

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

En el Departamento de Tarija se tienen diferentes tipos de agregados, los cuales por la geometría de sus partículas, características mineralógicas y su origen geológico deben ser tratados cuidadosamente, debido a que sus propiedades varían según el lugar de extracción, y por lo tanto, influyen en la calidad de las mezclas asfálticas en caliente.

Algunos materiales son llamados agregados naturales porque simplemente son extraídos de depósitos fluviales, canteras o bancos, y luego, utilizados sin ningún procesamiento para elaborar mezclas asfálticas en caliente. Los agregados elaborados pueden incluir a los naturales que han sido separados en distintas fracciones según su tamaño, lavadas, trituradas para mejorar ciertas características de comportamiento de la mezcla asfáltica en caliente. Para conseguir una mezcla asfáltica de acuerdo a las especificaciones de proyecto, es necesaria una dosificación de agregados para determinar la combinación más económica y práctica de modo que cuando enfríe la mezcla asfáltica desarrolle las propiedades requeridas durante su vida útil. Por lo tanto, las propiedades finales de la mezcla asfáltica en caliente dependen, fundamentalmente, de las características de sus componentes.

En el caso de los áridos puede afirmarse que no es posible conseguir una buena mezcla asfáltica si la grava y arena no son de buena calidad, la mezcla debe soportar las fuertes cargas actuantes, la velocidad de tráfico, el número de repeticiones que, entre otros factores, hacen que en la actualidad las técnicas de construcción de pavimentos hayan sufrido una evolución muy rápida con una definida tendencia a adquirir cada vez mejores bases teóricas, que refuercen, justifiquen y permitan aplicar con buen criterio el diseño de mezclas asfálticas en caliente para la construcción de pavimentos.

Entre los materiales utilizados para mezclas asfálticas comúnmente se tienen materiales bituminosos, agregados y filler minerales. El agregado y el filler constituyen normalmente el 90-95% en peso (75-85% en volumen) de la mezcla total, mientras que el asfalto de 5-10%. En los últimos años, se destaca el uso de la tecnología para obtener materiales granulares triturados y seleccionados de chancadora, para realizar mezclas asfálticas.

Cada vez que un vehículo pasa sobre una sección de un pavimento, éste sufre una deformación o deflexión, es decir se produce una deformación elástica. La figura 1.1 mostrada más abajo, representa, cómo la carga W del vehículo, deforma levemente la estructura del pavimento, causando esfuerzos de tracción y compresión dentro del mismo.

Figura 1.1 Distribución de la carga a través de la estructura del pavimento en Sentido Longitudinal y Transversal



Fuente: *Deterioros en capas asfálticas: Fisuración (Mg.Ing. Fernando Martínez)*

En este trabajo se dosificarán mezclas densas en caliente utilizando como agregados residuos de construcción y demolición en la cual también se empleará el agregado de cantera. Por lo que, se realizará una serie de ensayos que permitirán evaluar y caracterizar el comportamiento mecánico de estas mezclas, y los parámetros mecánicos de las mezclas con áridos de residuos de construcción y de cantera. Las ventajas que proporcionan los agregados de residuos de construcción que van a ser empleados en las capas del pavimento son muchas, como la conservación de yacimientos naturales y la disminución en los costos de obra.

En nuestro medio, los agregados de residuos de construcción y demolición, ya sea de viviendas unifamiliares, condominios u otra estructura, son una alternativa práctica que se podría utilizar para evitar el desecho y a la vez la contaminación del medio ambiente con el abandono de dicho agregado; técnica que consiste en la reutilización de este material que ha perdido algunas de sus propiedades iniciales por el uso o envejecimiento (cohesión, textura, composición, geometría) pero que tiene el potencial de ser reutilizado para integrar nuevas capas. Las capas asfálticas por la flexibilidad

que presentan, tienen resistencia a la tracción y compresión para soportar los esfuerzos impuestos, mientras que las capas granulares de capa base y sub base, sólo resisten esfuerzos a compresión.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Es de gran importancia la evaluación mecánica de una mezcla densa en caliente, para observar el comportamiento de estos materiales en la combinación y dosificación de sus agregados. Debido al gran consumo de áridos en el sector de la construcción y teniendo en cuenta, los impactos ecológicos que ello conlleva, resulta imprescindible para el medio ambiente alcanzar un desarrollo sostenible, al considerar otra fuente de obtención de áridos y materias primas.

Figura 1.2 **Tipos de Agregados a utilizar en una mezcla asfáltica (material de estudio)**



Agregados de chancadora

Agregados de residuos de construcción

Fuente: Elaboración propia

Resolverá fallas o deterioros en capas asfálticas como la fisuración y algunas deformaciones como ser el ahullamiento, corrugación, hundimiento, asentamiento, etc. En este sentido, se busca contar con una técnica u opción para el mantenimiento de las rutas, con el fin de lograr una mayor duración y un mejor comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica y así alcanzar un óptimo desenvolvimiento de nuestras carreteras extendiendo los tiempos de mantenimiento.

Los resultados que se pretende obtener es que el agregado de residuos de construcción pueda cumplir con las especificaciones y normas para ser utilizado como agregado en

mezclas asfálticas y de esa forma, considerar la posibilidad de implementar su uso en vías de bajo y medio volumen de tráfico.

El aprovechamiento del material procedente de la demolición para capas asfálticas tiene como aporte el de poder contar con los áridos y betún contenidos en ellos como sustitutivos de materiales nuevos, lo cual reduce el costo del material de la mezcla, con una tasa de reciclado del orden del 25%-30%. De esta forma, se logra un ahorro en cada tonelada de ese mismo porcentaje en áridos nuevos y en torno a un 1% de nuevo ligante.

Lo novedoso en este tema es la inclusión del agregado de residuos de construcción como un nuevo material en el diseño de un pavimento, ligado a una mezcla densa en caliente, con el fin de que sus nuevas aplicaciones y propiedades puedan surgir con la unión de estos materiales y así este material pueda ser una solución sustentable para el destino de los RCD, compensando, en parte, la explotación exhaustiva de los recursos naturales.

1.3 DISEÑO TEÓRICO

1.3.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.3.1.1 Situación Problemática

En la práctica dentro del mantenimiento de las vías de comunicación, es fundamental el conocimiento de los problemas que puedan suscitarse por agentes externos, para que así, se pueda realizar una prevención adecuada y no exista un deterioro ascendente; sin embargo, siempre es posible detectar oportunamente estos problemas.

Es bien conocido que el reciclaje de los RCD fue inicialmente concebido como respuesta a la escasez de materiales de construcción y a los elevados costos de vertido. Puesto que, los áridos naturales utilizados en el sector de la construcción se extraen de depósitos sedimentarios o, más habitualmente, de canteras, las consecuencias de este proceso de extracción pueden generar diversos impactos medioambientales, tales como ruidos, polvo, vibraciones, afecciones visuales y paisajísticas, agotamiento de recursos naturales, generación de canteras abandonadas, etc.

Por tanto, dado el gran consumo de áridos en el sector de la construcción y teniendo en cuenta los impactos ecológicos que ello conlleva, resulta imprescindible para el

medio ambiente alcanzar un desarrollo sostenible, una alternativa es el considerar otra fuente de obtención de áridos y materias primas, es decir, el reciclado de residuos.

1.3.1.2 Problema

¿La disminución de disponibilidad de materiales de yacimientos y bancos de préstamo para la elaboración de mezclas asfálticas y en contraposición la cantidad cada vez mayor de residuos de construcción que afectan al medio ambiente?

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo General

El objetivo del presente trabajo es realizar una Evaluación comparativa de las propiedades Mecánicas de una mezcla densa en caliente de briquetas Marshall, que serán elaboradas utilizando como agregado residuos de construcción y demolición y agregados de cantera.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Analizar el estado de conocimiento sobre mezclas asfálticas en general y en particular las elaboradas con residuos de construcción y demolición.
- Identificar muestras de agregados y residuos de construcción y demolición para realizar la investigación.
- Caracterizar los agregados, cemento asfáltico y material de residuos de construcción y demolición.
- Determinar en laboratorio la caracterización con las Pruebas de Penetración, Viscosidad y Peso Específico del cemento asfáltico y los ensayos de Granulometría, Resistencia al desgaste por Abrasión, Peso específico de los diferentes agregados.
- Dosificar mezclas asfálticas con la incorporación de residuos de construcción y demolición en diferentes porcentajes.
- Evaluar mediante la prensa Marshall el comportamiento mecánico de la mezcla en Estabilidad y Fluencia para las diferentes mezclas combinadas con residuos de construcción y demolición.
- Realizar un análisis de los resultados obtenidos en la investigación.
- Establecer las conclusiones y recomendaciones de la investigación realizada.

