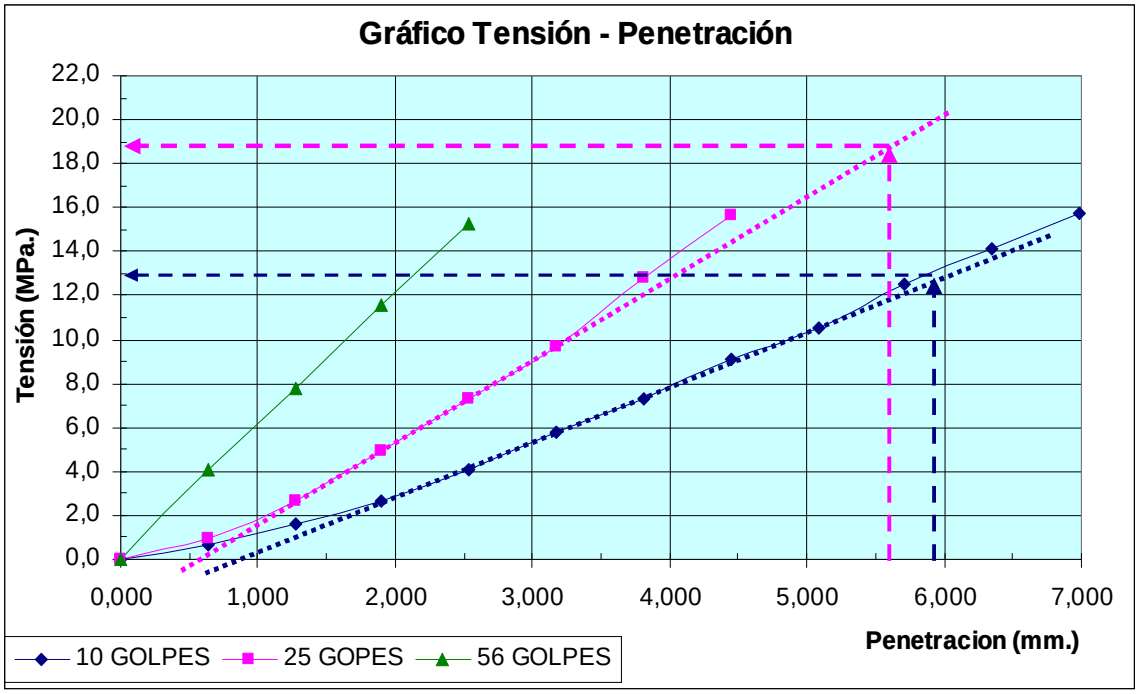



Fig. 37. Gráfico Tensión – Penetración.

En el gráfico anterior se puede observar unas rectas punteadas, las cuales son correcciones de cada curva, desplazando el origen para cada curva, de donde se obtienen los puntos necesarios para realizar el siguiente gráfico y así obtener el valor de CBR.

Según la metodología para el ensaye de suelos clasificados como A-1 sólo se mide la tensión para 5.08 mm.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



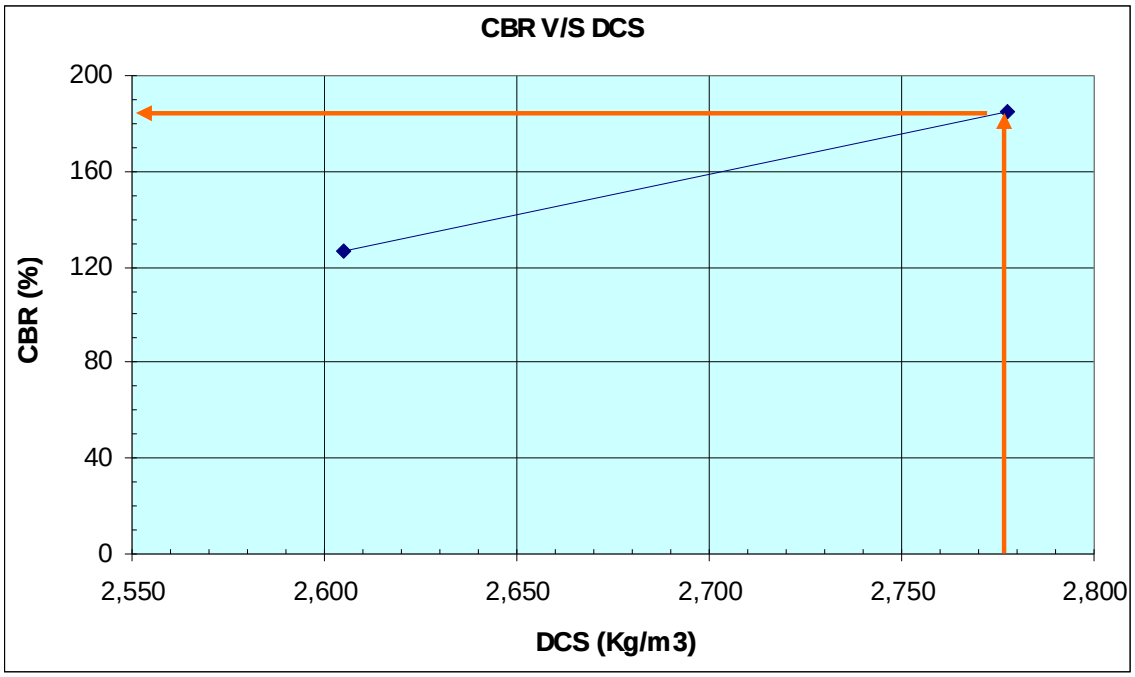



Fig. 38. Gráfico CBR – DCS.

Del gráfico anterior se obtiene el valor de CBR correspondiente al 95% de la D.M.C.S. que es el que se controlará en terreno. La tabla que continúa mostrará los resultados de los ensayes.

| | | |
|---|---|---|
| D.M.C.S | 2.922 | (Kg./m3) |
| 95% D.M.C.S. | 2.776 | (Kg./m3) |
| CBR PARA 95% D.M.C.S. | 184 | % CBR |

Tabla 20. Resumen de CBR.

4.1.4. Desgaste de Los Angeles de la escoria de Vanadio.

En el ensaye de desgaste mediante la maquina de Los Angeles se pretende determinar la resistencia del agregado grueso mediante abrasión por medios mecánicos. La resistencia del material se expresa como la pérdida de material o desgaste, como el porcentaje de pérdida de masa de la muestra con respecto a su masa inicial.

A continuación se muestra la tabla resumen del ensayo de desgaste de Los Angeles para el material escoria de Vanadio.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



| | | |
|---|---|---|
| GRADO DE ENSAYE | 4 | |
| MASA INICIAL (M.i.) | 5001 | (gr.) |
| MASA FINAL (M.i.) | 4201 | (gr.) |
| DESGASTE (P) | 16 | (%) |

Tabla 21. Desgaste de Los Angeles de la escoria de Vanadio.

Finalmente, se contrastan los requerimientos para una base con carpeta de rodadura de tratamiento superficial tamaño único, por ser las más exigentes en cuanto a propiedades mecánicas del material, versus las propiedades que posee la escoria de Vanadio.

A continuación se revela la tabla resumen de los requerimientos y propiedades de la escoria de Vanadio.

| Propiedad | Análisis | Requerimientos |
|---|---|---|
| Análisis Proctor Modificado:<br>Humedad Óptima (%) | 7.4 | -- |
| D.M.C.S. ($Kg/m^3$) | 2.922 | -- |
| Análisis de California:<br>CBR 95% de la DMCS, a 5.08 mm. de penetración (%) | 184 | Mín. 120 |
| Desgaste de Los Angeles (%) | 16 | Máx. 30 |
| Material Chancado (%) | 100 | Mín. 90 |
| Límite Líquido (LL) | -- | < 25% |
| Índice de Plasticidad (IP) | NP | < 6 |

Tabla 22. Requerimientos versus propiedades de la escoria de Vanadio.

De la tabla resumen anterior se puede ver que los valores de las propiedades de la escoria de Vanadio superan ampliamente los requerimientos para una base exigente, como lo es una base bajo una carpeta de rodadura de tratamiento superficial tamaño único.

## 4.2. Diseño de la espuma óptima.

En esta etapa son determinadas la temperatura del asfalto y la cantidad de agua de inyección que optimizan la Razón de Expansión y la Vida Media.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



Para la obtención de valores correctos de cantidad de asfalto y agua inyectada se debe calibrar el equipo según las especificaciones del equipo de laboratorio de espumado, después de obtenidos los parámetros del equipo se procede a poner en marcha el equipo de espumado (Anexo C), y lograr los flujos correctos de agua inyectada para cada variación de porcentaje aplicada a un flujo constante de asfalto.

A continuación se muestra el proceso teórico de la calibración del agua inyectada, según la tabla del Anexo C.

| **Flujos de agua estandarizados relativos al flujo de asfalto y porcentaje de agua inyectada.** | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Flujo asfalto (g/s) | % Agua inyectada | | | | | | | | |
| | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 2.5 | 3.0 | 3.5 | 4.0 | 4.5 | 5.0 |
| 100 | 3.6 | 5.4 | 7.2 | 9.0 | 10.8 | 12.6 | 14.4 | 16.2 | 18.0 |
| 105 | 3.8 | 5.7 | 7.6 | 9.5 | 11.3 | 13.2 | 15.1 | 17.0 | 18.9 |
| 110 | 3.4 | 5.9 | 7.9 | 9.9 | 11.9 | 13.9 | 15.8 | 17.8 | 19.8 |

Tabla 23. Flujo de agua inyectada (l/h).

La tabla anteriormente expuesta muestra los valores recomendados por el fabricante para cada flujo de asfalto, según la calibración del equipo, el flujo de asfalto es de 105.2 (g/s), por lo cual se interpolan los valores y así lograr los flujos de agua inyectada correspondientes a cada porcentaje de agua, que son los que se ven en la siguiente tabla.

| **Flujo calibrado de agua para un determinado flujo de asfalto.** | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Flujo asfalto (g/s) | % Agua inyectada | | | |
| | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 4.0 |
| 105.2 | 3.79 | 7.57 | 11.36 | 15.14 |

Tabla 24. Flujo de agua inyectada (l/h). Equipo calibrado.

Ya calibrado el equipo y sus flujos se procede a realizar el diseño óptimo de espuma de asfalto. En seguida se exponen los resultados del diseño óptimo, cabe señalar que la búsqueda de los valores de espuma óptima se hizo con un solo valor de temperatura de asfalto, ya que la experiencia con el tipo de asfalto utilizado permitió ahorro de tiempo y asfalto.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



A continuación los resultados del ensayo para la obtención de la espuma óptima en la siguiente tabla.

| **Información y propiedades de la espuma óptima.** | | | |
|---|---|---|---|
| Grado de viscosidad del cemento asfáltico | CA - 14 | | |
| Proveedor de asfalto | CLASA | | |
| Flujo fijo de asfalto (g/s) | 105.2 | | |
| Temperatura del asfalto ( °C) | 180 | | |
| % Agua | Flujo Agua (l/h) | Razón de Expansión | Vida Media (s) |
| 1 | 3.79 | 5 | 15 |
| 2 | 7.57 | 16 | 7 |
| 3 | 11.36 | 15 | 7 |
| 4 | 15.14 | 14 | 8 |

Tabla 25. Espuma óptima.

Al graficar los resultados obtenidos se puede apreciar cual es el valor óptimo de agua inyectada que maximiza la razón de expansión y la vida media. Cabe recordar que se favorece la vida media en desmedro de la razón de expansión. Fig. 39.

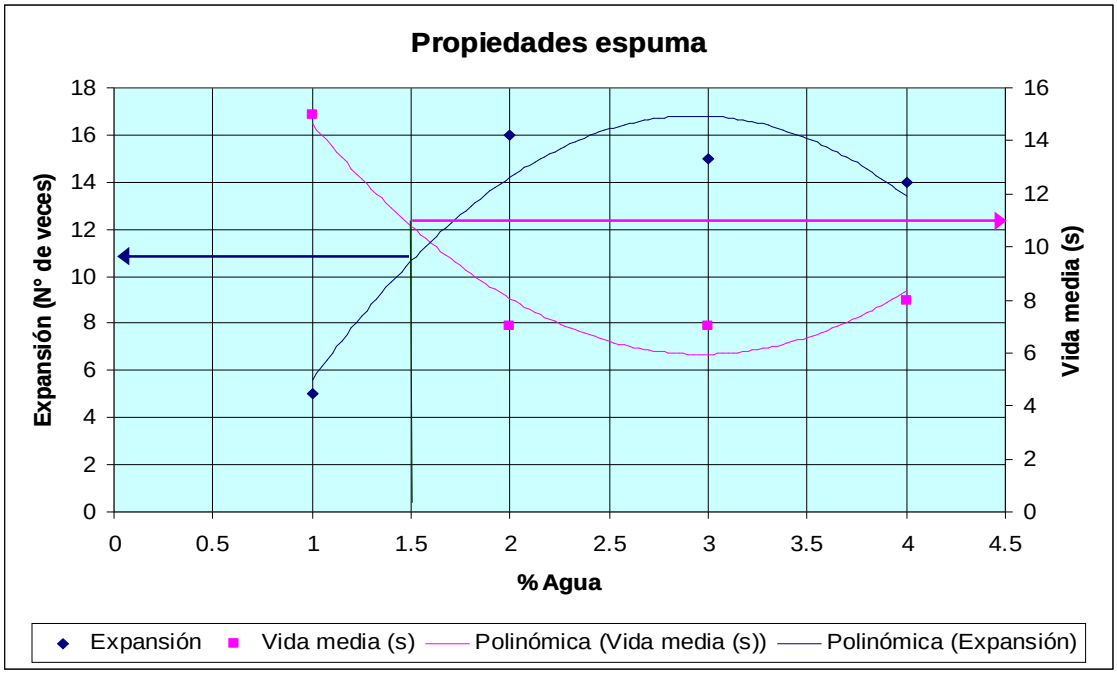



Fig. 39. Propiedades de la espuma.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



A continuación se esboza el método para lograr alcanzar los parámetros de la espuma óptima:

- Se busca la intersección de las curvas, razón de expansión y vida media en un gráfico de 2 ejes de ordenadas.
- A continuación se elige aumentar levemente el valor óptimo de la vida media, a partir del punto de intersección, aún en desmedro de la razón de expansión.
- Desde ese punto elegido se leerán los valores óptimos de la espuma de asfalto, % de agua, razón de expansión y vida media.

A continuación la tabla 26 resume los parámetros para el asfalto que logra la espuma óptima.

| **Parámetros espuma óptima de asfalto.** | |
|---|---|
| Grado de viscosidad del cemento asfáltico | CA - 14 |
| Proveedor de asfalto | CLASA |
| Temperatura del asfalto ( °C) | 180 |
| Flujo fijo de asfalto (gr./s) | 105.2 |
| % óptimo de agua para espuma | 1.5 |
| Flujo de agua óptimo (l/h) | 5.68 |

Tabla 26. Resumen diseño espuma de asfalto.