1.5 HIPÓTESIS

Si se realizan mezclas densas asfálticas que tengan como base una mezcla combinada de agregados naturales con RCD (residuos de construcción y demolición), entonces se podrá evaluar las propiedades de estabilidad y fluencia con briquetas de la Metodología Marshall.

1.5.1 VARIABLES

- **Independiente**

Mezcla Densa en Caliente utilizando como agregados residuos de construcción y demolición.

- **Dependiente**

Propiedades mecánicas y un análisis al comportamiento en deformación, estabilidad, % de huecos ocupados por la emulsión, % de vacíos y peso volumétrico.

1.5.1.1. Variable Independiente.-

VARIABLE NOMINAL	CONCEPTUALIZACIÓN	OPERACIONALIZACIÓN		
		DIMENSIÓN	INDICADOR	VALOR ACCIÓN
Evaluación Mecánica de una Mezcla Densa en Caliente utilizando como agregado residuos de construcción y demolición.	Permiten evaluar y caracterizar el comportamiento mecánico de estas mezclas con áridos o residuos de construcción	Carpeta Asfáltica	Mezcla Asfáltica densa en caliente	Penetración a 25°C
				Punto de Inflamación
				Viscosidad
				Peso específico
			Agregados de cantera y de residuos de construcción y demolición	Granulometría
				Densidad
				Prueba de los ángeles
				Peso Específico
				Cubicidad de las partículas
				Ensayo de los sulfatos

Fuente: Elaboración propia

1.5.1.2. Variable Dependiente

- Densidad.

- Estabilidad.
- Fluencia 1/100”.
- % de vacíos de la mezcla.
- % de Cemento Asfáltico.

VARIABLE NOMINAL	CONCEPTUALIZACIÓN	OPERACIONALIZACIÓN		
		DIMENSIÓN	INDICADOR	VALOR ACCIÓN
Densidad	Ensayo para determinar valores de deformabilidad de los pavimentos asfálticos ideado por Bruce G. Marshall	Carpeta Asfáltica	Marshall	Equipo para Marshall
Estabilidad	Ensayo para determinar valores de estabilidad de los Pavimentos asfálticos ideado por Bruce G. Marshall.	Carpeta Asfáltica	Marshall	Equipo para Marshall
Fluencia 1/100”	Ensayo para determinar valores de estabilidad de los Pavimentos asfálticos ideado por Bruce G. Marshall.	Carpeta Asfáltica	Marshall	Equipo para Marshall
% de Vacíos de la mezcla	Son vacíos o bolsas de aire	Carpeta asfáltica	Ecuación	Volumen total de Huecos
% de Cemento Asfáltico	Método Marshall	Carpeta Asfáltica	Ecuación	Peso Volumen

Fuente: Elaboración propia

1.6 DISEÑO METODOLÓGICO

1.6.1 TÉCNICAS, MÉTODOS, PROCEDIMIENTOS

1.6.1.1. Reconocimiento del sitio de aplicación

El trabajo de Investigación se realizará en el laboratorio de asfaltos del SEDECA (Servicio Departamental de Caminos) utilizando la Metodología Marshall para la elaboración de los cuerpos de prueba con 75 golpes por cara. De esta manera se encontrará 6 porcentajes óptimos de cemento asfáltico para 6 combinaciones; los 3 primeros porcentajes para una gradación fina y los 3 porcentajes restantes para una gradación gruesa.

1.6.1.2 Muestreo

Para el muestreo se elegirá una construcción que esté en demolición dentro de la ciudad, de la cual se recolectará los agregados, en el presente caso, se tomará como muestra agregados de la cantera del río Santa Ana, Guadalquivir y agregados de residuos de construcción y demolición (demolición de una columna).

1.6.1.3 Caracterización

La caracterización se realizará de los siguientes materiales:

- Calidad del cemento Asfáltico 85-100.
- Agregados de la cantera del río Santa Ana (la Pintada) y del río Guadalquivir (planta de Erika).
- Agregados de residuos de construcción y demolición (RCD) de estructuras civiles de tipo hormigón.

Se efectuará 15 ensayos Marshall para 6 combinaciones; las 3 primeras para gradación fina y las 3 restantes para gradación gruesa, con el fin de caracterizar de manera efectiva este material, haciendo un total de 90 ensayos.

1.6.1.4 Laboratorios

Para los laboratorios se utilizará el manual de ensayos de suelos y materiales asfálticos de la ABC. Este es un manual Boliviano, el cual adopta muchas de las normas de la AASHTO T-245; por lo mismo cualquier ensayo que se requiera y no se encuentre en el manual de la ABC se acudirá, directamente a la norma AASHTO.

1.6.1.5 Características de los materiales

Procedimiento para el análisis y la interpretación de la información

Se caracterizará el material que vendría a ser el agregado de tipo hormigón, extraído de los residuos de construcción y demolición, realizando los ensayos de Granulometría, Resistencia al desgaste por Abrasión, Peso específico y absorción del agregado, Cubicidad de las partículas, Límites de Atterberg, Afinidad con el asfalto y Ensayo de los sulfatos.

A0602 Método para análisis granulométrico de áridos provenientes de extracciones (AASHTO T-30)

Los equipos y materiales que se utilizarán son:

- Balanza.
- Tamices que cumplan el método A0506.
- Horno.
- Herramientas y accesorios (espátula y escobilla).

1.6.1.6 Demolición del agregado de Residuos de construcción

A0506 Método para tamizar y determinar la granulometría (ASTM E 40 AASHTO T-27-99)

Este método establece el procedimiento para tamizar y determinar la granulometría de los áridos.

Los equipos y materiales que se utilizarán son:

- Balanza.
- Tamices donde las series se indican en la tabla A0506_01.
- Horno.
- Herramientas y accesorios (espátula, brochas, recipientes para secado, recipientes para pesaje).

1.6.1.7 Ensayos Marshall en Mezclas Densas en Caliente

A0613 Método de diseño de Marshall

Los pasos a seguir son:

- Determinar la densidad real seca de cada árido que participa en la mezcla, de acuerdo a los métodos A0519, A0520.
- Determinar la densidad del cemento asfáltico a 25 °C según el método A0102.
- Determinar la densidad máxima suelta según el método A0505, para un contenido de asfalto próximo al óptimo.
- Preparar las probetas según el método A0608.
- Determinar las densidades de las probetas compactadas, según el método A0606.
- Medir la estabilidad y la fluencia de las mezclas usando el equipo Marshall, según el método A0608.

1.6.2 PROCEDIMIENTO DE APLICACIÓN

1.6.2.1 Dosificación

Para la dosificación se empleará el método de diseño Marshall, especificado en la norma ABC. El método de diseño que se expone en esta sección, es el método de diseño Marshall para mezclas asfálticas en caliente convencionales, también se lo denomina “Método Marshall Modificado para el Diseño de Mezclas Densas en caliente”.

1.6.2.2 Preparación para efectuar los procedimientos Marshall

El primer paso en el método de diseño, es determinar las cualidades (estabilidad, durabilidad, impermeabilidad, Trabajabilidad, etc.) que debe tener la mezcla de pavimentación y seleccionar un tipo de agregado y un tipo compatible de asfalto que puedan combinarse para producir esas cualidades. Una vez hecho esto, se puede empezar con la preparación de los ensayos.

El propósito del Método Marshall, es establecer el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados; solo se aplica a mezclas asfálticas (en caliente) de pavimentación que usan cemento asfáltico clasificado con viscosidad o penetración y que contienen agregados con tamaños máximos de 25 mm o menos.