También es un gráfico importante el que muestra el índice de espumación en el cual se ve la calidad de la espuma, la cual se compara con datos obtenidos de muchos ensayos con espuma de asfalto. Ver figura 40.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



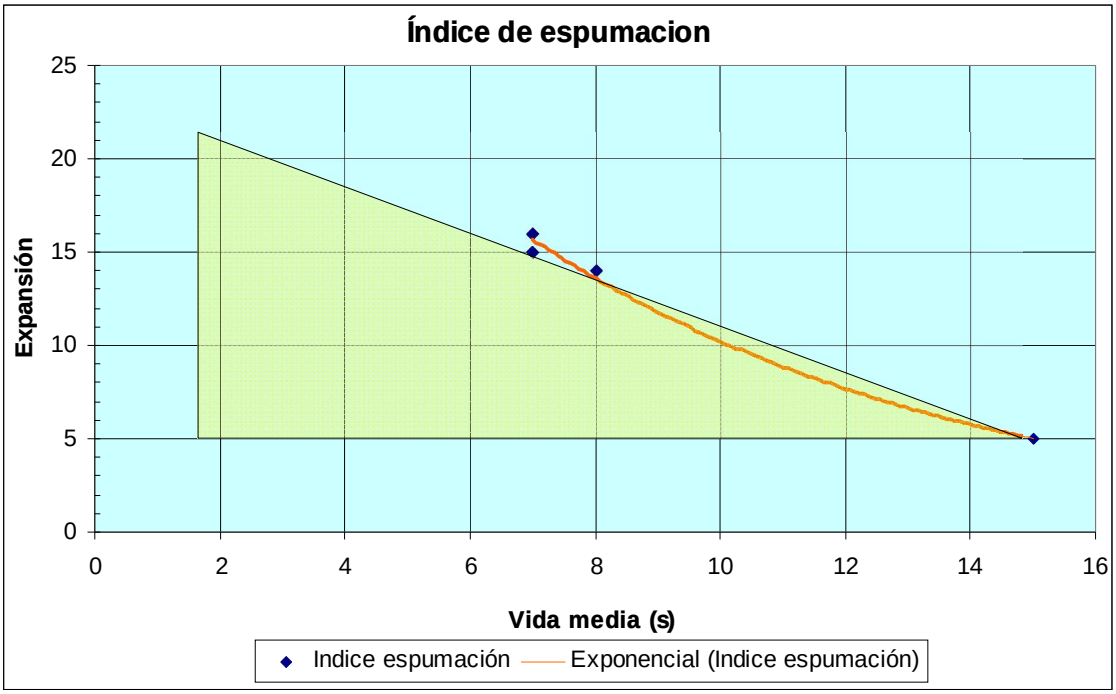



Fig. 40. Índice de espumación.

El área coloreada bajo la curva es una aproximación perteneciente al índice de espumación el cual se define como el área bajo la curva, razón de expansión – vida media. Las sugerencias sobre como determinar el índice de espumación dice que el mínimo valor para la razón de expansión es de cuatro y por lo visto en el gráfico anterior este cumple con dicha sugerencia, por lo tanto se procede a aplicar la fórmula desarrollada por el profesor Kim Jenkins.

$$FI = \frac{-\tau_{1/2}}{Ln(2)} * \left(4 - ER_m - 4 * Ln\left(\frac{4}{ER_m}\right)\right) + \left(\frac{1+c}{c}\right) * ER_m * t_s \qquad \text{[Ecuación 2]}$$

$$FI = 104$$

Donde:

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

$ER_m$ = Razón de expansión medida.

$c$ = Razón entre razón de expansión medida y calculada.

$t_s$ = Tiempo de spray.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



Como muestra el cálculo anterior del índice de espumación el valor de 104 está en el rango de 75 a 150, esto quiere decir que la calidad de la espuma es de moderada a buena y la dispersión de la espuma en el agregado ha de moverse entre los rangos de moderada a buena, dependiendo la temperatura de este.

A continuación una tabla resumen de las propiedades de la espuma con asfalto CA – 14 y los requerimientos para asfalto espumado del Manual de Carreteras, además del valor de índice de espumación señalado en la tabla 11 del punto 3.6.4.

| **Requerimientos y resultados espuma de asfalto CA – 14.** | | | |
|---|---|---|---|
| Propiedades | Resultados | Requerimientos | Fuente |
| Vida Media (s) | 11 | >10 | M.C. Vol. 5 |
| Razón de Expansión | 11 | >10 | M.C. Vol. 5 |
| Índice de Espumación | 104 | 75< X <150 | Wirtgen GmbH |

Tabla 27. Propiedades de la espuma de asfalto CA – 14.

Según las recomendaciones dadas para asfalto espumado del Manual de Carreteras, la espumada realizada con cemento asfáltico CA-14, satisface los requerimientos mínimos de diseño, además según su índice de expansión es una espuma de calidad moderadamente buena, sin embargo, este índice no esta dentro de los requerimientos de diseño de asfalto espumado del Manual de Carreteras, pero ha de tomarse en cuenta como recomendación de diseño.

## 4.3. Prediseños con cantidad fija de asfalto y variación de la granulometría.

En el presente punto se muestra el prediseño más adecuado para la escoria con asfalto espumado, con la finalidad de encontrar cual será la mezcla de un comportamiento sobresaliente ya sea, escoria pura (sin adición de otro material) o escoria con adición, esta sea; filler (cemento) o material fino (polvo de roca) la que se comporte mejor al ser ensayada según el procedimiento de diseño de asfalto espumado descrito en el anexo B "Procedimiento de diseño para probetas de asfalto espumado".

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



Como se dijo anteriormente, en el párrafo superior, se procedió a probar tres tipos de mezclas pétreas, en lotes de 10 Kg cada una; 100% Escoria de Vanadio, Escoria de Vanadio con un porcentaje de polvo de roca y finalmente Escoria de Vanadio con un porcentaje de cemento. Donde con información obtenida de la bibliografía, se fijó un determinado porcentaje de asfalto, muy cercano al supuesto óptimo, para crear estas probetas y ver cual mezcla pétrea proporciona un mayor ITS y por ende ha de ser la mejor estructuralmente.

De la tabla 12 (Contenidos típicos de asfalto espumado relativos a la granulometría) del capitulo tres (punto 3.6.5) se obtiene un valor aproximado de porcentaje de asfalto según la granulometría del agregado pétreo. Donde se ha elegido el valor de 2.5% de asfalto para realizar las probetas, donde se ha de elegir la mezcla que proporcione un mayor ITS y que cumpla con la sugerencia de diseño propuesta en el Manual de Carreteras Vol 5. Dicha sugerencia esta mostrada en la tabla 13 (ITS y TSR de materiales estabilizados con asfalto espumado), en donde, por la apariencia física de la Escoria de Vanadio, la clasificaría como piedra chancada graduada y debe cumplir con un ITS seco mínimo de 200 KPa.

En seguida han de mostrarse las propiedades de cada mezcla de agregado pétreo con asfalto espumado en probetas de 100 mm. tipo Marshall. En la tabla siguiente se mostrará la granulometría de cada una de las mezclas.

| **Granulometría mezclas de Esc. de Vanadio.** | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Esc. de Vanadio con Polvo de Roca (80/20) | 100% Esc. de Vanadio | Esc. de Vanadio con Cemento (99/1) |
| TAMIZ ASTM | ABERTURA mm. | PASA % | PASA % | PASA % |
| 1" | 25 | 100 | 100 | 100 |
| 3/4" | 20 | 95 | 82 | 84 |
| 1/2" | 12,5 | 82 | 62 | 68 |
| 3/8" | 10 | 74 | 49 | 57 |
| **Nº 4** | **5** | **57** | **36** | **45** |
| N° 8 | 2,5 | 40 | 24 | 33 |
| N° 16 | 1,25 | 29 | 18 | 24 |
| Nº 30 | 0,63 | 22 | 13 | 19 |
| Nº 50 | 0,315 | 16 | 10 | 14 |
| Nº 100 | 0,16 | 11 | 7 | 9 |
| **Nº 200** | **0,08** | **7** | **5** | **6** |

Tabla 28. Granulometría de las mezclas de Esc. de Vanadio con las distintas adiciones.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



De la tabla anterior se obtuvo los valores necesarios para realizar el supuesto del prediseño de 2.5 % de asfalto según la granulometría, viendo los porcentajes que pasan en los tamices destacados y asociándolos a la tabla 12.

En seguida se detalla como, después de la calibración del equipo y de la obtención de los parámetros de espuma óptima, se calcula el tiempo que se ingresa en el relé del laboratorio móvil de espumado WLB 10, asociado al porcentaje de asfalto a ocupar en cada rocío de spray de asfalto espumado en este caso 2.5%.

$$T_{Asfalto} = \frac{\frac{P_{Asf}}{100} * \left( (M_{Seco}) * \left( 1 + \frac{F_{perdida}}{100} \right) \right)}{Cte.} \qquad \text{[Ecuación 3]}$$

$$T_{Asfalto} = \frac{\frac{2.5}{100} * \left( (9891) * \left( 1 + \frac{10}{100} \right) \right)}{105.2}$$

$$T_{Asfalto} = 2.59[seg]$$

Donde:

$T_{asfalto}$ = Tiempo asociado a una determinada cantidad de asfalto (seg.).

$P_{Asf}$ = Cantidad de asfalto a rociar en la mezcla (%).

$M_{Seco}$ = Masa seca del material (gr.).

$F_{perdida}$ = Valor asociado a la perdida en recipiente y mezclador (%).

*Cte.* = Constante asociada al flujo másico de calibración del equipo (gr/s).

A continuación se mostrará como calcular el contenido de agua de mezclado a agregar a cada mezcla, esta agua de mezclado está asociada a la humedad óptima y natural obtenida del ensaye Proctor. De modo de ejemplo se hará el cálculo del agua de mezclado para la Escoria de Vanadio 100%.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



$$M_{Seca} = \frac{M_{Nat}}{\left(1 + \frac{H_{Nat}}{100}\right)}$$ [Ecuación 4]

$$M_{Seca} = \frac{10000}{\left(1 + \frac{1.1}{100}\right)}$$

$$M_{Seca} = 9891[gr]$$

Donde:

$M_{Seca}$ = Masa seca del material (gr).

$M_{Nat}$ = Masa seca al aire con humedad natural (gr).

$H_{Nat}$ = Humedad natural del material obtenido del ensaye Proctor (%).

Ya obtenido el valor asociado a la cantidad de material seco se procede a calcular la cantidad de agua a agregar.

$$M_{agua} = 0.75 * \left(\frac{H_{Proctor} - H_{Nat}}{100}\right) * (M_{Seca})$$ [Ecuación 5]

$$M_{agua} = 0.75 * \left(\frac{7.4 - 1.1}{100}\right) * (9891)$$

$$M_{agua} = 463[gr]$$

Donde:

$M_{agua}$ = Masa de agua a agregar (gr).

$H_{Proctor}$ = Humedad óptima del Proctor (%).

$H_{Nat}$ = Humedad natural del material obtenido del ensaye Proctor (%).

$M_{Seca}$ = Masa seca del material (gr).

Finalmente se muetra un cuadro resumen de datos significativos a utilizar para el prediseño.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



| **Información para fabricación de probetas.** | | | |
|---|---|---|---|
| | Esc. de Vanadio con Polvo de Roca (80/20) | 100% Esc. de Vanadio | Esc. de Vanadio con Cemento (99/1) |
| Flujo másico fijo de asfalto (g/s) | 105.2 | 105.2 | 105.2 |
| Agua inyectada (l/h) | 5.68 | 5.68 | 5.68 |
| Asfalto (%) | 2.5 | 2.5 | 2.5 |
| Tiempo del relé (seg) | 2.59 | 2.59 | 2.59 |
| Masa de agua a agregar (gr) | 424 | 463 | 462 |

Tabla 29. Cuadro resumen de cada mezcla para elaboración de probetas.

El cuadro anterior muestra los valores de entrada hacia el laboratorio móvil modelo WLB 10, que serían los cuatro primeros, el último dato es agregado directamente a la mezcla manualmente.

Ahora se analizan los resultados obtenidos y se decidirá cual mezcla brinda una mayor resistencia mediante el ensayo de tracción indirecta (ITS).

En la figura que continúa se aprecia como varía la densidad de las probetas Marshall dependiendo de los diferentes tipos y cantidades de adición.

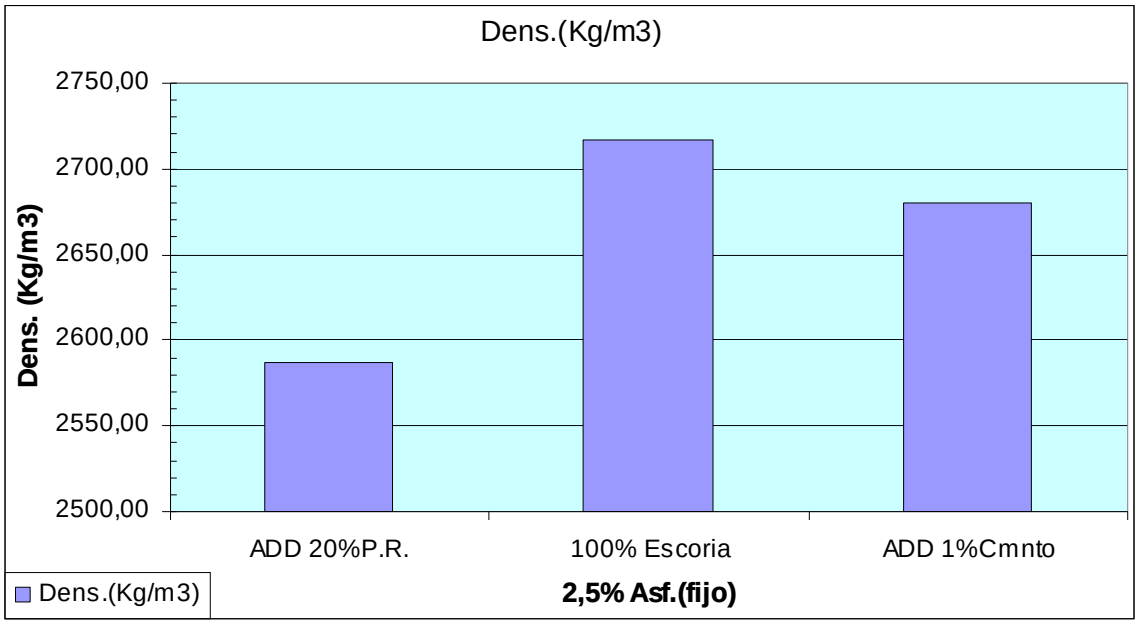



Fig. 41. Densidad de las distintas mezclas con Escoria de Vanadio.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



Como se puede apreciar del gráfico anterior, al mantener el valor fijo de asfalto, la variación de las densidades es sólo función de la cantidad de Escoria de Vanadio presente en la mezcla. Lógicamente las probetas que son íntegramente de Escoria de Vanadio poseen la mayor densidad, seguida de las probetas con un 1% de cemento y finalmente las probetas que contienen en su estructura sólo un 80% de Escoria de Vanadio y el otro 20% es polvo de roca con una densidad menor a las partículas finas de la escoria.

A continuación en la figura, se ve los resultados de los ensayos de tracción indirecta (ITS), y estos resultados orientarán los siguientes pasos a seguir para la encontrar el diseño óptimo para la Escoria con asfalto espumado.