1.6.2.3 Preparación del agregado

La relación viscosidad-temperatura del cemento asfáltico que va a ser usado debe ser ya conocida para establecer las temperaturas de mezclado y compactación en el laboratorio. En consecuencia, los procedimientos preliminares se enfocan hacia el

agregado, con el propósito de identificar exactamente sus características. Estos procedimientos incluyen secar el agregado, determinar su peso específico, y efectuar un análisis granulométrico por lavado.

- **Secado del Agregado**

El Método Marshall requiere que los agregados ensayados estén libres de humedad, esto evita que la humedad afecte los resultados de los ensayos.

Una muestra de cada agregado a ser ensayado se coloca en una bandeja, por separado, y se calienta en un horno a una temperatura de 110° C (230°F). Después de cierto tiempo, la muestra caliente se pesa y se registra su valor.

La muestra se calienta completamente una segunda vez, y se vuelve a pesar y a registrar su valor; este procedimiento se repite hasta que el peso de la muestra permanezca constante después de dos calentamientos consecutivos, lo cual indica que la mayor cantidad posible de humedad se ha evaporado de la muestra.

- **Análisis granulométrico por vía húmeda**

El análisis granulométrico por vía húmeda es un procedimiento para identificar las proporciones de partículas de tamaño diferente en las muestras del agregado. Esta información es importante porque las especificaciones de la mezcla deben estipular las proporciones necesarias de partículas de agregado de tamaño diferente, y así producir una mezcla en caliente final con las características deseadas.

El análisis granulométrico por vía húmeda consta de los siguientes pasos:

1. Cada muestra de agregado es secada y pesada.
2. Luego cada muestra es lavada a través de un tamiz de 0.075 mm (N° 200), para remover cualquier polvo mineral que esté cubriendo el agregado.
3. Las muestras lavadas son secadas siguiendo el procedimiento de calentado y pesado.
4. El peso seco de cada muestra es registrado, la cantidad de polvo mineral puede ser determinada si se comparan los pesos registrados de las muestras antes y después del lavado.

5. Para obtener pasos detallados del procedimiento consultar a la norma AASHTO T 11.

- **Determinación del Peso Específico**

El peso específico de una sustancia es la proporción peso - volumen de una unidad de esa sustancia comparada con la proporción peso - volumen de una unidad igual de agua. El peso específico de una muestra de agregado es determinado al comparar el peso de un volumen dado de agregado con el peso de un volumen igual de agua, a la misma temperatura.

1.6.2.4 Preparación de las muestras (probetas) de ensayo

Las probetas de ensayo de las posibles mezclas de pavimentación son preparadas haciendo que cada una contenga una ligera cantidad diferente de asfalto. El margen de contenidos de asfalto usado en las briquetas de ensayo está determinado con base en la experiencia previa con los agregados de la mezcla. Este margen le da al laboratorio un punto de partida para determinar el contenido exacto de asfalto en la mezcla final. La proporción de agregado en las mezclas está formulada por los resultados del análisis granulométrico.

Las muestras son preparadas de la siguiente manera:

1. El asfalto y el agregado se calientan completamente hasta que todas las partículas del agregado estén revestidas.
2. Las mezclas asfálticas calientes se colocan en los moldes pre-calentados Marshall como preparación para la compactación, en donde se usa el martillo Marshall de compactación, el cual también es calentado para que no enfríe la superficie de la mezcla al golpearla.
3. Las briquetas son compactadas mediante golpes del martillo Marshall de compactación. El número de golpes del martillo (35, 50 o 75) depende de la cantidad de tránsito para la cual está siendo diseñada. Ambas caras de cada biqueta reciben el mismo número de golpes. Así, una probeta Marshall de 35 golpes recibe, realmente un total de 75 golpes. Una probeta de 50 golpes recibe 100 impactos. Después de completar la compactación las probetas son enfriadas y extraídas de los moldes.

1.6.2.5 Procedimiento de ensayo Marshall

Existen tres procedimientos de ensayo en el método del ensayo Marshall, estos son: determinación del peso específico total, medición de la estabilidad Marshall, y análisis de la densidad y el contenido de vacíos de las probetas.

- **Determinación del peso específico total**

El peso específico total de cada probeta se determina tan pronto como las probetas recién compactadas se hayan enfriado a la temperatura ambiente. Esta medición de peso específico es esencial para un análisis preciso de densidad-vacíos. El peso específico total se determina usando el procedimiento descrito en la norma AASHTO T 166.

- **Ensayo de estabilidad y fluencia**

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

El procedimiento de los ensayos es el siguiente:

1. Las probetas son calentadas en el baño de agua a 60° C (140° F). Esta temperatura representa, normalmente, la temperatura más caliente que un pavimento en servicio va a experimentar.
2. La probeta es removida del baño, secada, y colocada rápidamente en el aparato Marshall. El aparato consiste en un dispositivo que aplica a una carga sobre la probeta y de unos medidores de carga y deformación (fluencia).
3. La carga del ensayo es aplicada a la probeta a una velocidad constante de 51 mm (2 pulgadas) por minuto hasta que la muestra falle. La falla está definida como la carga máxima que la briqueta puede resistir.
4. La carga de falla se registra como el valor de estabilidad Marshall y la lectura del medidor de fluencia se registra como la fluencia.

- **Valor de estabilidad Marshall**

El valor de estabilidad Marshall es una medida de la carga bajo la cual una probeta cede o falla totalmente. Durante un ensayo, cuando la carga es aplicada lentamente, los cabezales superior e inferior del aparato se acercan, y la carga sobre la briqueta aumenta al igual que la lectura en el indicador del cuadrante. Luego se suspende la carga una vez que se obtiene la carga máxima. La carga máxima indicada por el medidor es el valor de Estabilidad Marshall.

- **Valor de fluencia Marshall**

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

Las mezclas que tienen valores bajos de fluencia y valores muy altos de estabilidad Marshall son consideradas demasiado frágiles y rígidas para un pavimento en servicio, aquellas que tienen valores altos de fluencia son consideradas demasiado plásticas y tienen tendencia a deformarse bajo las cargas del tránsito.

- **Análisis de densidad y vacíos**

Una vez que se completan los ensayos de estabilidad y fluencia, se procede a efectuar un análisis de densidad y vacíos para cada serie de Probetas de prueba. El propósito del análisis es el de determinar el porcentaje de vacíos en la mezcla compactada.

- **Análisis de vacíos**

Los vacíos son las pequeñas bolsas de aire que se encuentran entre las partículas de agregado revestidas de asfalto. El porcentaje de vacíos se calcula a partir del peso específico total de cada probeta compactada y del peso específico teórico de la mezcla de pavimentación (sin vacíos).

1.7 ALCANCE DEL ESTUDIO

En el presente trabajo se realizará un estudio de Investigación en laboratorio buscando determinar la Evaluación Mecánica de una Mezcla Densa en Caliente, para lo cual se utilizará como Agregado los residuos de Construcción y Demolición de tipo hormigón, con el fin de que pueda ser utilizado como una alternativa nueva en una construcción vial para capas de rodadura, como también un complemento para capas de sub base y base y así evitar la deformación de la superficie de rodamiento.

Así, mediante esta investigación se pretende lograr el uso del agregado de residuos de construcción y demolición como un material componente de una mezcla asfáltica para evitar así la contaminación medio ambiental y la extracción de áridos de los ríos.

Para la obtención del agregado de residuos de construcción y demolición se procederá a la demolición de una columna y así extraer el agregado con la ayuda de un cincel y un combo.

Posteriormente, se realizará 15 ensayos para 6 combinaciones, 3 combinaciones para gradación fina y 3 combinaciones para gradación gruesa haciendo un total de 90 ensayos Marshall para obtener un porcentaje de cemento asfáltico considerable y a la vez observar el comportamiento del agregado junto a esta mezcla asfáltica de tipo convencional.

Inicialmente, el **Capítulo I** contiene una breve introducción de generalidades sobre la "EVALUACIÓN MECÁNICA DE UNA MEZCLA DENSA EN CALIENTE UTILIZANDO COMO AGREGADO RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN ", en donde se define la problemática sobre la que se basa el presente trabajo, un marco teórico, su justificación, los objetivos, diseño metodológico y el alcance de la presente investigación.