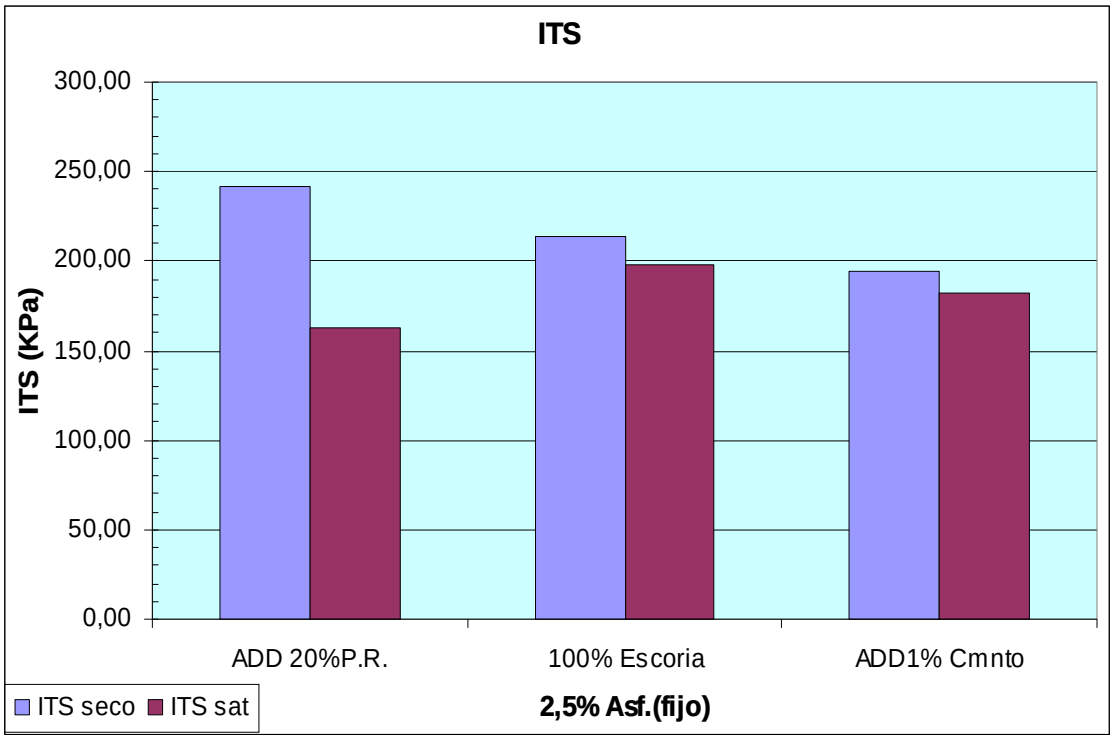



Fig. 42. Ensaye ITS de las distintas mezclas con Escoria de Vanadio.

Del análisis del gráfico anterior, se pueden hacer las siguientes observaciones con relación a las mezclas de Escoria de Vanadio y adición: La mezcla de Escoria de Vanadio con adición de cemento es la que posee los valores de ITS menores, esto es debido a que el cemento aplicado en las probetas de asfalto espumado es para tratar el problema de plasticidad en los materiales reciclados, por lo cual en este caso sólo provoca que la probeta

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



sea más frágil en condiciones secas, pero conservando un buen comportamiento al ensayarse saturadas. Las probetas de 100% Escoria de Vanadio poseen un comportamiento aceptable bajo los requerimientos mínimos exigidos en el ensaye de ITS seco (200 Kpa, tabla 13 punto 3.6.6.), además de poseer una buena respuesta bajo condiciones saturadas superficialmente secas, con un TSR alrededor del 90%, este comportamiento es influenciado por las propiedades levemente cementantes que posee la Escoria de Vanadio. Finalmente se observa que el valor Peak de ITS seco es logrado por la mezcla de Escoria de Vanadio y polvo de roca en proporciones de 80 – 20 respectivamente, pero también se visualiza que es la mezcla que posee el menor TSR, el cual está sobre el 60%, lo cual no logra descartarlo de la selección para realizar el diseño con asfalto espumado.

### 4.3.1. Prediseño con cantidad fija de asfalto y variación del porcentaje de la adición de polvo de roca.

Ahora que se ha elegido realizar el diseño con Escoria de Vanadio y polvo de roca, el siguiente paso es encontrar la cantidad más adecuada de polvo de roca para lograr la mayor resistencia. Ya se probó con una adición de 20% de polvo de roca. En las experiencias siguientes se hacen pruebas con adición de cantidades de 15% y 25% de polvo de roca mezcladas con Escoria de Vanadio, en las experiencias que continúan se conserva los parámetros relacionados a la cantidad de asfalto (2.5% CA), sólo cambian los parámetros relacionados con la cantidad de agua a adicionar a las mezclas por su variación en el porcentaje de polvo de roca.

A continuación en la tabla la granulometría correspondiente a las mezclas de Escoria de Vanadio y polvo de roca.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



| **Granulometría mezclas de Esc. de Vanadio.** | | | |
|---|---|---|---|
| | | Esc. de Vanadio con Polvo de Roca (85/15) | Esc. de Vanadio con Polvo de Roca (75/25) |
| TAMIZ ASTM | ABERTURA mm. | PASA % | PASA % |
| 1" | 25 | 100 | 100 |
| 3/4" | 20 | 93 | 96 |
| 1/2" | 12,5 | 77 | 83 |
| 3/8" | 10 | 69 | 76 |
| **Nº 4** | **5** | **50** | **59** |
| N° 8 | 2,5 | 35 | 41 |
| N° 16 | 1,25 | 25 | 31 |
| Nº 30 | 0,63 | 20 | 24 |
| Nº 50 | 0,315 | 13 | 18 |
| Nº 100 | 0,16 | 9 | 11 |
| **Nº 200** | **0,08** | **6** | **7** |

Tabla 30. Granulometría Escoria de Vanadio con adición de polvo de roca.

Siguiendo el mismo método descrito en el prediseño anterior se obtiene el siguiente cuadro resumen para las nuevas probetas a crear y ensayar.

| **Información para fabricación de probetas.** | | |
|---|---|---|
| | Esc. de Vanadio con Polvo de Roca (85/15) | Esc. de Vanadio con Polvo de Roca (75/25) |
| Flujo másico fijo de asfalto (gr./s) | 105.2 | 105.2 |
| Flujo de agua inyectada (lt./h) | 5.68 | 5.68 |
| Asfalto (%) | 2.5 | 2.5 |
| Tiempo del relé (seg) | 2.59 | 2.59 |
| Masa de agua a agregar (gr) | 438 | 412 |

Tabla 31. Cuadro resumen mezclas Escoria de Vanadio y polvo de roca.

En el gráfico que continúa se puede ver como varía la densidad mediante la adición de polvo de roca a la Escoria de Vanadio.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



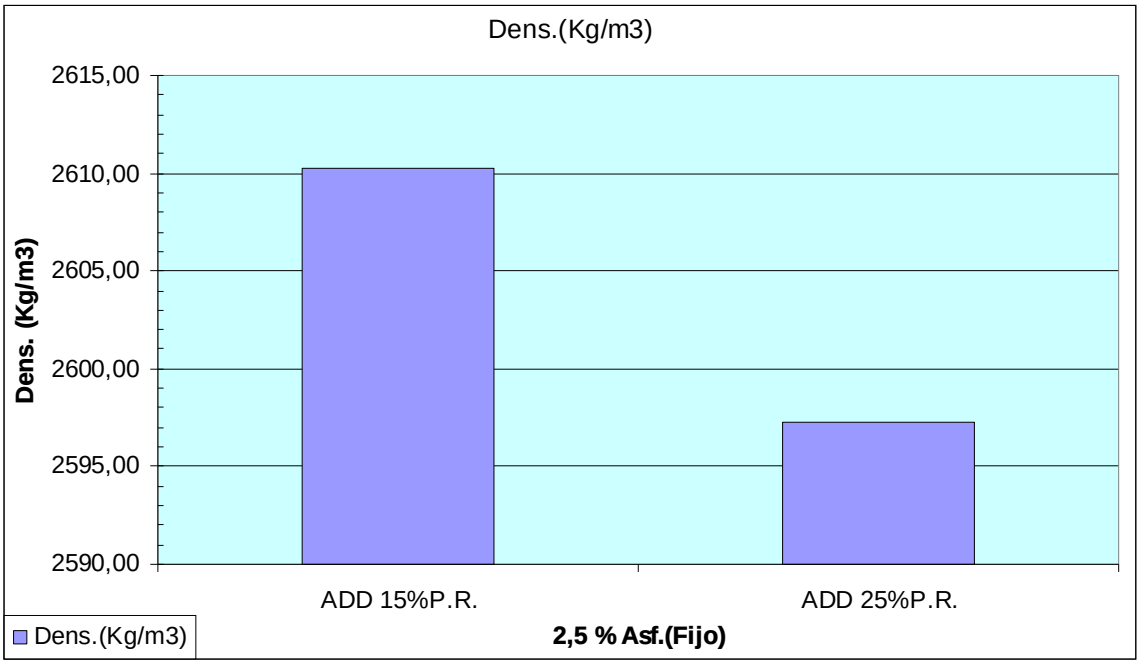



Fig. 43. Densidad de las probetas Marshall con adición de 15% y 25% de polvo de roca.

Al igual que en el gráfico del primer prediseño, se logra apreciar lógicamente que a mayor adición de polvo de roca a la mezcla con Escoria de Vanadio, la densidad es más baja, debido a que la Escoria de Vanadio por si sola posee una elevada densidad y las adiciones que se hagan en la mezcla, bajará la densidad de las probetas Marshall.

A continuación se muestran los resultados del ensaye de tracción indirecta (ITS) seco y saturado del prediseño con polvo de roca.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



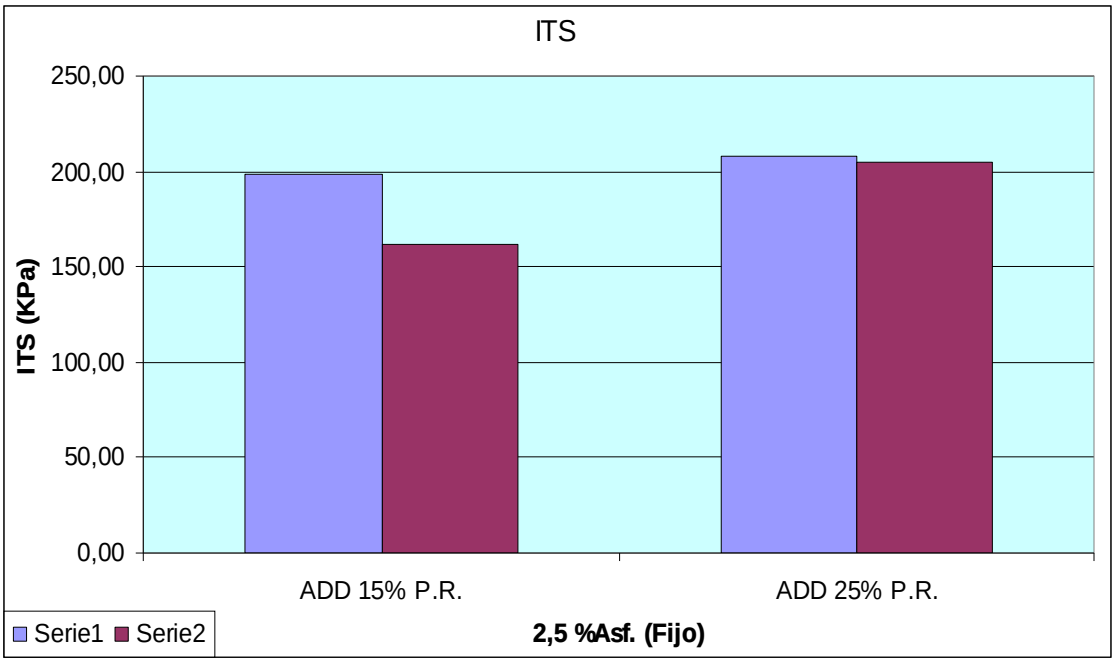



Fig. 44. ITS seco y saturado, en probetas de 15% y 25% de adición de polvo de roca.

Del gráfico anterior se pueden hacer las siguientes observaciones, el comportamiento de la mezcla con adición de 25% de polvo de roca, posee un mejor desempeño en su estado saturado superficialmente seco, que la mezcla con adición de 15% de polvo de roca. Al mismo tiempo el valor de ITS seco de ambas mezclas es bastante bajo (levemente sobre el mínimo), esto producto de grietas presentes en las probetas construidas, se puede suponer que las grietas presentadas en las probetas son producto del polvo de roca mezclado con la Escoria de Vanadio, ya que en el análisis visual de estas y posterior medición para obtener su densidad bruta, se apreció que las probetas que poseían mayor cantidad de polvo de roca, también poseían un mayor volumen, destacado por su mayor altura y un leve incremento en su diámetro (información presente en el anexo D).

## 4.4. Diseño de la cantidad óptima de asfalto espumado.

El presente punto está enfocado a describir como obtener la cantidad óptima de asfalto espumado, según el procedimiento de diseño del anexo B.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



El procedimiento de diseño es netamente empírico, dado que todos los parámetros que se obtengan del diseño son productos de los ensayos de laboratorio realizados.

Como primer paso, se analizan las propiedades del agregado a utilizar con asfalto espumado, la granulometría y la plasticidad que son los parámetros más importantes, ya que con estos datos se ha de ver que tan adecuado es el material para ser tratado con asfalto espumado y si ha de necesitar o no adición de cemento, para el caso del material pétreo Escoria de Vanadio, no es necesaria la adición de cemento, dado que el material no posee plasticidad. Luego de conocer estas propiedades se procede a determinar la masa seca del agregado pétreo y también de la adición de polvo de roca, para luego mezclarlos en sus respectivos porcentajes para formar un lote de 10 Kg.

### 4.4.1. Diseño de cantidad óptima de asfalto para probetas de Escoria de Vanadio.

A continuación, se intenta encontrar la cantidad que maximiza la resistencia a la Tracción Indirecta tanto seca como saturada, de una probeta tipo Marshall fabricada con Escoria de Vanadio y asfalto espumado.

Para conseguir este propósito se sigue el procedimiento de diseño descrito en el anexo B "Procedimiento de diseño para probetas de asfalto espumado". El primer paso después de tener los datos de las propiedades de la Escoria de Vanadio se procede a calcular el peso seco del material utilizando la ecuación 4.

$$M_{Seca} = \frac{M_{Nat}}{\left(1 + \frac{H_{Nat}}{100}\right)}$$

$$M_{Seca} = \frac{10000}{\left(1 + \frac{1.1}{100}\right)}$$

$$M_{Seca} = 9892\ [gr]$$

Donde:

$M_{Seca}$ = Masa seca del material (gr).

$M_{Nat}$ = Masa seca al aire con humedad natural (gr).

$H_{Nat}$ = Humedad natural del material obtenido del ensaye Proctor (%).

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



Con el dato obtenido de la ecuación anterior se calcula la cantidad de agua a agregar para la compactación. La ecuación a utilizar para este caso es la ecuación 5.

$$M_{agua} = 0.75 * \left( \frac{H_{Proctor} - H_{Nat}}{100} \right) * (M_{Seca})$$

$$M_{agua} = 0.75 * \left( \frac{7.4 - 1.1}{100} \right) * (9892)$$

$$M_{agua} = 463[gr]$$

Donde:

$M_{agua}$ = Masa de agua a agregar (gr).

$H_{Proctor}$ = Humedad óptima del Proctor (%).

$H_{Nat}$ = Humedad natural del material obtenido del ensaye Proctor (%).

$M_{Seca}$ = Masa seca del material (gr).

Ya obtenidos los datos necesarios para el acondicionamiento del material se obtiene ahora, el tiempo de spray asociado a cada cantidad de asfalto con la ecuación 3.

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

$$T_{Asfalto} = \frac{\frac{3.0}{100} * \left( (9892) * \left( 1 + \frac{10}{100} \right) \right)}{105.2}$$

$$T_{Asfalto} = 3.10[seg]$$

Donde:

$T_{asfalto}$ = Tiempo asociado a una determinada cantidad de asfalto (seg.).

$P_{Asf}$ = Cantidad de asfalto a rociar en la mezcla (%).

$M_{Seco}$ = Masa seca del material (gr.).

$F_{perdida}$ = Valor asociado a la perdida en recipiente y mezclador (%).

*Cte.* = Constante asociada al flujo másico de calibración del equipo (gr/s).

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Flujo másico fijo de asfalto (gr/s) | 105.2 | | | | |
| Flujo óptimo de agua inyectada (lt./h) | 5.68 | | | | |
| Cantidad de asfalto (%) | **1.5** | **2.0** | **2.5** | **3.0** | **3.5** |
| Tiempo del flujo de asfalto (s) | 1.55 | 2.07 | 2.59 | 3.10 | 3.62 |

Tabla 32. Tiempos asociados a cantidades de asfalto.

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

| | Escoria de Vanadio |
|---|---|
| Masa seca Escoria de Vanadio | 9892 (gr.) |
| Masa de agua a agregar. | 463 (gr.) |
| Flujo másico fijo de asfalto. | 105.2 (gr./s) |
| Flujo óptimo de agua para espumado | 5.68 (lt./h) |

Tabla 33. Cuadro resumen de datos necesarios para el diseño.

Los últimos valores de este cuadro resumen son los parámetros que han de ir fijos en el laboratorio móvil WLB 10, para cada uno de los cinco lotes de 9892 (gr.) de Escoria de Vanadio.

Con los datos de las tablas 32 y 33 se fabrican las probetas Marshall de Escoria de Vanadio y asfalto espumado, las cuales se curan durante 72 horas en un horno de aire forzado a 40 ºC. Después de este periodo de curado las probetas son medidas y pesadas para obtener su densidad bruta con la siguiente ecuación.

$$D = \frac{4 * W}{\left(\pi * d^2 * h\right)} * 1000 \qquad \text{[Ecuación 6]}$$

Donde:

$D$ = Densidad en (Kg/m$^3$).

$W$ = Masa de la probeta Marshall (gr.).

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



*d* = Diámetro de la probeta Marshall (cm.).

*h* = Altura de la probeta Marshall (cm.).

A continuación los resultados de las densidades calculadas con la ecuación 6, después de medir y pesar las probetas.

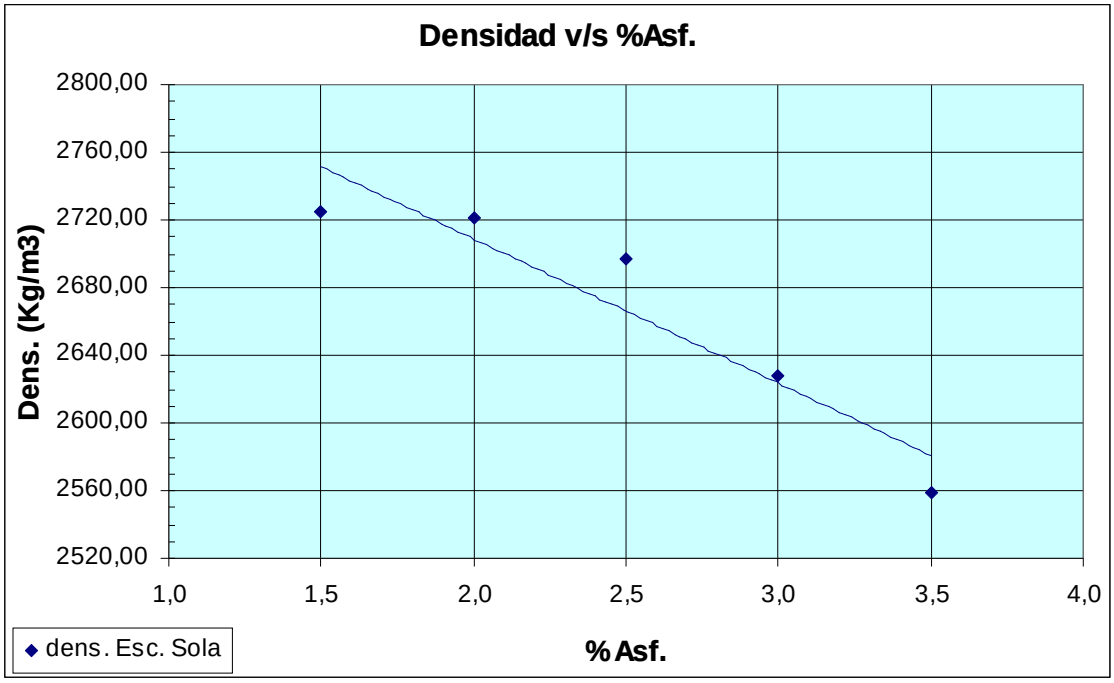



Fig. 45. Densidad bruta Probetas Escoria de Vanadio.

El gráfico anterior muestra la tendencia promedio de la densidad de las probetas Marshall fabricadas con asfalto espumado, la tendencia de estas probetas es descendente debido a que la densidad del la Escoria de Vanadio es mayor que la densidad del asfalto, por lo cual al aumentar la cantidad de asfalto en las probetas, estas disminuyen su densidad.

Después de ser obtenida la densidad de las probetas de asfalto espumado, la mitad de estas se ambientan a 25 ºC en un horno de aire forzado por un tiempo de alrededor de una hora, para realizar el ensayo de ITS seco. La otra mitad de las probetas de espumado se ambientan en un baño de agua 25 ºC por 24 horas.

El gráfico muestra el resultado de los ensayes de ITS seco e ITS saturado, con sus respectivas tendencias.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



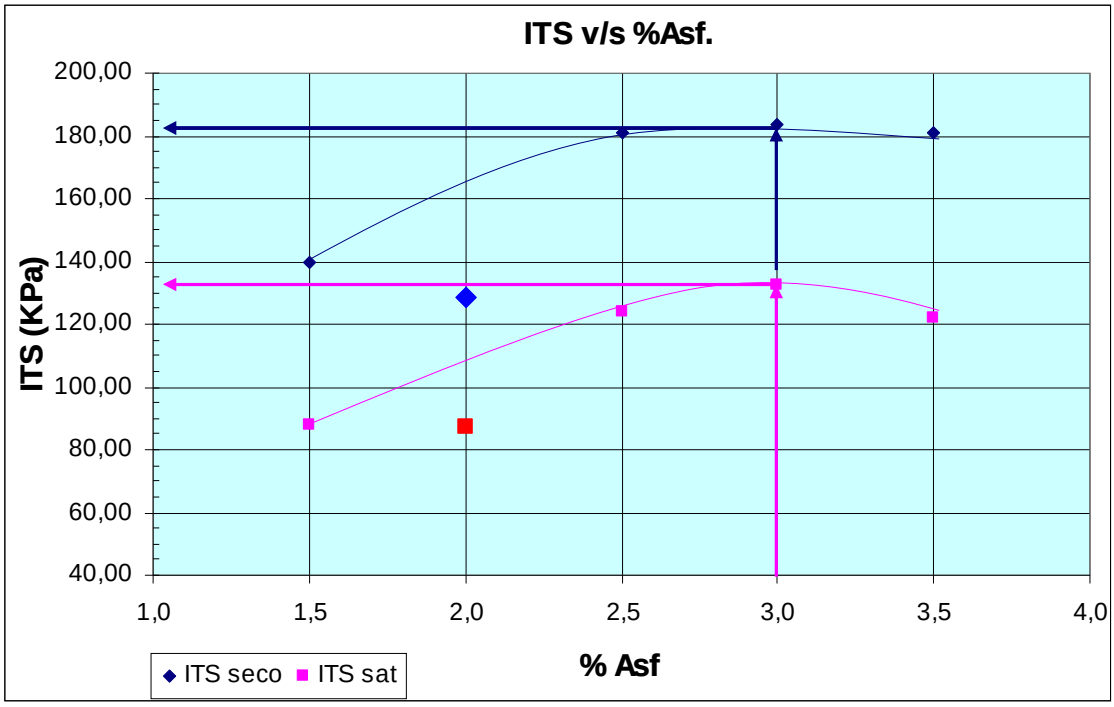



Fig. 46. Gráfico ITS seco y saturado, Escoria de Vanadio.

Del gráfico anterior se puede observar que la resistencia a la Tracción Indirecta en su estado seco, es menor a la resistencia sugerida en la bibliografía que es de 200 KPa. aunque su TSR es mayor al 50% que es aconsejado. La condicionante de la resistencia a la Tracción Indirecta seca, es en este caso lo que limita y descarta el diseño de una base tratada de Escoria de Vanadio con asfalto espumado, con los niveles de asfalto presentados en los ensayos mostrados. Los puntos destacados tanto para ITS seco y saturado, fueron omitidos para la generación de las líneas de tendencia.

4.4.2. Diseño de cantidad óptima de asfalto para probetas de Escoria de Vanadio con polvo de roca (75/25).

Para obtener el peso seco del porcentaje correspondiente a la Escoria de Vanadio y del polvo de roca se utiliza la ecuación 4. A continuación el cálculo respectivo de la masa seca de Escoria y polvo de roca respectivamente.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



$$M_{Seca_E.V} = \frac{M_{Nat}}{\left(1 + \frac{H_{Nat}}{100}\right)} \qquad M_{Seca_P.R.} = \frac{M_{Nat}}{\left(1 + \frac{H_{Nat}}{100}\right)}$$

$$M_{Seca_E.V.} = \frac{7500}{\left(1 + \frac{1.1}{100}\right)} \qquad M_{Seca_P.R.} = \frac{2500}{\left(1 + \frac{1.05}{100}\right)}$$

$$M_{Seca_E.V.} = 7418\ [gr] \qquad M_{Seca_P.R.} = 2474\ [gr]$$

Donde:

$M_{Seca}$ = Masa seca del material (gr).

$M_{Nat}$ = Masa seca al aire con humedad natural (gr).

$H_{Nat}$ = Humedad natural del material obtenido del ensaye Proctor (%).

Después de ser calculadas las masas secas de los materiales a mezclar, se procede a calcular el agua que se ha de agregar a la mezcla de Escoria de Vanadio y polvo de roca, según la ecuación 5.

$$M_{agua_Mix} = 0.75 * \left( \left( \frac{H_{Proctor_E.V.} - H_{Nat_E.V.}}{100} \right) * \left(M_{Seca_E.V.}\right) + \left( \frac{H_{Proctor_P.R.} - H_{Nat_P.R.}}{100} \right) * \left(M_{Seca_P.R.}\right) \right)$$

$$M_{agua_Mix} = 0.75 * \left( \left( \frac{7.4 - 1.1}{100} \right) * (7418) + \left( \frac{4.4 - 1.05}{100} \right) * (2474) \right)$$

$$M_{agua_Mix} = 413[gr]$$

Donde:

$M_{agua_Mix}$ = Masa de agua a agregar a la mezcla de áridos (gr).

$H_{Proctor_E.V.}$ = Humedad óptima del Proctor de la Escoria de Vanadio (%).

$H_{Proctor_P.R..}$ = Humedad óptima del polvo de roca (%).

$H_{Nat_E.V.}$ = Humedad natural de la Escoria de Vanadio (%).

$H_{Nat_P.R.}$ = Humedad natural del polvo de roca (%).

$M_{Seca_E.V.}$ = Masa seca de la Escoria de Vanadio (gr).

$M_{Seca_P.R.}$ = Masa seca del polvo de roca (gr).

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



Ya obtenidos los datos necesarios para la mezcla de Escoria de Vanadio y polvo de roca, se procede a calcular los tiempos que se han de ingresar en el relé del laboratorio móvil de asfalto espumado modelo WLB 10, estos tiempos se calculan con la ecuación 3.

Según el procedimiento de diseño dispuesto en el anexo B, las cantidades de asfalto han de incrementarse en 0.5 puntos porcentuales, hasta lograr cinco valores empezando con el valor de 1.5% de asfalto, entre el rango de valores a probar en el diseño debe estar el porcentaje teórico de asfalto espumado según la tabla 12, relativo a la granulometría. A continuación se calcula un tiempo según la ecuación 3 a modo de ejemplo.

$$T_{Asfalto} = \frac{\frac{P_{Asf}}{100} * \left( \left( M_{Seco_Mix} \right) * \left( 1 + \frac{F_{perdida}}{100} \right) \right)}{Cte.}$$

$$T_{Asfalto} = \frac{\frac{1.5}{100} * \left( (9892) * \left( 1 + \frac{10}{100} \right) \right)}{105.2}$$

$$T_{Asfalto} = 1.55[seg]$$

Donde:

$T_{asfalto}$ = Tiempo asociado a una determinada cantidad de asfalto (seg.).

$P_{Asf}$ = Cantidad de asfalto a rociar en la mezcla (%).

$M_{Seco_Mix}$ = Masa seca total del material (Escoria-polvo de roca) (gr.).

$F_{perdida}$ = Valor asociado a la perdida en recipiente y mezclador (%).

*Cte.* = Constante asociada al flujo másico de calibración del equipo (gr/s).

Tabla de resultados de la ecuación 3 para distintas cantidades de asfalto.

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Flujo másico fijo de asfalto (gr/s) | 105.2 | | | | |
| Flujo óptimo de agua inyectada (lt./h) | 5.68 | | | | |
| Cantidad de asfalto (%) | **1.5** | **2.0** | **2.5** | **3.0** | **3.5** |
| Tiempo del flujo de asfalto (s) | 1.55 | 2.07 | 2.59 | 3.10 | 3.62 |

Tabla 34. Tiempos asociados a cantidades de asfalto.

A continuación se presenta un cuadro resumen de los datos necesarios para la mezcla de áridos y los datos que se han de ingresar en el laboratorio móvil modelo WLB 10.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



| | Esc. de Vanadio con Polvo de Roca (75/25) |
|---|---|
| Masa seca Escoria/polvo de roca. (75/25) | 9892 (gr.) |
| Masa de agua a agregar. | 413 (gr.) |
| Flujo másico fijo de asfalto. | 105.2 (gr./s) |
| Flujo óptimo de agua para espumado | 5.68 (lt./h) |

Tabla 35. Cuadro resumen de datos necesarios para el diseño.

Los datos de la tabla anterior son los que se utilizan para los cinco lotes de 10 Kg. del mix de áridos de Escoria de Vanadio y polvo de roca. Por cada punto de porcentaje de asfalto, se fabrican seis probetas, de las cuales la mitad serán ensayadas en condición saturada superficialmente seca y las otras tres se ensayan secas solamente. La única variable que habrá en la fabricación de las probetas será el tiempo en el relé del equipo de espumado WLB 10 el cual cambia con cada porcentaje de asfalto.

Ya fabricadas y curadas las probetas en horno a 40 ºC por 72 horas, se miden y pesan para así calcular su densidad bruta, la cual se expone en la siguiente figura.