Posteriormente, en el **Capítulo II** se menciona todo lo referente a las características de los materiales para mezclas asfálticas, su introducción, características del cemento asfáltico y las características de los agregados, se darán a conocer sus elementos constituyentes tanto en sus características como las exigencias que deben cumplir las mezclas asfálticas en caliente, para construcciones viales. De esta manera, se obtendrá mezclas con las cuales realizar probetas normalizadas que puedan ser sometidas a ensayos mecánicos y permitan comprobar sus aptitudes para la construcción vial.

También se mencionan los ensayos de calidad de los materiales, estos son: ensayos de calidad del cemento asfáltico como ser penetración a 25°C, punto de inflamación, viscosidad Saybolt Furol a 135°C, peso específico y punto de ablandamiento; ensayos de calidad de los agregados como ser de residuos de construcción y demolición y de cantera con su respectiva Granulometría, Resistencia al desgaste por Abrasión, Peso específico, cubicidad de las partículas y muchos otros.

En el **Capítulo III** se muestra la combinación de los agregados, propiedades consideradas en el Diseño de mezclas asfálticas y el ensayo de las características de las mezclas asfálticas. Por lo tanto, luego del análisis de los resultados obtenidos de los trabajos de laboratorio, se determinará cuáles son las fuentes locales que proveen agregados de calidad apropiada y de esa manera, obtener características deseadas en las mezclas asfálticas en caliente.

Las mezclas en caliente, para la pavimentación, son consideradas desde hace mucho tiempo por los investigadores viales, como el primer producto disponible a bajo costo, resultando ser en América el material más popular para la pavimentación.

Además, este capítulo contiene la información más reciente de diseños de mezclas en caliente, efectuados con agregados combinados de cantera y a su vez con agregados de

residuos de construcción y demolición, para satisfacer las demandas modernas de las condiciones de tráfico y asegurar al máximo los rendimientos del pavimento flexible.

El presente proyecto de grado presenta una información de:

- ✓ Caracterización de la calidad de los agregados.
- ✓ Diseño de mezclas de tipo concreto asfáltico.
- ✓ Elaboración de mezclas asfálticas con gradación fina y gradación gruesa.
- ✓ Fabricación de mezclas asfálticas con agregados de diferentes bancos.

Por lo tanto, un conocimiento de la evaluación y calidad de los agregados de la región y agregados de residuos de construcción y demolición orientan a obtener un buen terminado en la carpeta asfáltica y de esa manera, proteger la estructura entera del pavimento asfáltico.

Finalmente en el **Capítulo IV** se expondrán las conclusiones que están en función a los resultados obtenidos; además se mencionará recomendaciones referentes al tema, indicando que el presente estudio está dirigido a ofrecer a todas las personas una información técnica de las propiedades del método Marshall y un conocimiento de la calidad de los agregados de cantera para la elaboración de las mezclas asfálticas; y lo novedoso del presente estudio es la combinación de los agregados de residuos de construcción y demolición y como influyen en las propiedades Marshall.

Los **Anexos** incluyen todos los ensayos realizados como del cemento asfáltico, de los agregados tanto de cantera como de residuos de construcción y demolición y, por último, el ensayo de las mezclas asfálticas en caliente con sus respectivas combinaciones y porcentajes óptimos.

CAPÍTULO II

CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS

2.1 INTRODUCCIÓN

Entre los materiales normalmente utilizados para pavimentos asfálticos se tiene: cemento asfáltico, agregado grueso, agregado fino y filler, que pueden ser naturales e industriales. La selección y uso de estos materiales debe basarse en las investigaciones y experiencias de la persona responsable del control de las mezclas asfálticas, también se debe considerar la recepción y almacenamiento de los cementos asfálticos y agregados, para que estos no pierdan sus características.

Para el presente proyecto se utilizará materiales existentes como ser los agregados naturales de cantera y los residuos de construcción y demolición que deban cumplir ciertas especificaciones técnicas de calidad que se desarrollarán más adelante. Como las propiedades del agregado juegan un rol central en la deformación permanente, es importante conocer sus características.

Es necesario que los asfaltos de petróleo usados en la construcción de pavimentos sean asfaltos uniformes y cumplan los requerimientos de calidad. El asfalto a utilizar tiene un grado de penetración de 85-100. También se realizará un análisis investigativo, sobre los costos de los materiales que constituyen una gran porción del costo total del proyecto; por lo que es esencial minimizarlos tanto como sea posible, y hacer uso efectivo del asfalto y agregados disponibles que existe en nuestra región.

Por lo tanto, es importante conocer y realizar la evaluación de los agregados con los que se cuenta, y a su vez analizar cómo afectan en el diseño de mezclas asfálticas en caliente, para luego con esta información determinar cuáles son las fuentes locales que proveen agregados de calidad apropiada para realizar las mezclas y, a su vez, cumplan con las especificaciones.

Una prioridad importante en nuestro departamento es el desarrollo de los sistemas de comunicación y transporte de carreteras pavimentadas, siendo la necesidad básica un sistema adecuado de caminos, que garanticen su durabilidad durante su periodo de vida. *(Según se establece en el libro de Pavimentos del Ing. Goretti de Motta)*

2.2 CARACTERÍSTICAS DEL CEMENTO ASFÁLTICO

Según la definición de la American society for Testing and Materiales (ASTM) define el asfalto como un material ligante de color marrón oscuro a negro, constituido

principalmente, por betunes que pueden ser naturales u obtenidos por refinación del petróleo.

El asfalto de petróleo es un residuo bituminoso de petróleo crudo, que queda después que se han quitado sus componentes ligeros a través de una destilación atmosférica y al vacío. Para algunos tipos de asfaltos crudos se necesitan otros procesos para la obtención de todos los tipos de asfaltos de petróleo.

El asfalto (betumen) es usado como ligante en construcción de carreteras, el proceso más común del asfalto es calentarlo de 100-200°C hasta fluidificarlo, para luego ser mezclado con agregados y obtener así el concreto asfáltico.

La consistencia de los cementos asfálticos se da en términos de penetración, que se indica por la distancia que una aguja estándar penetra una muestra de cemento asfáltico bajo condiciones conocidas de carga, tiempo y temperatura. El grado más blando comúnmente usado para pavimentos es el de penetración 200-300, y el más duro es 60-70; pero el 85-100 es el más usado.

El betún, según la ASTM, es una sustancia ligante (sólida, semisólida o viscosa) oscura o negra, natural o artificial, compuesta principalmente por hidrocarburos de alto peso molecular, como los asfaltos, alquitranes, breas y asfaltitas. Un asfalto con flujo o sin flujo, debe ser especialmente preparado en cuanto a calidad y consistencia para ser usado directamente en la producción.

Como se mencionó anteriormente, el asfalto o cemento asfáltico es un material negro, cementante, que varía ampliamente en consistencia entre sólido y semisólido, a temperaturas ambientales normales. Cuando se calienta lo suficiente, el asfalto se ablanda y se vuelve líquido, lo cual le permite cubrir las partículas de agregado durante la producción de la mezcla. (*Propiedades Mecánicas de Mezclas en caliente con áridos de RCD de la Ing. Ana María Rodríguez Pasandín*)

2.2.1 Propiedades del cemento asfáltico

El asfalto es una material de particular interés para el ingeniero, porque es un aglomerante resistente, muy adhesivo, altamente impermeable y duradero. Es una sustancia plástica que da flexibilidad controlable a las mezclas de áridos con los que se combina usualmente. Además, es altamente resistente a la mayor parte de los ácidos, álcalis y sales. Aunque es una sustancia sólida o semisólida a temperaturas atmosféricas ordinarias, puede licuarse fácilmente por aplicación de calor.

El asfalto usado en pavimentación, generalmente llamado cemento asfáltico, es un material viscoso (espeso) y pegajoso. Se adhiere fácilmente a las partículas de agregado y, por lo tanto, es un excelente cemento para unir partículas de agregado en un pavimento de mezcla en caliente. Cuando no son en su práctica totalmente solubles en sulfuro de carbono, reciben el nombre de asfaltos, si la solubilidad es prácticamente total, se denomina betunes asfálticos.

(El asfalto: clases tipos y usos diversos en la industria por Ing. Ricardo Enrique Bisso).