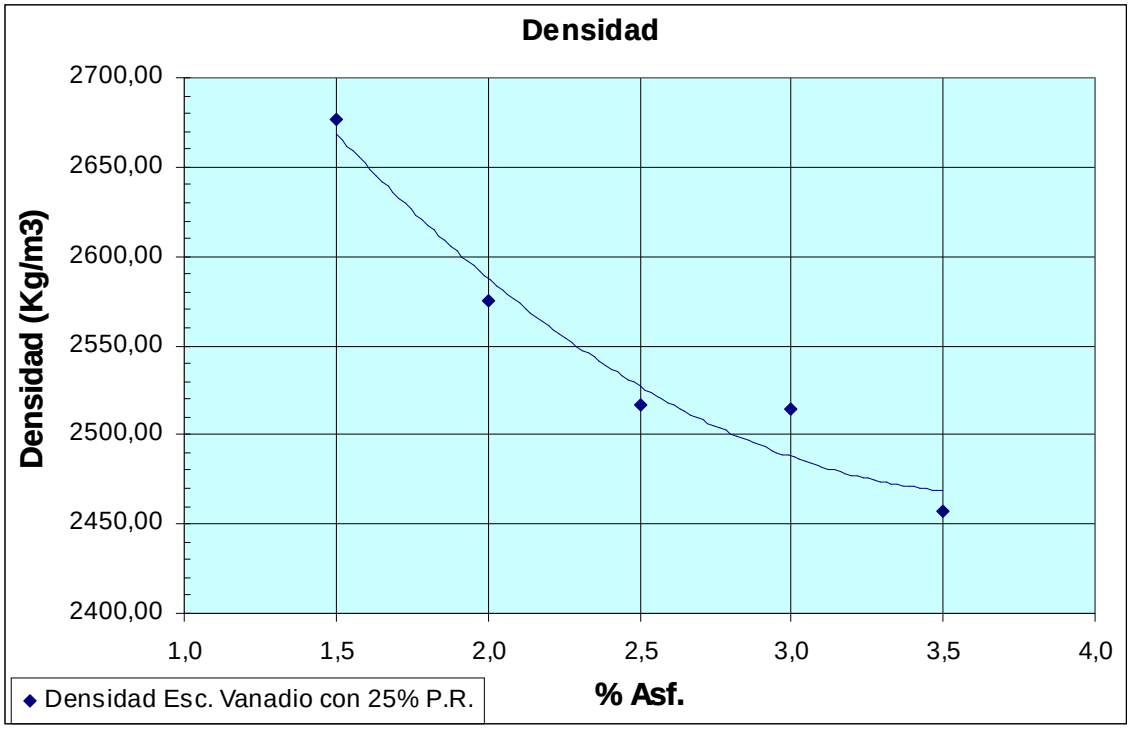



Fig. 47. Densidad probetas Escoria/polvo de roca (75/25).

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



El análisis de la densidad bruta de las probetas de asfalto espumado, es utilizado para discriminar posibles probetas defectuosas, el método utilizado para discriminar las probetas es el promedio de las densidades por cada porcentaje de asfalto, la variación de la densidad en probetas normales de RAP/Granular es de 50 Kg./m$^3$, pero en el caso del material Escoria de Vanadio este límite ha de ser más alto, por la densidad misma de la Escoria que es mayor que la del reciclado RAP/Granular.

Después de obtenida la densidad de las probetas se procedió a separar por cada punto tres probetas para el ensaye de ITS seco y tres para el ITS saturado, donde las últimas se saturan sumergiéndolas en un baño a una temperatura de 25 ºC por 24 horas.

A continuación los resultados de los ensayos de ITS seco y saturado para las probetas de Escoria de Vanadio y polvo de roca (75/25).

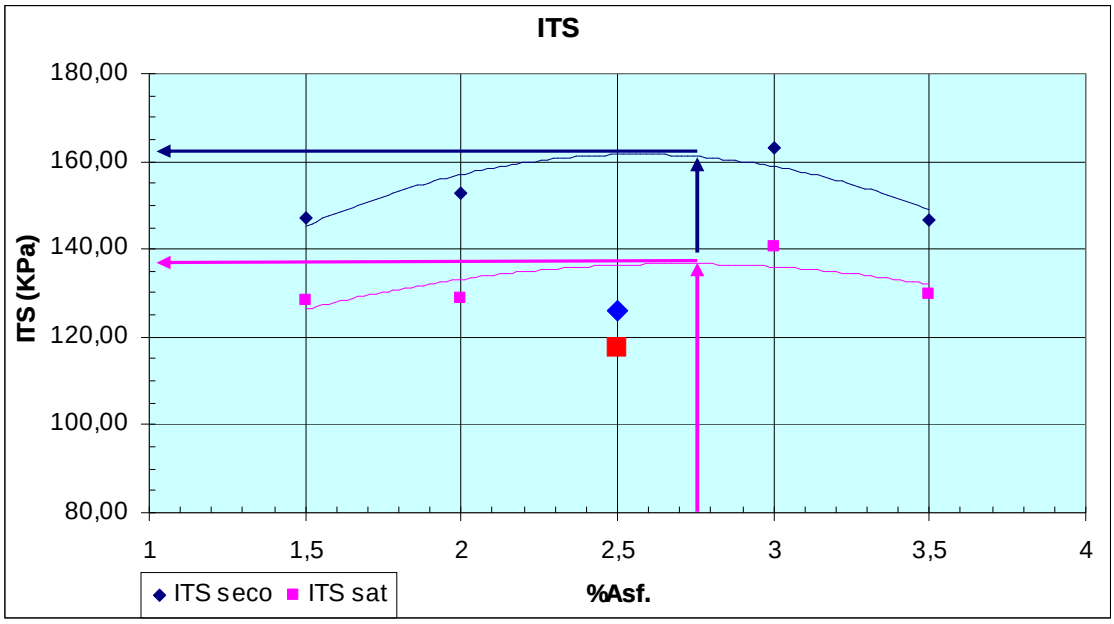



Fig. 48. Ensaye ITS seco y saturado para Escoria de Vanadio y polvo de roca (75/25).

Como se puede apreciar en el gráfico todos los valores de ITS seco están por debajo del mínimo de 200 Kpa. recomendado, del mismo modo se aprecia un punto atípico en el desarrollo de las curvas, este punto correspondiente a el valor de 2.5% de asfalto, tiene una caída con respecto a la tendencia de los valores adyacentes, debido a esto fue descartado para realizar la línea de tendencia representante de los puntos. Este diseño no cumple con

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



los requisitos mínimos recomendados, por lo tanto, se realizará una prueba con un porcentaje menor de polvo de roca que de ser 20%, dado que las probetas con esta cantidad de polvo de roca son las de mejor se comportamiento en los prediseños, después de la cantidad de 25% de polvo de roca.

Conjuntamente con la prueba de otra cantidad de polvo de roca, también se prueba con más puntos en el gráfico, esto implica llegar hasta un valor de 5% de asfalto, dado que, la tendencia de la curva anterior es creciente y para obtener el óptimo de cantidad de asfalto se analiza con la curva con concavidad hacia abajo, donde la pendiente en el punto sea nula.

### 4.4.3. Diseño de cantidad óptima de asfalto para probetas de Escoria de Vanadio con polvo de roca (80/20).

En la presente experiencia de diseño, se repite el mismo procedimiento para fabricar las probetas de asfalto espumado utilizado en la mezcla anterior de Escoria de Vanadio y polvo de roca.

Dado que se ocuparon las mismas fórmulas anteriores e idénticos procedimientos de cálculo. Ahora únicamente, se presenta la tabla resumen con los datos necesarios para acondicionar la mezcla de Escoria de Vanadio y polvo de roca en proporción de 80 y 20% respectivamente.

| | Esc. de Vanadio con Polvo de Roca (80/20) |
|---|---|
| Masa seca Escoria/polvo de roca. (80/20) | 9892 (gr.) |
| Masa de agua a agregar. | 423 (gr.) |
| Flujo másico fijo de asfalto. | 105.2 (gr./s) |
| Flujo óptimo de agua para espumado | 5.68 (lt./h) |

Tabla 36. Cuadro resumen mix Escoria de Vanadio con polvo de roca (80/20).

Para el caso de los nuevos tiempos asociados a las nuevas cantidades de asfalto a agregar, desde 3.5% - 5.0%, se calcularon con la ecuación 3, igual que en el caso anterior. Los nuevos datos se exponen en la siguiente tabla.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Flujo másico fijo de asfalto (gr./s) | 105.2 | | | | | | | |
| Flujo óptimo de agua inyectada (lt./h) | 5.68 | | | | | | | |
| Cantidad de asfalto (%) | **1.5** | **2.0** | **2.5** | **3.0** | **3.5** | **4.0** | **4.5** | **5.0** |
| Tiempo del flujo de asfalto (s) | 1.55 | 2.07 | 2.59 | 3.10 | 3.62 | 4.14 | 4.65 | 5.17 |

Tabla 37. Tiempos asociados a cantidades de asfalto.

Con los datos necesarios ya obtenidos y mostrados en las tablas anteriores, se fabrican las seis probetas por punto de cantidad de asfalto, lo que hace un total de 48 probetas Marshall a fabricar y ensayar, donde la mitad de ellas se ensayarán en ITS seco ambientadas a 25 ºC y la otra mitad, ambientadas a 25 ºC saturadas en un baño, durante 24 hr., se ensayarán en ITS saturado.

A continuación se muestra el resultado gráfico de la variación de la densidad, conforme aumenta la cantidad de asfalto.

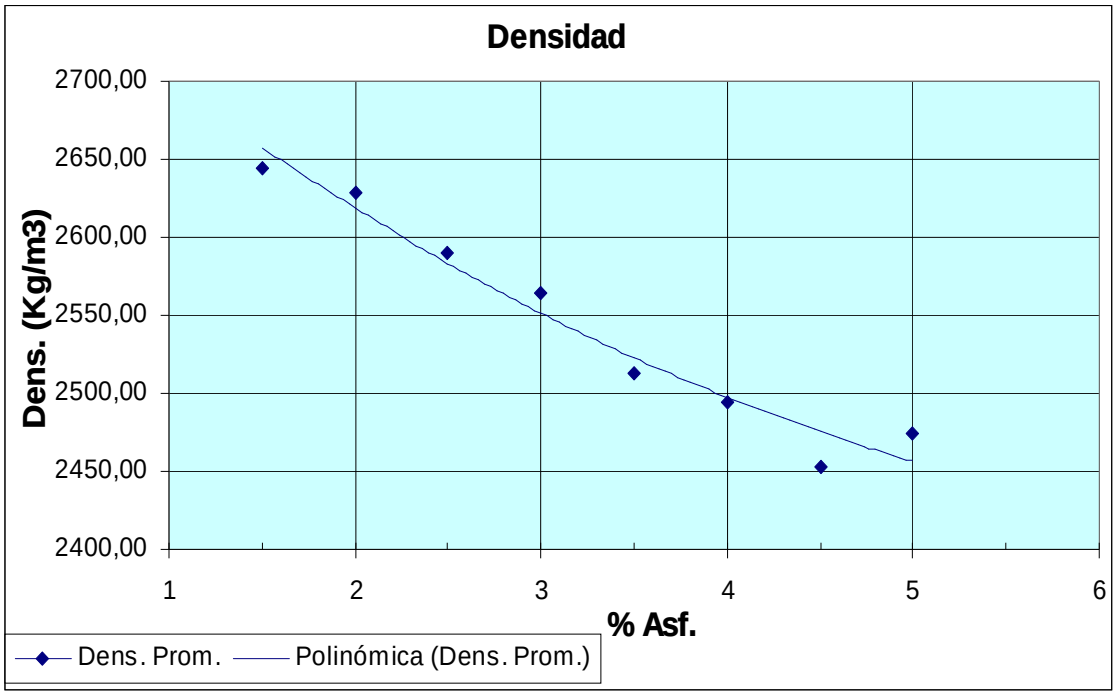



Fig. 49. Densidad probetas de Escoria de Vanadio con polvo de roca (80/20).

Al comparar estas densidades con el diseño anterior se logra apreciar una densidad más alta para cada valor de cantidad de asfalto, esto se debe a que el porcentaje de polvo de roca

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



es menor, lo que provoca que la densidad mayor de la Escoria de Vanadio sea dominante en los resultados.

Del mismo modo que en el diseño anterior se realiza el ensayo de las probetas ambientadas a 25 ºC, tanto las probetas secas como las saturadas. En la figura que continúa se ilustra los resultados de los ensayes de ITS.

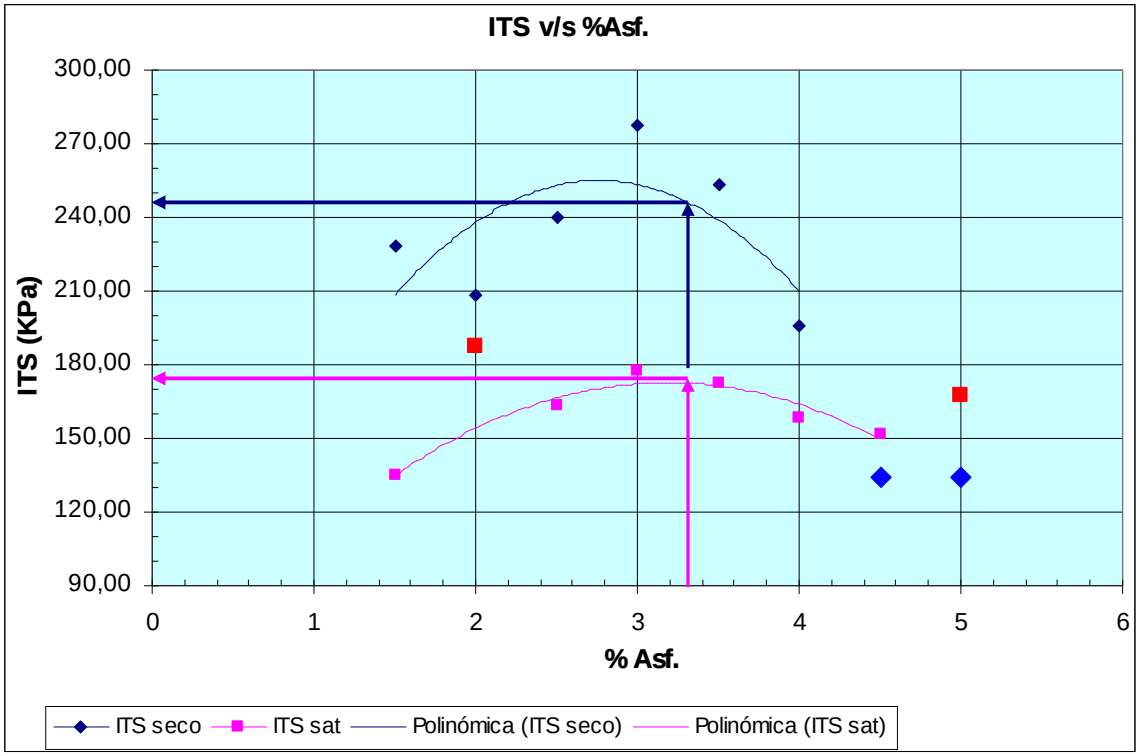



Fig. 50. Curvas del Ensaye de ITS seco y saturado mix Escoria/polvo de roca (80/20).

Al ver el gráfico anterior y definitivo diseño de Escoria de Vanadio con polvo de roca, se aprecia que los valores obtenidos son los más altos entre todos los ensayos anteriormente realizados. Ahora se procede a describir a grandes rasgos como se obtiene el valor de asfalto óptimo, para el diseño de base tratada de Escoria de Vanadio y polvo de roca con asfalto espumado. Ya obtenidos los valores de los ensayes de Tracción Indirecta y graficados versus el contenido de asfalto, se agregan al grafico las tendencias de estos valores, descartando los valores atípicos de ITS seco y saturado destacados, el resto de los puntos poseen tendencias curvas parabólicas, donde el punto de inflexión de la curva, el Peak, está asociado a la máxima resistencia sostenida por el conjunto de probetas ensayadas

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



con una determinada cantidad de asfalto, para el caso de la Región del Bio Bio el resultado del diseño es controlado por la tendencia del ITS saturado, dado el nivel de precipitación en la Región. Para diseños en zonas con escasa o casi nula precipitación, como es el caso del norte del país, sólo se realizan los ensayes de ITS seco.

Entonces la cantidad óptima de asfalto asociada a la Escoria de Vanadio con polvo de roca, es de 3.3% logrando una resistencia a la Tracción Indirecta de 170 KPa. aproximadamente.

Para concluir el diseño de base tratada de Escoria de Vanadio/polvo de roca con asfalto espumado, se presenta una tabla resumen con los valores obtenidos.

| | |
|---|---|
| Grado de viscosidad del cemento asfáltico | CA - 14 |
| Proveedor de asfalto | CLASA |
| Temperatura del asfalto ( °C) | 180 |
| Cantidad de asfalto (%) | 3.3 |
| % óptimo de agua para espuma | 1.5 |
| Agua para compactación (%) | 5.1 |
| Densidad del material (Ton/m$^3$) | 2.53 |

Tabla 38. Cuadro resumen diseño base tratada Escoria/polvo de roca (80/20).

Ya obtenido el diseño requerido para la Escoria de Vanadio con el polvo de roca, se ha de probar un nuevo diseño de base tratada de Escoria de Vanadio con asfalto espumado, esta vez no habrá mezcla de áridos, siendo los lotes en su totalidad 100% Escoria de Vanadio. El diseño de esta base tratada será similar al diseño probado en el punto 4.4.1. con variación de los ensayes realizados a las probetas de Escoria de Vanadio, al igual que el aumento de las cantidades de asfalto a rociar.

## 4.5. Diseño alternativo de base tratada de Escoria Vanadio con asfalto espumado.

En el presente punto se muestra un diseño alternativo de la base tratada con Escoria de Vanadio, la diferencia de este punto con respecto a los diseños anteriores, es que los lotes serán de 100% Escoria de Vanadio, sin añadir ningún otro agregado pétreo como

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



polvo de roca o algún filler, como cemento. Además se ha de probar con cantidades más altas de porcentaje de asfalto, hasta llegar al límite de 5.0% de asfalto, este límite es tomado de la literatura para materiales reciclados con asfalto espumado, otra variación que se ha de hacer en el nuevo diseño es la prueba de ensayos comúnmente realizados a carpetas asfálticas, donde se analiza la estabilidad y fluidez de las probetas asfálticas, mediante la compresión de las probetas Marshall por las mordazas del mismo nombre.

Cabe mencionar que la fabricación y curado de las probetas se mantuvo sin modificación alguna, así que de este modo, los pasos desde la obtención del peso seco del material, hasta el curado de las probetas y la posterior obtención de las densidades se realizo del mismo modo que los anteriores diseños.

A continuación se presenta la misma tabla resumen de datos presentada en el punto 4.4.1. dado que el material es el mismo y sus propiedades no han sido modificadas de ninguna forma.

| | Escoria de Vanadio |
|---|---|
| Masa seca Escoria de Vanadio | 9892 (gr.) |
| Masa de agua a agregar. | 463 (gr.) |
| Flujo másico fijo de asfalto. | 105.2 (gr./s) |
| Flujo óptimo de agua para espumado | 5.68 (lt./h) |

Tabla 39. Cuadro resumen de datos necesarios para el diseño.

Ahora se muestran los tiempos asociados a las cantidades de asfalto que se han de rociar, estos valores son los mismos de la tabla 37 del punto 4.4.3. con la única diferencia que para este caso la cantidad de asfalto empieza en 2.5%, pero igualmente fueron obtenidos con la ecuación 3.

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Flujo másico fijo de asfalto (gr./s) | 105.2 | | | | | |
| Flujo óptimo de agua inyectada (lt./h) | 5.68 | | | | | |
| Cantidad de asfalto (%) | **2.5** | **3.0** | **3.5** | **4.0** | **4.5** | **5.0** |
| Tiempo del flujo de asfalto (s) | 2.59 | 3.10 | 3.62 | 4.14 | 4.65 | 5.17 |

Tabla 40. Tiempos asociados a porcentajes de asfalto.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



Los datos de la tabla 39 son fijos para cada lote de Escoria de Vanadio, los únicos valores que han de ser cambiados son los tiempos del flujo de asfalto que son distintos para cada uno de los lotes.

Después de ser fabricadas, curadas, medidas y pesadas se obtiene el siguiente gráfico de densidad v/s % asfalto.

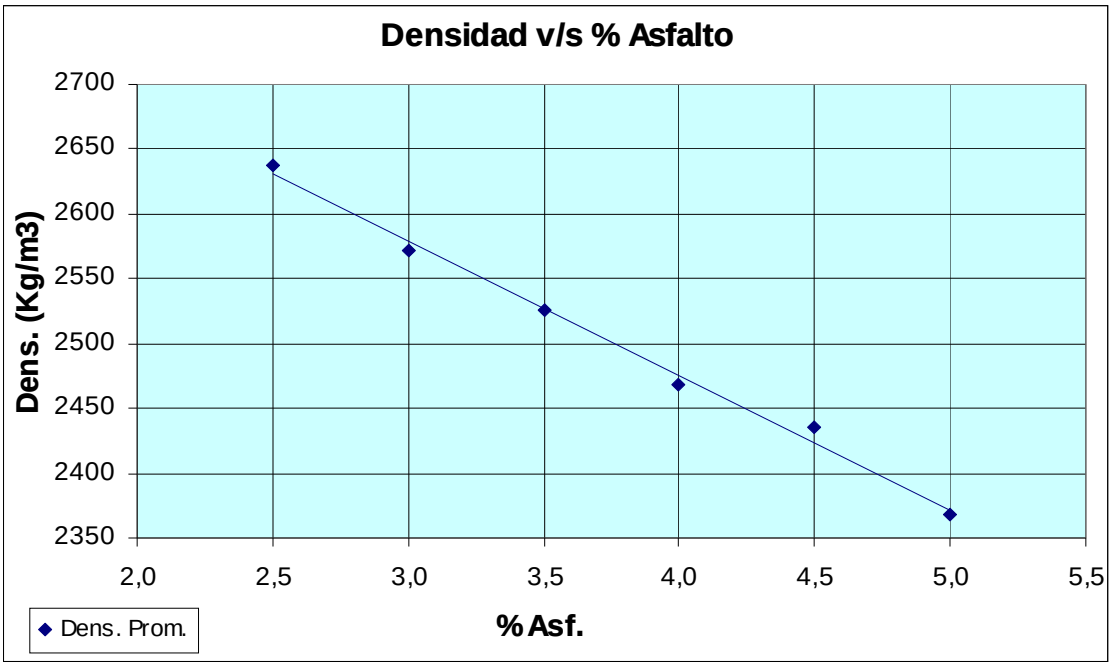



Fig. 51. Gráfico densidad v/s % asfalto, para Escoria de Vanadio con asfalto espumado.

El análisis de este gráfico muestra sólo la homogeneidad de los lotes de Escoria de Vanadio y de las probetas, con respecto al aumento de la cantidad de asfalto, dado que la tendencia de estas densidades es una recta, y la diferencia entre un punto y otro es relativamente uniforme.

El gráfico de la densidad versus el porcentaje de asfalto, también es utilizado para calcular el porcentaje de huecos presente en la mezcla, el cual es un dato relevante para obtener el porcentaje óptimo de asfalto de diseño en bases asfálticas.

Después de haber obtenido la densidad de las probetas de asfalto espumado, se ambientan y ensayan a Tracción Indirecta en su estado seco y 24 horas después en estado saturado. En la figura de que continúa se muestra la tendencia de los ensayes.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



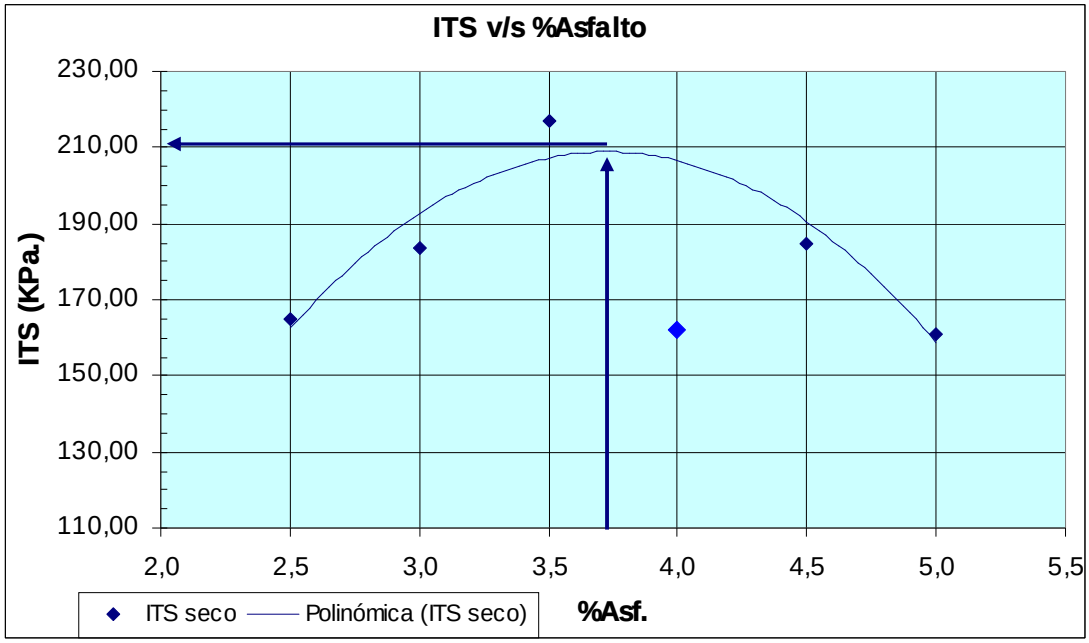



Fig. 52. Gráfico ITS seco probetas Escoria de Vanadio.

Como muestra el gráfico de la figura 52, sólo se realizó el ensaye de ITS seco, dado que la resistencia a la Tracción Indirecta en el estado seco es el requerimiento crítico (>200 KPa.), y la Escoria siempre a cumplido con el TSR. Además de las experiencias anteriores se puede estimar un porcentaje óptimo de asfalto para el caso saturado, donde la diferencia entre el óptimo seco y saturado es de 0.3 puntos porcentuales de asfalto aproximadamente, dando como óptimo un 4.0% de asfalto.

| | |
|---|---|
| Grado de viscosidad del cemento asfáltico | CA - 14 |
| Proveedor de asfalto | CLASA |
| Temperatura del asfalto ( °C) | 180 |
| Cantidad de asfalto (%) | 4.0 |
| % óptimo de agua para espuma | 1.5 |
| Agua para compactación (%) | 5.6 |
| Densidad del material (Ton/m$^3$) | 2.47 |

Tabla 41. Resumen diseño 100% Escoria con asfalto espumado.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



Como se ve en la tabla anterior, la cantidad óptima para la mezcla 100% Escoria de Vanadio, es más alta que para la mezcla con polvo de roca, esto debido a que al haber menos finos para dispersarse la espuma de asfalto, esta se adhiere a material de mayor tamaño para formar el mortero asfáltico, necesitándose más asfalto para ello.

A continuación se muestra los resultados de los ensayos realizados, haciendo el supuesto que la base tratada con asfalto espumado se comportará como una base asfáltica, la tabla que continúa da a conocer los requerimientos para una base asfáltica gruesa.

| Tipo de mezcla asfáltica | Estabilidad (N) | Fluencia (0.25 mm.) | | Huecos en la mezcla (%) | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Mín. | Mín. | Máx. | Mín. | Máx. |
| Rodadura | 9000 | 8 | 16 | 4.0 | 6.0 |
| Intermedia | 8000 | 8 | 16 | 3.0 | 8.0 |
| **Base Gruesa** | **6000** | **8** | **16** | **5.0** | **10.0** |
| Superficie Fina | 4000 | 8 | 16 | 3.0 | 8.0 |

Tabla 42. Requisitos para mezclas asfálticas. (Tabla 5.408.203.A, M.C. Vol. 5).

Los datos destacados en la tabla anterior serán los que se han de comparar con los resultados de los ensayos realizados.

Después de curar y obtener la densidad de las probetas, se procedió a realizar el ensayo Marshall para poder conseguir los valores correspondientes a la estabilidad y fluidez, según el procedimiento descrito en el Manual de Carreteras Vol. 8 punto 8.302.40. Las probetas se ambientan en un baño de agua durante 30 a 40 minutos a 60 ºC, antes de ser comprimidas en la mordaza Marshall.

Los resultados obtenidos de los ensayos Marshall se muestran a continuación, pero primero se expone el gráfico de huecos de la mezcla versus la cantidad de asfalto el cual es necesario para obtener la cantidad de asfalto óptimo para la base asfáltica, para el caso en estudio, de la base tratada con asfalto espumado.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



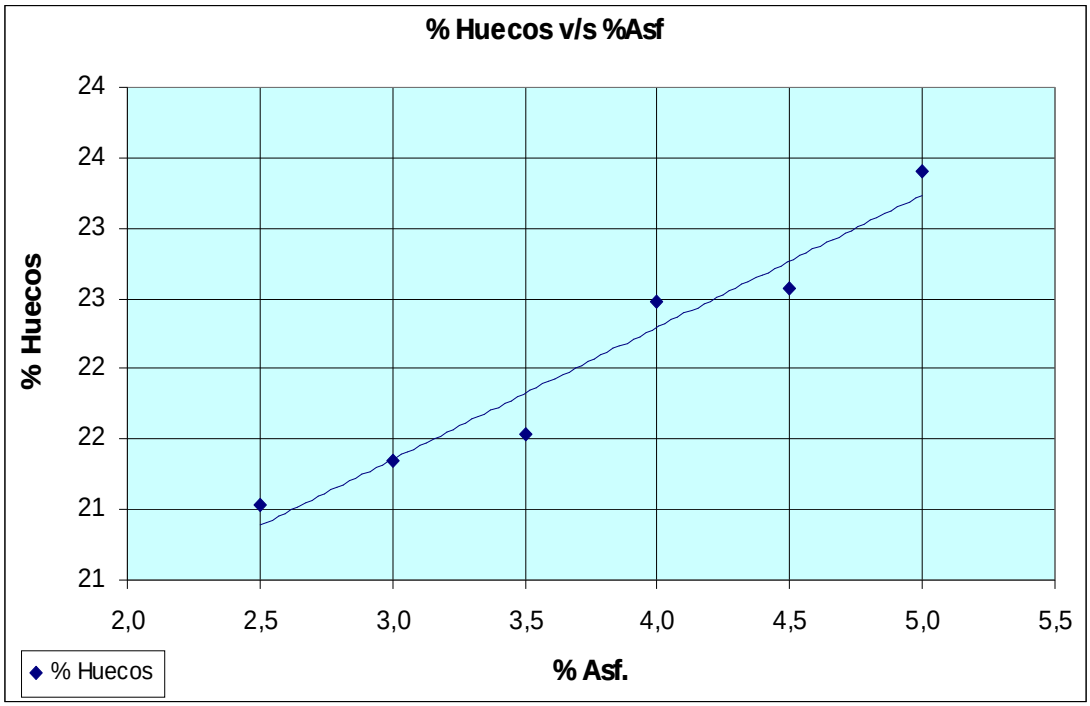



Fig. 53. Gráfico de porcentaje de huecos de la mezcla.

Como primera observación para el gráfico anterior, la tendencia del porcentaje de huecos posee pendiente positiva, lo cual es discordante con la información que existe en la bibliografía, en la cual la pendiente del gráfico porcentaje de huecos versus porcentaje asfáltico es de pendiente negativa. Como segunda observación se aprecia que los valores del gráfico son demasiado altos, para el general de los gráficos relacionados con el porcentaje de huecos en la mezcla, por lo tanto, se puede decir que como una primera apreciación la base tratada con asfalto espumado no se comporta como una base gruesa asfáltica.