El asfalto cambia cuando es calentado y/o envejecido, tiende a volverse duro, frágil y también a perder parte de su capacidad de adherirse a las partículas de agregado. Estos cambios pueden ser minimizados si tenemos conocimiento de sus propiedades que son:

Propiedades Físicas

Para los estudios técnicos y la construcción, el cemento asfáltico debe presentar las siguientes propiedades físicas:

- Durabilidad
- Adhesión y Cohesión
- Susceptibilidad a la temperatura
- Envejecimiento
- Consistencia
- Pureza

(El asfalto: clases tipos y usos diversos en la industria por Ing. Ricardo Enrique Bisso)

Durabilidad

Se define a la durabilidad como la capacidad de un asfalto de mantener sus características originales cuando es expuesto a procesos normales de degradación y envejecimiento. El diseño de una mezcla asfáltica, las características de los agregados, cambios atmosféricos, la mano de obra y otras variables influyen en el comportamiento y, por lo tanto, afecta en la durabilidad del cemento asfáltico.

Adhesión y cohesión

La adhesión es la capacidad del cemento asfáltico para adherirse al agregado en la mezcla de pavimentación. La cohesión es la capacidad del asfalto de mantener firmemente, en su puesto, y no provoque el desplazamiento de las partículas de agregado en el pavimento terminado.

Dentro de la literatura especializada, se ha podido establecer que el deterioro prematuro y el envejecimiento de los pavimentos flexibles se deben, en muchos casos, a una falta de afinidad o de adherencia entre los agregados finos utilizados y cemento asfáltico disponible.

Para conseguir que el betún envuelva completamente los áridos es necesario eliminar el agua de su superficie y reducir la viscosidad del ligante para que moje perfectamente los áridos, en la práctica cuando se emplea ligantes de alta viscosidad, áridos secos, de textura rugosa, y se aporta una elevada energía durante el proceso de mezclado, se consigue una buena envuelta y adhesividad pasiva suficiente para resistir el desplazamiento del betún por los efectos del agua y el tráfico vehicular.

Por tanto, la adhesividad árido-ligante es un fenómeno muy complejo, que depende de la naturaleza tanto del árido como del betún asfáltico, así como de las condiciones específicas de estos materiales en la obra (limpieza, contenido de humedad del árido, temperatura del mezclado, etc.)

De esta manera, para obtener pavimentos de buena calidad y durables en el transcurso de su vida útil, se emplean ligantes de alta viscosidad, áridos secos de textura rugosa, con un porcentaje bajo al desgaste por abrasión y se aporta una elevada energía durante el proceso de mezclado, así se consigue una buena envuelta y una adhesividad pasiva suficiente para resistir el desplazamiento del betún por los efectos combinados del agua y del tráfico.

(El asfalto: clases tipos y usos diversos en la industria por Ing. Ricardo Enrique Bisso)

Susceptibilidad a la temperatura

Los cementos asfálticos son materiales termoplásticos y para caracterizarlos es necesario conocer la susceptibilidad a distintas temperaturas, que se vuelven más duros (más viscosos), a medida que su temperatura disminuye, y al calentarlos gradualmente se ablandan (menos viscosos).

Esta propiedad es muy importante en los cementos asfálticos, la susceptibilidad a la temperatura varía entre asfaltos de petróleo de diferentes orígenes, aun si los asfaltos tienen el mismo grado de consistencia.

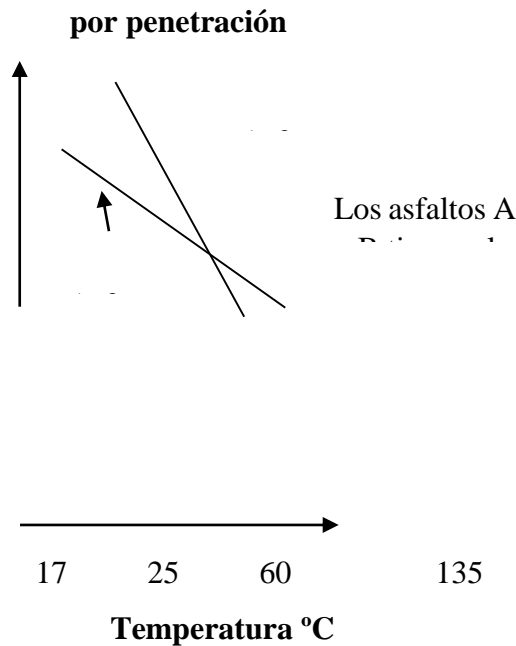
Los asfaltos presentan un comportamiento reológico del tipo visco elástico, a bajas temperaturas y cortos tiempos de aplicación de las cargas se comportan como sólidos

elásticos; por otro lado, a altas temperaturas y cargas prolongadas como líquidos viscosos.

El comportamiento visco elástico tiene una incidencia preponderante en muchos aspectos de la performance de un pavimento, entre los que podemos citar a las deformaciones y las figuraciones.

(El asfalto: clases tipos y usos diversos en la industria por Ing. Ricardo Enrique Bisso)

Figura 2.1 **Variación de la viscosidad con temperatura de dos asfaltos graduados**



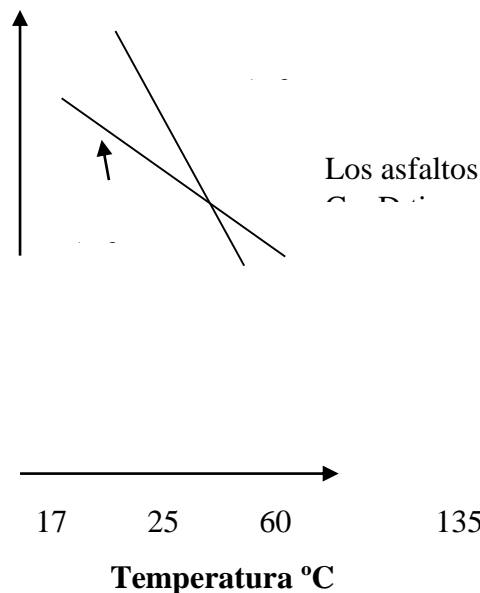
Fuente: *Colocación de Mezclas Asfálticas en caliente (Ing. Pablo E. Bolzan)*

La susceptibilidad a la temperatura de dos asfaltos se ilustra en la figura 2.1, asfalto A y asfalto B, provenientes de crudos de diferente origen pero que presentan el mismo grado de penetración a 25°C (77°F), obsérvese que la viscosidad de los dos asfaltos es la misma. Sin embargo, a cualquier otra temperatura las viscosidades son diferentes, esta variación de los asfaltos se debe a que presenta cada uno diferente susceptibilidad a la temperatura que fue sometido.

También ocurre con dos asfaltos provenientes de crudos de diferente origen pero que tienen el mismo grado de viscosidad como se muestra en la figura 2.2; por ejemplo, se muestra que el asfalto C y el asfalto D tienen la misma viscosidad a una temperatura de 6°C (140°F).

Sin embargo, a cualquier otra temperatura las viscosidades son diferentes. Se puede concluir que existen cementos asfálticos derivados de crudos de diferente procedencia con variado grado de susceptibilidad a la temperatura.

Figura 2.2 **Variación de la viscosidad con temperatura de dos asfaltos graduados por viscosidad**



Fuente: Colocación de Mezclas Asfálticas en caliente (Ing. Pablo E. Bolzan)

Es muy importante conocer la susceptibilidad a la temperatura del cemento asfáltico para conocer la temperatura adecuada en la cual se debe mezclar el agregado con el asfalto y, posteriormente, realizar la compactación en la plataforma ya definida.

El asfalto debe tener suficiente fluidez a altas temperaturas para que pueda cubrir las partículas de agregado durante el proceso de mezclado, y así permitir que estas partículas se desplacen unas respecto de otras durante la compactación.

Luego a temperaturas ambientales normales deberá volverse lo suficientemente viscoso como para mantener unidas las partículas del agregado.

Envejecimiento

Se define “envejecimiento” al nombre genérico dado a una serie de cambios en las propiedades de los materiales, que ocurren durante periodos de tiempo más o menos largos y que originan la degradación parcial o total de los mismos.

Los betunes asfálticos presentan una gran resistencia al envejecimiento como consecuencia de su naturaleza, fundamentalmente hidrocarbonada de baja reactividad, pero durante su manipulación y periodo de servicio están sometidos a una serie de factores y agentes externos que originan cambios en su composición y repercuten negativamente sobre sus propiedades.

Desde el momento que los betunes asfálticos salen de las refinadoras, están sometidos a diferentes procesos de envejecimiento, así por ejemplo: Considerar el envejecimiento producido durante el transporte en las cisternas y su posterior almacenamiento en los tanques de las plantas asfaltadoras. Otro factor principal es la temperatura durante el proceso de mezclado con los agregados, es decir, el ligante es sometido a temperaturas elevadas desde el momento que sale de la planta de mezclado, pues es transportada en las volquetas para su posterior compactación, finalmente, se debe considerar el oxígeno al cual es expuesta.

Durante el periodo de servicio, la mezcla asfáltica se encuentra expuesta a los efectos de agentes atmosféricos (radiación solar, oxígeno ambiental, agua, cambios de temperatura, microorganismos, etc.), y la contaminación del tráfico vehicular los cuales arrojan lubricantes y carburantes en la plataforma. El oxígeno ambiental reacciona con los compuestos más reactivos del betún, dando lugar a reacciones de oxidación, deshidrogenación, condensación y polimerización, lo que provoca alteraciones en su composición química.

Estas variaciones de composición química y estructura coloidal se traducirá en un endurecimiento del betún asfáltico (disminución de la penetración, aumento del punto de reblandamiento A y B, aumento de la fragilidad, etc.), y en una pérdida del poder aglomerante. El envejecimiento es un fenómeno físico-químico muy complejo, que consiste fundamentalmente en una pérdida de los componentes más volátiles y en un proceso de oxidación; por tanto, depende de la composición y estructura química del betún y de otros parámetros inherentes a la mezcla bituminosa (huecos de la mezcla, espesor de la película de betún, etc.), así como de las condiciones ambientales (temperatura, humedad, etc.)

Existen varios métodos de simulación para realizar el envejecimiento y poder cuantificar los betunes asfálticos como son:

- Pérdida por calentamiento de los materiales bituminosos.

- Efecto del calor y del aire sobre los materiales bituminosos en película fina y rotatoria.
- Envejecimiento acelerado en intemperímetros.

(El asfalto: clases tipos y usos diversos en la industria por Ing. Ricardo Enrique Bisso)

Consistencia

La consistencia es el término usado para describir el grado de fluidez o plasticidad del asfalto a cualquier temperatura dada; para poder comparar la consistencia de un cemento asfáltico con la de otro es necesario fijar una temperatura de referencia. La clasificación de los cementos asfálticos se realiza en base al valor de la consistencia a una temperatura de referencia.

El cemento asfáltico en películas delgadas si se expone al aire y se lo somete a un calentamiento prolongado, como por ejemplo durante el mezclado con el agregado, tiende a endurecer, y a aumentar su consistencia. Por lo tanto, un control no adecuado de la temperatura y del mezclado puede provocar mayor daño al cemento asfáltico, por endurecimiento; comúnmente para especificar y medir la consistencia de un asfalto para pavimento se usan ensayos de viscosidad o ensayos de penetración.

(El asfalto: clases tipos y usos diversos en la industria por Ing. Ricardo Enrique Bisso)

Pureza

El cemento asfáltico se compone, casi enteramente de betunes, los cuales por definición, son solubles en bisulfuro de carbono. Los asfaltos refinados son generalmente más del 99.5% solubles en bisulfuro de carbono y, por lo tanto, son casi betunes puros, las impurezas si las hay son inertes. Normalmente el cemento asfáltico, cuando deja la refinería, está libre de agua o humedad, pero puede haber humedad en los tanques de transporte.

Si hay agua inadvertida, puede causar espumas al asfalto cuando se calienta por encima de los 100 °C.

(El asfalto: clases tipos y usos diversos en la industria por Ing. Ricardo Enrique Bisso)

Propiedades Químicas

El asfalto tiene propiedades químicas únicas que lo hacen muy versátil como material de construcción de carreteras. Los técnicos de asfaltos y los diseñadores de pavimentos

han aprendido a identificar y caracterizar estas propiedades y a usarlas dentro de la estructura del pavimento, en la forma más ventajosa posible.

Una breve introducción de las propiedades más importantes ayudará al inspector a entender la naturaleza de los pavimentos de mezclas en caliente.

Debe observarse que casi ningún sistema de clasificación de asfaltos menciona la composición química. Esto puede parecer sorprendente, debido a que la composición química es ciertamente uno de los medios usados para identificar las propiedades de cualquier sustancia. Sin embargo, existen varias razones por las cuales la química no ha llegado a ser parte de los sistemas de clasificación:

-En la actualidad no hay una prueba normal para analizar la composición química de los asfaltos que sea aceptada mutuamente por los vendedores, los compradores y los usuarios.

-Los ensayos existentes para analizar composiciones químicas requieren de equipos sofisticados que no están disponibles en la mayoría de los laboratorios de asfaltos.

(El asfalto: clases tipos y usos diversos en la industria por Ing. Ricardo Enrique Bisso)

El asfalto, cuando es disuelto en un solvente como el heptano, puede separarse en dos partes principales: asfáltenos y máltenos.

Los asfáltenos no se disuelven en el heptano, los asfáltenos una vez separados de los máltenos, son usualmente de color negro o pardo oscuro y se parecen al polvo grueso de grafito, los asfáltenos le dan al asfalto su color y dureza.

Los máltenos se disuelven en el heptano, son líquidos, viscosos y compuestos de resinas y aceites. Las resinas son, por lo general, líquidos pesados de color ámbar o pardo oscuro, mientras que los aceites son de color más claro. Las resinas proporcionan las cualidades adhesivas (pegajosidad) en el asfalto, mientras que los aceites actúan como un medio de transporte para los asfáltenos y las resinas.

2.2.2 Clasificación de los cementos asfálticos

La clasificación de los cementos asfálticos se presenta a continuación:

Tabla 2.1 **Clasificación de los asfaltos**

Clasificación general	Sub-clasificación	Tipos	Penetración a 25°C, 100 gr., 5 seg.
		AC-2.5	220

Cemento Asfáltico	Viscosidad	AC-5	140
		AC-10	80
		AC-20	60
		AC-30	50
		AC-40	40
	Viscosidad después del envejecimiento	AR-10	55
		AR-20	40
		AR-40	25
		AR-80	20
		AR-160	20
	Penetración	40-50	40-50
		60-70	60-70
		85-100	85-100
		120-150	120-150
		200-300	200-300

Fuente: Manual de ensayo para laboratorio de asfalto (A.B.C.)

Este sistema es el más usado de clasificación en nuestro medio, es el basado en la Penetración del asfalto y pueden clasificarse bajo tres tipos generales como se indica en la tabla, por lo tanto, el estudio se centrará en estos tipos de asfaltos.

2.2.3 Especificaciones técnicas de los cementos asfálticos

Comercialmente se disponen de cementos asfálticos en varios rangos de consistencia normalizados (grados). Hasta hace poco, estos rangos se basaban solamente en mediciones hechas con el ensayo de Penetración; se disponía de cementos asfálticos de cinco grados: 40-50, 60-70, 85-100, 120-150 y 200-300, que indicaban los rangos permitidos de Penetración para cada uno. El más blando (200-300) es moderadamente firme a temperatura ambiente; a esta temperatura, una presión suave con el dedo marca la superficie de la muestra. El más duro (40-50) es de una consistencia que permite sólo una ligera impresión del pulgar, hecha bajo firme presión, a temperatura ambiente.

Normalmente, los asfaltos de bajo grado de viscosidad corresponden a los asfaltos blandos de alto valor de Penetración. Por el contrario, los asfaltos de alta viscosidad corresponden a los asfaltos duros o de bajo grado de Penetración. Sin embargo, esto no necesariamente se cumple en todos los casos.

La siguiente tabla de especificaciones para cementos asfálticos es proporcionada por la Administradora Boliviana de Carreteras "A.B.C.", mostrando la división de geología y geotécnica del Laboratorio Central.