A continuación los gráficos de estabilidad y fluidez se muestran y analizan para intentar encontrar un diseño óptimo para la base tratada, de modo aclaratorio las probetas fueron ambientadas a 60 ºC en seco, dado que en las pruebas realizadas en su condición saturada las probetas no aportaron valores lógicos y demasiado bajos.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



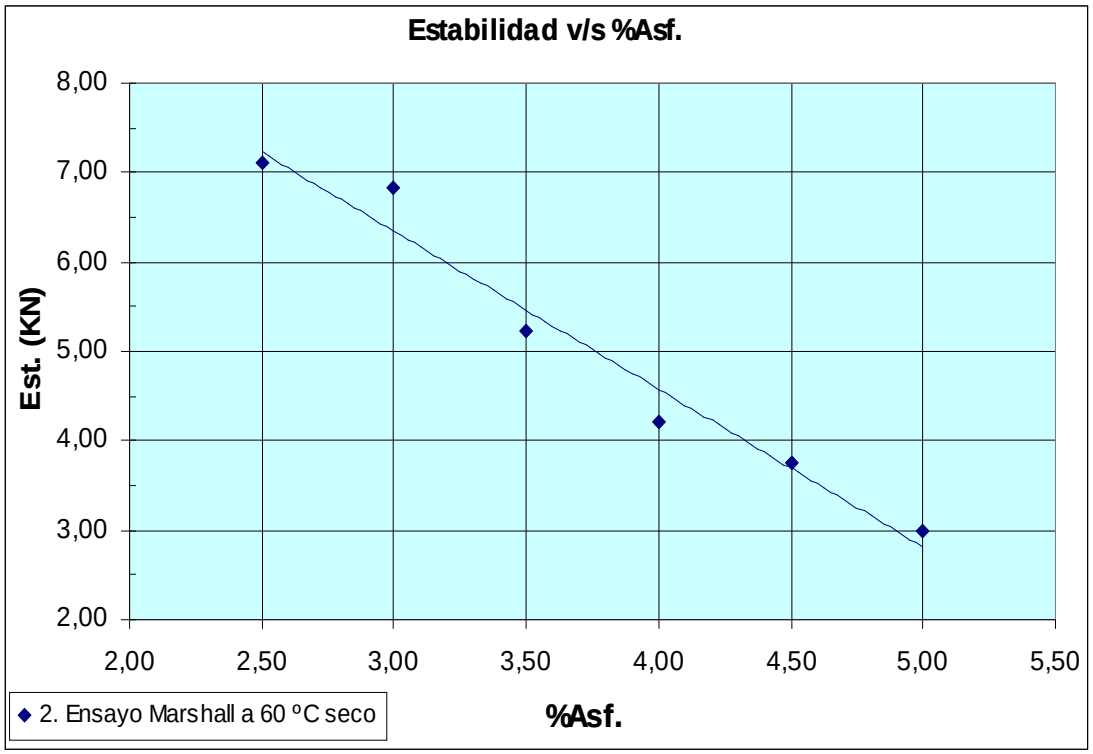



Fig. 54. Gráfico Estabilidad versus % de asfalto.

Los gráficos de estabilidad versus porcentaje de asfalto, comúnmente son valores con tendencias parabólicas y cóncavas hacia abajo. Donde el punto de pendiente cero es la máxima estabilidad que logra una probeta para un determinado porcentaje de asfalto, en el gráfico anterior esta tendencia parabólica no se presenta, por lo cual es imposible determinar un valor máximo y un porcentaje de asfalto asociado a este.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



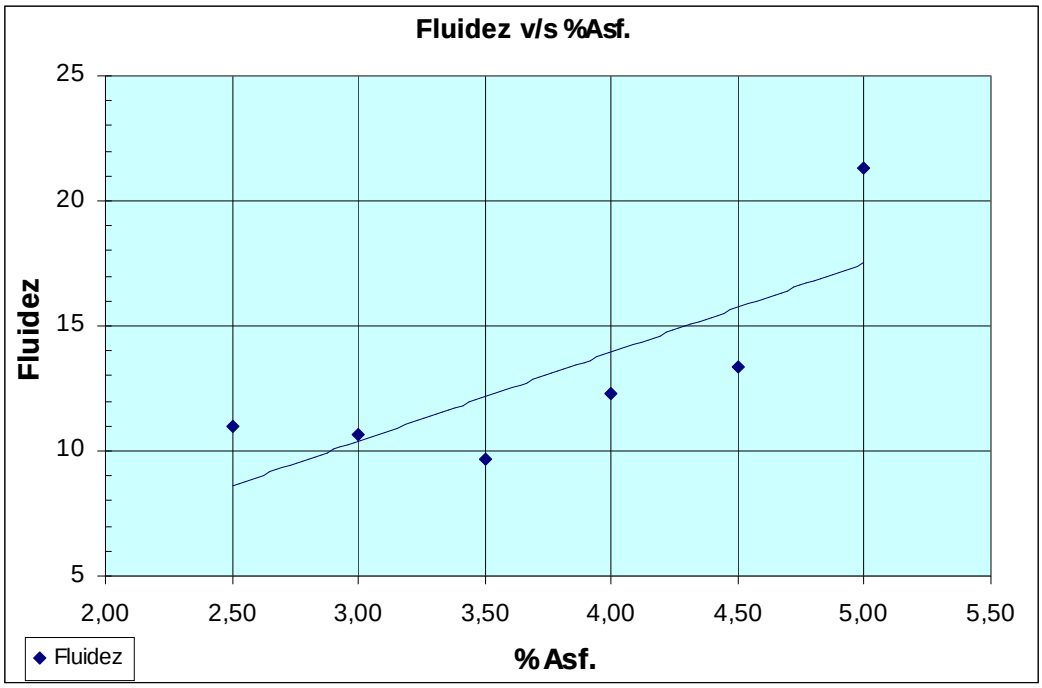



Fig. 55. Gráfico Fluidez versus % de asfalto, para probetas secas a 60 ºC.

Para obtener el porcentaje óptimo de asfalto en una base asfáltica, se promedian tres valores de asfalto, los cuales son; el porcentaje de asfalto asociado a la máxima densidad obtenida, el segundo valor es, el que logra la máxima estabilidad y que esté sobre el mínimo de la estabilidad para la capa a diseñar, para el caso de los gráficos anteriores las tendencias de los datos son parábolas cóncavas hacia abajo, y por último el tercer valor para este promedio, es ingresar con el requerimiento mínimo o con algún valor dentro del rango de porcentaje de huecos al gráfico de porcentaje de huecos versus porcentaje de asfalto. Cuando ya se obtiene el valor óptimo de asfalto se ingresa dentro del gráfico de fluidez y se compara con el valor de requisito.

Como no se pudo obtener algún dato para lograr el diseño de la base tratada con asfalto espumado como base asfáltica. Se realizó un último ensayo ambientando las probetas como en el ensayo ITS saturado, a 25 ºC por 24 horas, y después ensayarlas con las mordazas Marshall. A continuación los resultados de los ensayos realizados bajo la metodología descrita anteriormente.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



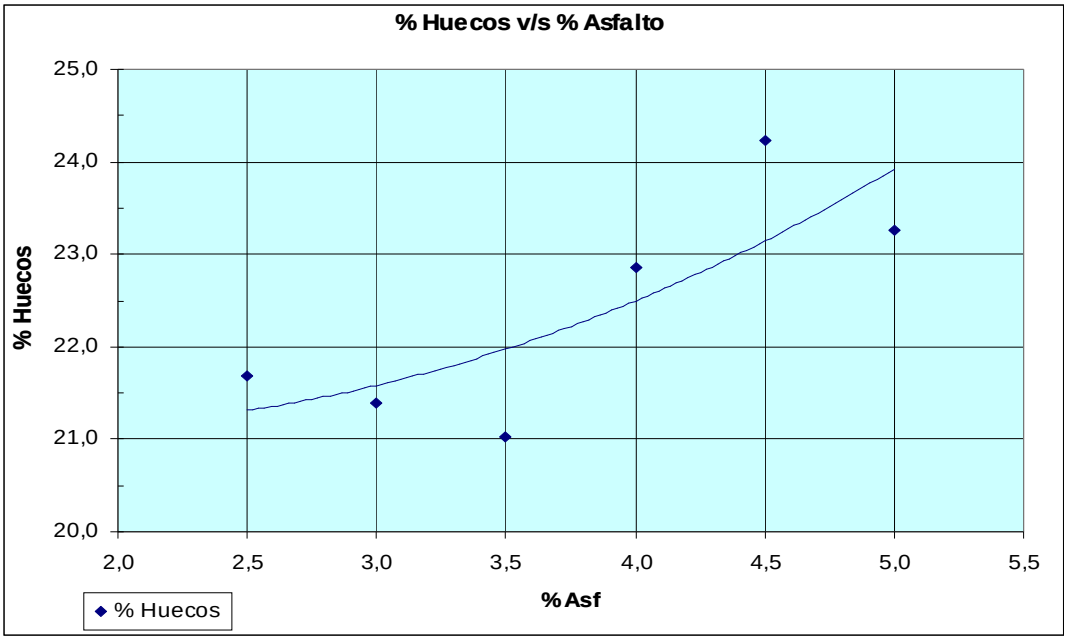



Fig. 56. Gráfico porcentaje de huecos de la mezcla.

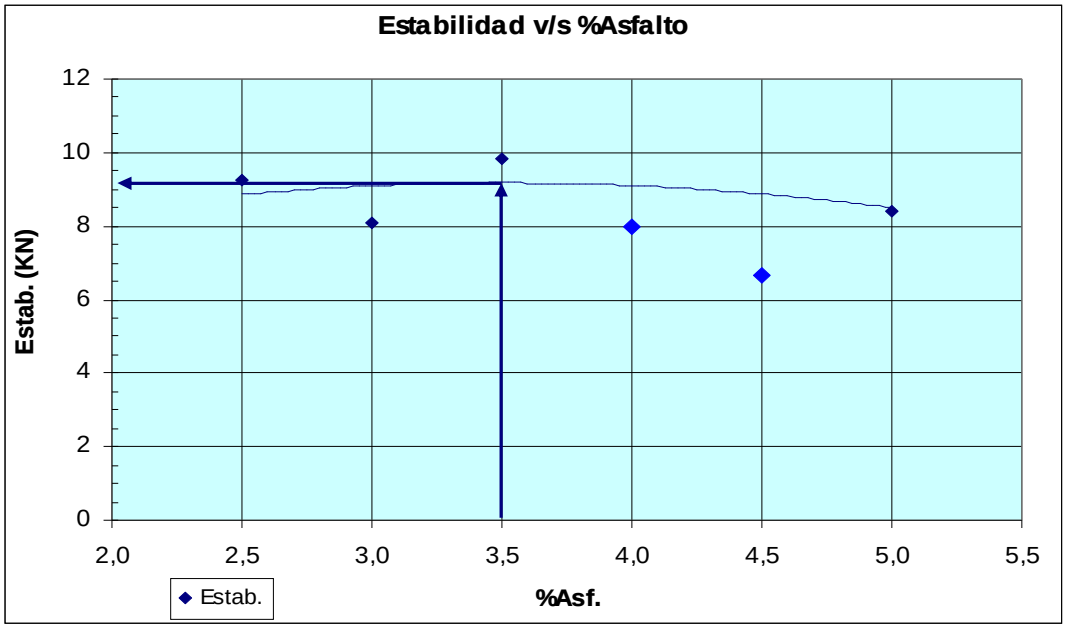



Fig. 57. Gráfico de estabilidad v/s % de asfalto, para probetas saturadas a 25 ºC.

Como se observa en los gráficos anteriores, el porcentaje de huecos no cumple con los requerimientos. La estabilidad es una medida de resistencia, al descartar algunos puntos

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



(por presentar grietas, falta de material y tener una agregado pétreo de gran tamaño en su interior) se puede realizar la gráfica de la tendencia de los valores de estabilidad, logrando obtener un Peak y así determinar el óptimo de cantidad de asfalto que maximiza la estabilidad, además si se ingresa a la gráfica de fluidez, el cual logra cumplir con las exigencias.

Finalmente se muestra el gráfico de fluidez que esta asociado con el de estabilidad de la base tratada con asfalto espumado.

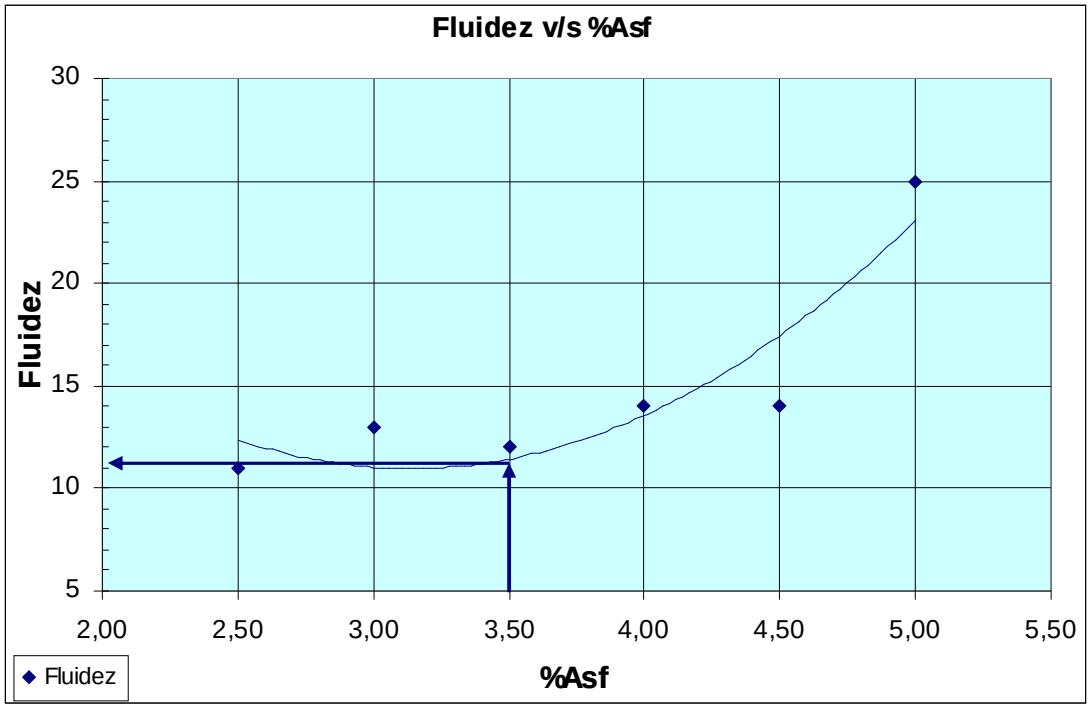



Fig. 58. Gráfico Fluidez versus % de asfalto, para probetas saturadas a 25 ºC.

Finalmente se muestran tablas resumen sobre los ensayos realizados a la Escoria de Vanadio y cada uno de los diseños realizados, con sus ensayos, resultados y requerimientos de diseño.

La Escoria de Vanadio es un material de muy buenas propiedades relacionadas al área vial, dado su resistencia y cualidades levemente cementantes. Debido a estas se le exigió el nivel más alto para una base granular, lo cual queda mostrado en la tabla 22 (del punto 4.1.4.), que se muestra más abajo.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



| Propiedad | Análisis | Requerimientos |
|---|---|---|
| Análisis Proctor Modificado:<br>Humedad Óptima (%) | 7.4 | -- |
| D.M.C.S. (Kg/m$^3$) | 2.922 | -- |
| Análisis de California:<br>CBR 95% de la DMCS, a 5.08 mm. de penetración (%) | 184 | Mín. 120 |
| Desgaste de Los Angeles (%) | 16 | Máx. 30 |
| Material Chancado (%) | 100 | Mín. 90 |
| Límite Líquido (LL) | -- | < 25% |
| Índice de Plasticidad (IP) | NP | < 6 |

Tabla 22. Requerimientos versus propiedades de la escoria de Vanadio.