Tabla 2.2 Especificaciones para cementos asfálticos

ENSAYOS	MÉTODO AASHTO	CA 60-70		CA 85-100		CA 120-250	
		Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Densidad a 25 °C	T-228	1.00	1.05	1.00	1.05	1.00	1.05
Penetración a 25°C, 100 gr., 5 seg. (0.1 mm.)	T-49	60	70	85	100	120	150
Viscosidad Saybolt Furol a 135°C	T-72	100		85		70	
Cinemática Centistokes	T-201	200		170		140	
Punto de Ablandamiento °C	T-53	45	55	43	53	35	45
Ductilidad a 25°C, 5cm/min (cm)	T-51	100		100		100	
Punto de Inflamación, copa abierta (°C)	T-48	232		232		218	
Índice de Penetración de pfeiffer		-1.00	1.00	-1.00	1.00	-1.00	1.00
Ensayo Película delgada 3.2 mm 163°C Perdida por Calentamiento (%)	T-179		0.80		1.00		1.30
Penetración del Residuo (% del original)	T-49	54		50		46	
Ductilidad del Residuo	T-51	50		75		100	
Ensayo de la mancha con hep/xill (% de xifol)	T-102		20		20		20

Fuente: Manual de ensayo para laboratorio de asfalto (A.B.C.)

El asfalto se prepara por destilación del petróleo y será uniforme en su naturaleza, por lo que, formará espuma al calentar a 177 °C.

2.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS AGREGADOS

Ya que la calidad y gradación de los agregados tienen un efecto importante en las propiedades del pavimento, el tipo de agregado debe ser considerado cuidadosamente, pues las propiedades varían según el lugar de producción. La calidad y gradación del agregado mostrados en el presente trabajo de investigación indican los niveles

recomendables, así la selección apropiada del agregado depende esencialmente del propósito de su aplicación, tomando en cuenta los factores económicos; por lo que, el agregado usado debe tener una buena adhesión a los materiales bituminosos. El agregado debe ser almacenado separadamente, de acuerdo al tipo, para evitar que se mezcle con los demás, o se contamine con polvo o lodo.

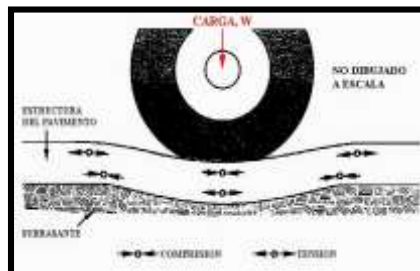
2.3.1 Propiedades de los Agregados

Agregado también conocido como roca, material granular, o agregado mineral, es cualquier material mineral duro e inerte (incapaz de reacción), usado en forma de partículas graduadas o fragmentos, como parte de un pavimento de mezcla asfáltica en caliente. Los agregados típicos incluyen arena, grava, piedra triturada, escoria y polvo de roca; los áridos constituyen en un porcentaje en general superior al 90% de la mayoría de los casos.

En la capa superior de un pavimento asfáltico, donde se concentra las cargas de las ruedas y las tensiones elevadas, se requiere agregados de alta calidad para lograr una mezcla fuerte y de buen comportamiento como se observa en la figura. Por tanto, los agregados minerales son los principales responsables de la capacidad de carga del pavimento, además el agregado influye notablemente en el comportamiento del pavimento.

La calidad final de los áridos y, por tanto, su aptitud dependen de la naturaleza petrológica de los mismos, pero también en gran medida de su proceso de preparación, aunque en fase de proyecto se suelen evaluar las posibles procedencias de áridos.

Figura 2.3 **Tensión de tracción y compresión resultado de la deflexión de la estructura del pavimento**



Fuente: Deterioros en capas asfálticas: Fisuración (Mg.Ing. Fernando Martínez)

Las mezclas asfálticas requieren de áridos resistentes y estables, es decir bajo valores de desgaste de los Ángeles, de alta resistencia al pulimento, buena forma (limitación en lajas y agujas), y un alto porcentaje de caras fracturadas. Áridos finos por su calidad de fracción fina son muy importantes, además, debido a su bajo contenido en mezcla, sus características son muy críticas en la cohesión del conjunto.



Agregado grueso natural de canteras

Fuente: Elaboración propia

La importancia técnica y económica de los áridos en la construcción de carreteras es de tal magnitud que el resultado final de la obra estará fuertemente condicionada por la selección de los áridos. *(Propiedades Mecánicas de Mezclas en caliente con áridos de RCD de la Ing. Ana María Rodríguez Pasandín)*

2.3.2 Tipos de agregados utilizados en mezclas asfálticas

Agregado grueso

Los agregados gruesos son partículas grandes, de aproximadamente 2.5 mm. (0.1 plg.). Normalmente son obtenidos de rocas trituradas o de gravas trituradas y zarandeadas.

Piedra triturada

El material bruto para piedra triturada debe provenir de roca dura, como la arenisca, basalto, piedra caliza u otra piedra de calidad equivalente, o piedra de canto rodado con un tamaño de partícula de por lo menos tres veces más grande que el tamaño máximo requerido para el producto final. El producto triturado puede ser tamizado para obtener

el tamaño del agregado deseado, algunas veces por razones de economía, el material triturado es usado tal como se lo produce con un ligero tamizado o sin él. Este agregado se lo denomina agregado “triturado sin cribar”, en muchas oportunidades pueden utilizarse en la construcción de pavimentos asfálticos.

Las piedras trituradas deben tener uniformidad, limpieza, dureza y durabilidad suficiente, y estar libres de una cantidad perjudicial de partículas planas o alargadas, sucias con barro o con materiales orgánicos y otras sustancias perjudiciales.

Grava triturada

La Grava triturada son piezas trituradas de canto rodado o grava adecuadas para su uso en mezclas asfálticas en la pavimentación, la calidad puede ser mejorada por medio de la trituración, al cambiar la textura superficial de las partículas redondeadas en partículas angulosas; con mejoras además, en la distribución o rangos de tamaño de las partículas.

Las porciones de las partículas tienen una o más caras fracturadas, contando, por lo menos, con el 40% en peso del total de partículas retenidas en un tamiz de 4.75 mm; sin otro procesamiento este producto de grava triturada o chancada se llama “triturado sin cribar”.

(Propiedades Mecánicas de Mezclas en caliente con áridos de RCD de la Ing. Ana María Rodríguez Pasandín)

Agregado fino

Los agregados finos, presentan tamaños menores de aproximadamente a 2.5 mm. (0.1 plg.), son obtenidos de arena natural o proveniente de las fracciones finas, obtenidas por zarandeo en las operaciones de trituración de rocas o de gravas trituradas, los áridos finos son aquellos que pasan el tamiz N°8.

Arena

La arena se clasifica en: arena natural, arena artificial, polvo de trituración y arena especial. La arena natural se clasifica por el lugar de excavación en: arena de río, arena de cantera y arena de mar. La arena artificial es producida por la trituración de roca o piedra de canto rodado; las arenas son partículas rocosas que pasan el tamiz N°4 y quedan retenidas en el N°200; y dentro de estas se encuentran las arenas finas, es el material que pasa el tamiz N°40 y queda retenido en el tamiz N°200; y el material que pasa el tamiz N°10 y retenido en el tamiz N°40 se consideran arenas gruesas. Las

partículas que pasan el tamiz N°8 o menos, y se obtienen durante la producción de piedra triturada, se mencionan como “polvo de trituración”.

Tabla 2.3 (a): **Grados estándar del polvo de trituración**

Polvo de Trituración						
Tamiz	N°4	N°8	N°20	N°50	N°100	N°200
% que pasa	100	85-100	25-55	15-40	7-28	0-20

Fuente: Manual de ensayo para laboratorio de asfalto (A.B.C.)

Filler

Producto mineral finamente dividido del que al menos el 65% pasa por el tamiz N°200. La piedra caliza pulverizada es el filler más frecuentemente empleado, aunque pueden utilizarse también otros polvos de piedras, cal apagada, cemento Portland y algunas sustancias muy finas y otros de origen volcánicas. El filler aumenta en muchos casos la estabilidad y la calidad de una mezcla, ayudando en la aportación de agregado fino cuando se utilizan gradaciones cerradas o densas, en estos casos es frecuente el empleo principalmente del polvo mineral (Porción de los áridos finos que pasa el tamiz N°200), y otros fillers.

Tabla 2.3 (b): **Grados estándar del filler mineral**

Filler Mineral			
Tamiz	N°30	N°100	N°200
% que pasa	100	90-100	65-100

Fuente: Manual de ensayo para laboratorio de asfalto (A.B.C.)

El polvo mineral es usado principalmente como filler para la mezcla de asfalto en caliente, es la parte de los áridos que pasa el tamiz N°200, puede consistir en partículas finas de los áridos finos o gruesos y/o filler mineral. El filler se produce triturando piedra caliza, roca volcánica, y debe contener menos del 1% de agua y estar libre de aglomerados, no contendrá sustancias orgánicas ni partículas de arcilla.

Cuando se almacena el filler mineral, se debe evitar cualquier contacto con agua o humedad, porque se vuelve inservible cuando está mojado. La cal apagada, el cemento Portland y otros productos procesados industrialmente se pueden usar a veces como

fillers minerales en mezclas asfálticas para evitar el desarrollo de agrietamientos en el pavimento.

2.3.3 Especificaciones de los agregados

Los agregados deben satisfacer las especificaciones a continuación detalladas:

Naturaleza e identificación: es evaluación de la naturaleza petrográfica de los áridos, grado de alteración de los componentes minerales, porosidad y propiedades químicas.

Propiedades geométricas: básicamente la forma y angulosidad de las partículas con relación al conjunto total del mineral se estudia la distribución granulométrica, cuando se utilice grava o canto rodado triturados, se debe tener un porcentaje no menor de un 75% en peso de las partículas retenidas por el tamiz N°4, el cual deberá tener por lo menos una cara fracturada.

Propiedades Mecánicas: engloban los parámetros básicos de resistencia al desgaste y al pulimento. En este caso, el agregado grueso debe estar constituido de fragmentos limpios, sanos, duros, durables, libres de terrones de arcilla y sustancias nocivas y deberán tener un porcentaje de desgaste los Ángeles no mayor al 40%.

Ausencia de impurezas: es fundamental que los áridos a emplear en las mezclas asfálticas estén libres de impurezas para garantizar el buen comportamiento del pavimento, los áridos sucios pueden ser causas más que suficiente para provocar la degradación de una carretera para esto se realiza el ensayo de equivalente de arena; de acuerdo al método ASSHTO T-176 se recomienda que deberá ser mayor a 45%.

Inalterabilidad: es imprescindible la evaluación de las posibles degradaciones que pueden sufrir los áridos una vez puestos en obra, el agregado grueso al ser sometido a tres ensayos alternativos de resistencia mediante sulfato de sodio, empleando el método AASTHO T-104, no podrá tener una pérdida de peso mayor del 12%, por lo tanto, los materiales han de ser empleados con especiales precauciones para evitar comportamientos anómalos que puedan afectar a la vida útil de las capas.

Adhesividad: los áridos han de ser afines con los ligantes que se vayan a emplear y en caso de problemas será necesario el uso de activantes para garantizar el buen comportamiento de las mezclas en caliente. Se considera que no existe suficiente adherencia si el porcentaje de cubrimiento es inferior a 95% cuando se realice la prueba AASTHO T-182 con una temperatura del 35%.

(El asfalto: clases tipos y usos diversos en la industria por Ing. Ricardo Enrique Bisso)

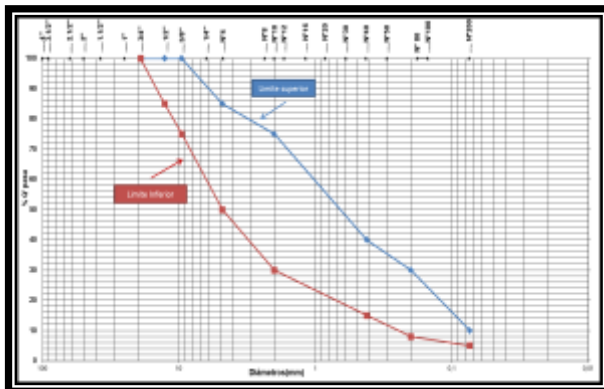
No plástico: cuando se utilice filler mineral se compondrá de partículas muy finas de caliza, cal apagada, cemento Portland, u otras sustancias mineral no plástica. Deberá estar perfectamente seco y no contendrá grumos.

Tabla 2.4 (a): **Composición de la gradación para la mezcla (Gradación fina)**

Designación de Tamices	Gradación de los agregados		
	A	B	C
3/4"	100 - 100	100 - 100	-
1/2"	85 - 100	85 - 100	100 - 100
3/8"	75 - 100	-	85 - 100
Nº4	50 - 85	65 - 80	65 - 80
Nº10	30 - 75	46 - 62	46 - 62
Nº40	15 - 40	21 - 34	21 - 34
Nº80	8 - 30	12 - 22	12 - 22
Nº200	5 - 10	3 - 10	3 - 10

Fuente: Manual de ensayo para laboratorio de asfalto (A.B.C.)

Figura 2.4 Representación de la gradación fina de los agregados tipo "A"



Granulometría Fina “A”

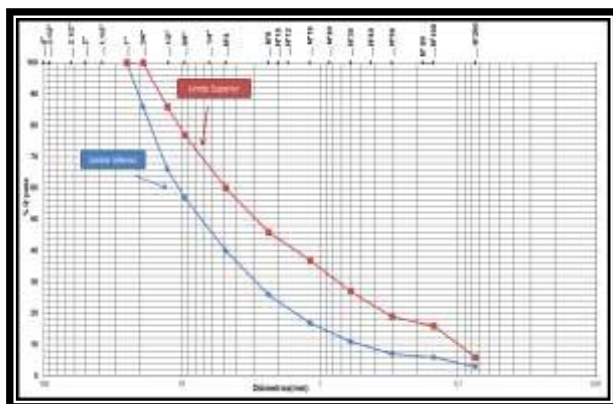
Fuente: Diseño de Mezclas Asfálticas (Ing.S.Minaya & A.Ordoñez)

Tabla 2.4 (b): Composición de la gradación para la mezcla (Gradación gruesa)

Designación de Tamices	Gradación de los agregados		
	A	B	C
1"	100 - 100	-	-
3/4"	86 - 100	100 - 100	-
1/2"	66 - 86	75 - 100	100 - 100
3/8"	57 - 77	60 - 85	75 - 100
Nº4	40 - 60	35 - 55	35 - 55
Nº8	26 - 46	20 - 35	20 - 35
Nº16	17 - 37	-	-
Nº30	11 - 27	10 - 22	10 - 22
Nº50	7 - 19	6 - 16	6 - 16
Nº100	6 - 16	4 - 12	4 - 12
Nº200	3 - 6	2 - 8	2 - 8

Fuente: Manual de ensayo para laboratorio de asfalto (A.B.C.)

Figura 2.5 Representación de la gradación gruesa de los agregados tipo “A”



Granulometría Gruesa “A”

Fuente: Diseño de Mezclas Asfálticas (Ing.S.Minaya & A.Ordoñez)

2.4 AGREGADOS DE RESIDUOS DE CONSTRUCCION Y DEMOLICION (RCD)

Los RCD se conocen habitualmente como “escombros”. Se generan en grandes cantidades y su volumen supera al de origen doméstico. Su poder contaminante es bastante bajo. Por el contrario, su impacto visual es con frecuencia alto, debido tanto al gran volumen que ocupan, como al escaso control ambiental ejercido sobre los terrenos elegidos para su depósito. Un segundo impacto ecológico negativo se deriva del despilfarro de materias primas, con el fin de colaborar con el desarrollo sostenible, se investiga en la presente tesis la utilización de áridos ligados con hormigón procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD) para la fabricación de mezclas en caliente para capas de base de firmes de carreteras.

- ✓ Residuos procedentes de la construcción, rehabilitación y demolición de obras de edificación (se incluye la reparación domiciliaria y se excluyen las tierras de excavación).
- ✓ Residuos procedentes de la construcción, rehabilitación y demolición de obras de ingeniería civil (ferrocarriles, carreteras, puentes, viaductos, obras hidráulicas, obras marítimas, obras portuarias, obras geotécnicas.)

Gestión de los R.C.D

Como se ha comentado anteriormente, hay algunos materiales y sustancias que forman parte de los RCD que pueden tener alguna característica de peligrosidad. No obstante, mediante una