A continuación se muestra la tabla 26 (del punto 4.2.) que son los únicos datos en común que tienen todos los diseños, esta tabla muestra los parámetros para lograr la espuma óptima con el cemento asfáltico CA – 14.

| **Parámetros espuma óptima de asfalto.** | |
|---|---|
| Grado de viscosidad del cemento asfáltico | CA - 14 |
| Proveedor de asfalto | CLASA |
| Temperatura del asfalto ( °C) | 180 |
| Flujo fijo de asfalto (gr./s) | 105.2 |
| % óptimo de agua para espuma | 1.5 |
| Flujo de agua óptimo (l/h) | 5.68 |

Tabla 26. Resumen diseño espuma de asfalto.

La espuma de asfalto lograda, cumple con todos los requerimientos exigidos por el Manual de Carreteras, además se agregó un requerimiento más que es el del índice de espumación, que según la bibliografía clasifica a esta espuma de asfalto como una espuma con calidad de moderada a buena, según su comportamiento con la temperatura del

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



agregado pétreo (ver tabla 11, del punto 3.6.4.). Esto queda resumido en la tabla 27 (del punto 4.2.) que se muestra a continuación.

| **Requerimientos y resultados espuma de asfalto CA – 14.** | | | |
|---|---|---|---|
| Propiedades | Resultados | Requerimientos | Fuente |
| Vida Media (s) | 11 | >10 | M.C. Vol. 5 |
| Razón de Expansión | 11 | >10 | M.C. Vol. 5 |
| Índice de Espumación | 104 | 75< X <150 | Wirtgen GmbH |

Tabla 27. Propiedades de la espuma de asfalto CA – 14.

Como criterio de diseño se ocupó el ensayo de Tracción Indirecta (ITS), pero para el caso del diseño alternativo, se empleó los ensayos Marshall para mezclas en caliente.

Para la selección de algún diseño este debía cumplir con algunos requerimientos mínimos, los cuales constaban de que en el caso del ensaye ITS seco las probetas debían resistir un mínimo de 200 KPa. además de que el TSR asociado no fuese menor al 50%, así también los datos del ensaye de ITS seco y saturado, generaran una tendencia a curvas con concavidad hacia abajo para poder determinar la cantidad de asfalto asociada con la resistencia máxima a la Tracción Indirecta lograda por un conjunto de probetas ensayadas, como es mencionado anteriormente, el óptimo para esta zona se determina mediante la curva de ITS saturado, porque es la condición real más desfavorable a la cual estará sometido la base tratada en su puesta en servicio.

| **Propiedades y límites de diseño** | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Mezcla Escoria/ P. de roca | Tendencia curva cóncava | Óptimo de asfalto(%) | ITS seca (KPa.) | ITS sat. (KPa.) | TSR (%) | ITS seco > a 200 KPa. |
| ***100/0*** | ***Si*** | ***4.0*** | ***205*** | ***--*** | ***>50*** | ***No*** |
| 75/25 | Si | 2.75 | 165 | 137 | 83 | No |
| **80/20** | **Si** | **3.3** | **246** | **174** | **71** | **Si** |

Tabla 43. Cuadro resumen diseños Esc. de Vanadio con asfalto espumado.

De la tabla resumen de los diseños realizados con asfalto espumado y Escoria de Vanadio, se observa que, los diseños aceptados, porque cumplen con los requerimientos

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



mínimos es el realizado con 100% Escoria de Vanadio y el con adición de 20% de polvo de roca, para los cuales se obtuvieron los datos mostrados en la tabla 38 (del punto 4.4.3.) y la tabla 41 (del punto 4.5) las cuales se repiten más abajo.

| | |
|---|---|
| Grado de viscosidad del cemento asfáltico | CA – 14 |
| Proveedor de asfalto | CLASA |
| Temperatura del asfalto ( °C) | 180 |
| Cantidad de asfalto (%) | 3.3 |
| % óptimo de agua para espuma | 1.5 |
| Agua para compactación (%) | 5.1 |
| Densidad del material (Ton/$m^3$) | 2.53 |

Tabla 38. Cuadro resumen diseño base tratada Escoria/polvo de roca (80/20).

| | |
|---|---|
| Grado de viscosidad del cemento asfáltico | CA - 14 |
| Proveedor de asfalto | CLASA |
| Temperatura del asfalto ( °C) | 180 |
| Cantidad de asfalto (%) | 4.0 |
| % óptimo de agua para espuma | 1.5 |
| Agua para compactación (%) | 5.6 |
| Densidad del material (Ton/$m^3$) | 2.47 |

Tabla 41. Resumen diseño 100% Escoria con asfalto espumado.

En el caso del otro diseño, este fue descartado ya sea porque no cumplía uno o más de los requerimientos exigidos. En el caso del diseño de Escoria de Vanadio sin adición alguna, se observa en el gráfico de la figura 46, no logra resistir los 200 Kpa. necesarios en el ensaye de ITS seco, pero al realizar pruebas con mayores porcentajes de asfalto la Escoria de Vanadio sin adición logra resistir 210 Kpa. como Peak en su estado seco. Para el diseño de Escoria de Vanadio y 25% de polvo de roca, el requerimiento no cumplido, fue que las probetas no lograron el valor de 200 KPa. de ITS seco, además de presentar una curva con menores valores que la Escoria de Vanadio sin adición.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



A continuación se analiza el diseño alternativo realizado con Escoria de Vanadio y asfalto espumado. Cabe mencionar que, el diseño alternativo consiste en realizar ensayos del tipo Marshall a las probetas fabricadas con asfalto espumado. En el caso del diseño Marshall, el óptimo de asfalto de obtiene mediante el promedio de dos valores máximos, más el valor de la cantidad de asfalto para un determinado porcentaje de huecos en la mezcla. Para lo cual, los valores máximos son determinados de las curvas cóncavas de los gráficos de densidad versus porcentaje de asfalto y estabilidad versus porcentaje de asfalto. Para el diseño alternativo no se exigirá que este cumpla con todos los requerimientos normalizados, dado que al ser un diseño con asfalto espumado se priorizan valores de resistencia (Estabilidad) y equilibrio de la mezcla (Fluidez), que han de ser los más importantes para este estudio.

| Requerimientos y resultados diseño alternativo | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Requerimientos | | | | | Resultados | | | |
| C. cóncava Estab. | C. cóncava Dens. | Estabilidad Mín. (N) | Huecos mezcla (%) | Fluidez | Estab. (N) | Fluidez | Dens. (Kg./m$^3$) | Huecos mezcla (%) |
| Si | NP | 6000 | 5 - 10 | 8 - 16 | **9200** | **11** | 2525 | -- |

Tabla 44. Propiedades y límites del diseño alternativo.

El cuadro vacío o designado como sin información (--), es producto del análisis del gráfico de la figura 53 (%Huecos en la mezcla v/s %Asfalto), donde no se logró obtener dato alguno, al estar los rangos de datos muy alejados de los requerimientos, además la pendiente de la recta es contraria a las conocidas en la bibliografía para bases asfálticas. Del análisis del gráfico de la figura 51 (Gráfico densidad v/s % asfalto), tampoco fue posible determinar un óptimo de asfalto dado que no presento una tendencia curva cóncava, pero estos gráficos han de ser los menos considerados para el diseño, ya que lo que se busca es ver el comportamiento resistente de la base de Escoria de Vanadio tratada con asfalto espumado. Por lo tanto los gráficos de las figuras 57 (Gráfico de estabilidad v/s % de asfalto) y 58 (Gráfico Fluidez versus % de asfalto) han de ser los más importantes para este diseño alternativo, además de lograr cumplir con los requerimientos exigidos.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



Por lo tanto se obtiene un óptimo de asfalto para el diseño alternativo, el cual se muestra en la siguiente tabla. Es necesario recordar que los ensayes realizados se hicieron con probetas saturadas a una temperatura de 25 ºC, como es el procedimiento de diseño con asfalto espumado.

| | |
|---|---|
| Grado de viscosidad del cemento asfáltico | CA - 14 |
| Proveedor de asfalto | CLASA |
| Temperatura del asfalto ( °C) | 180 |
| Cantidad de asfalto (%) | 3.5 |
| % óptimo de agua para espuma | 1.5 |
| Agua para compactación (%) | 5.6 |
| Densidad del material (Ton/$m^3$) | 2.52 |
| Estabilidad (N) | 9200 |
| Fluidez | 11 |

Tabla 45. Diseño alternativo base tratada de Escoria de Vanadio con asfalto espumado.

En la tabla anterior queda expresado los resultados del diseño alternativo, los cuales muestran un satisfactorio resultado resolviendo que, el diseño de una base tratada con asfalto espumado, logra cumplir con los requerimientos de resistencia exigidos para una base asfáltica.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



# CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

## 5.1. Conclusiones.

- La Escoria de Vanadio es un material pobre en partículas finas, además de poseer discontinuidad en su granulometría, específicamente en los menores tamaños (ver figura 35). Debido a esto, el mortero asfáltico formado con el asfalto espumado, es escaso y no alcanza a unir todo el material para producir las resistencias necesarias a la Tracción Indirecta para cumplir con lo requerido, esto con bajos porcentajes de asfalto, esto queda expuesto en el diseño de Escoria de Vanadio con asfalto espumado, específicamente en el gráfico de la figura 46, pero al aumentar la cantidad de asfalto este se adhiere a partículas de mayor tamaño logrando formar un mortero asfáltico con estas partículas y así resistir los 200 KPa. requeridos como resistencia al ITS seco.
- Para ver cual sería la mejor opción de mezcla con Escoria de Vanadio, se realizaron prediseños con una cantidad fija de asfalto espumado (2.5%), dejando como única variable la adición a la Escoria de Vanadio, esta fuese cemento o polvo de roca. Como mejor experiencia resulto ser la adición de polvo de roca a la Escoria de Vanadio con un valor de ITS seco de 240 KPa., dado que maximizó la resistencia a la Tracción Indirecta (ITS). Estos resultados se pueden apreciar en el gráfico de la figura 42, también se puede apreciar en este gráfico que el peor desempeño se logró con la adición de cemento, con un valor de 190 KPa, estando 10 KPa. por debajo del requerimiento mínimo para el ITS seco, esto debido a que, al agregar cemento a la Escoria de Vanadio, se aumentó su fragilidad.
- La adición de polvo de roca provocó una mejor dispersión del asfalto espumado en la mezcla, esto se advirtió al ser ensayadas por Tracción

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



Indirecta, dando resistencias al ITS seco entre 10 – 60 KPa. por sobre el mínimo de 200 KPa. requeridos, pero esta adición provocó también una disminución de la Resistencia Retenida (TSR), que al ensayarse bajo la condición saturadas bajaron su resistencia alrededor de un 35%, pero aun así estas logran cumplir todos los requerimientos de diseño propuestas por la bibliografía.

- Con respecto al diseño alternativo este logra cumplir con los requerimientos de resistencia y equilibrio de la mezcla (Estabilidad y fluidez), donde todos los valores de porcentaje de asfalto espumado están sobre el mínimo de 6000 N, encontrándose el óptimo en 3.5% con una estabilidad de 9000 N aproximadamente y su fluidez de 11 quedando dentro del rango (8-16).
- Si bien las respuestas de los diseños de Escoria de Vanadio (100% Escoria) como base tratada con asfalto espumado, no produjo un resultado óptimo, estos se vieron mejorados al aplicar una mayor cantidad de asfalto (hasta 5%), donde el óptimo de asfalto para el ensayo de ITS seco bordea el 4%, cumpliendo el requerimiento mínimo de 200 KPa., por lo cual podría compararse resultados con un diseño en terreno en una cancha de prueba.
- Finalmente, el diseño de Escoria de Vanadio con asfalto espumado es factible logrando valores de ITS seco de 205 KPa, pero si se desea mejorar su comportamiento de sugiere adicionar 20% de Polvo de roca, y así lograr resistencias de ITS seco alrededor de 245 KPa.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



## 5.2. Recomendaciones y/o sugerencias.

- El asfalto utilizado, CA-14 de CLASA, es un asfalto de baja viscosidad, por lo cual se esperaba mayores propiedades de espumación, pero es posible que estos resultados se vieran afectados, porque el asfalto utilizado es un asfalto CA-24 modificado a CA-14, por lo cual se sugiere prestar atención a la presencia de agentes anti-espumantes en estos casos de asfaltos modificados.
- En el caso de la preparación para el lanzamiento de la espuma de asfalto, se sugiere controlar mediante un termómetro ASTM con graduación sobre 200 ºC, la temperatura del asfalto dentro del equipo (depósito de asfalto), dado que la temperatura mostrada por el termómetro del laboratorio móvil WLB 10 esta más relacionada con la temperatura del contenedor de asfalto.
- Para el diseño de la base tratada de Escoria de Vanadio con asfalto espumado, se sugiere un estudio con respecto a los tiempos de desmolde y curado. Esto debido a que después de haber ensayado las probetas de Escoria de Vanadio en ITS seco y saturado, se analizaron algunas probetas, días después, y se pudo apreciar una mayor fortalecimiento entre el mortero asfáltico y los agregados especialmente en aquellos de mayor porcentaje de asfalto, se cree que este comportamiento es debido a las propiedades cementantes de la Escoria de Vanadio, por lo que se sugiere un estudio en esta dirección.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile



# Bibliografía


- ARIAS MEZA, Javier. Proyecto de título, "Diseño, Comparación y Aplicación de Mezclas Asfálticas de Alto Módulo a través del Diseño Marshall" (Marzo 2005, Concepción)

- SEGUEL CARRASCO, Rene. Proyecto de título, "Estudio de estabilización química de suelos con cenizas volantes para suelos de Concepción y sus alrededores"

- NOGUEIRA DE CASTRO, Luciana. "Reciclagem à Frio "in situ" com Espuma de Asfalto" (Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Noviembre 2003)

- MANUAL DE CARRETERAS VOLUMEN 5. "Especificaciones técnicas generales de construcción" (Dirección de Vialidad. Diciembre 2003).

- MANUAL DE CARRETERAS VOLUMEN 7. "Especificaciones y métodos de muestreo, ensaye y control" (Dirección de Vialidad. Diciembre 2003).

- PARDO ROJAS, Marcos. "Apuntes clases tecnología del asfalto".

- "Red vial nacional dimensionamiento y características" (Departamento de Gestión Vial. Diciembre 2006).

- RIVAS LABRIN, Carlos. Proyecto de título "Estabilización química de carpetas de rodado granulares en la VII región con Cloruro de Calcio". (Agosto 2005, Concepción)

- WIRTGEN. "Manual de reciclado en frío" Segunda Edición (Wirtgen GMBH. Alemania, Noviembre 2004).

- BISSADA, Amir F. "Structural response of foamed-asphalt-sand mixtures in hot enviroment"

- JENKINS, Kim Jonathan . "Mix design considerations for cold an half-warm bituminous mixes with emphasis on foamed bitumen" (September 2000).

- RUCKEL, P.J., KOLE, L.L., ABEL, F., ZATOR, R. E. "Foamix asphalt advances"

- MUTHEN, K. M. "Foamed Asphalt Mixes – Mix Design Procedure" (December 1998, South Africa).

- THENOUX, G. y JAMET, A. "Tecnología del asfalto espumado", Revista Ingeniería de Construcción Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile.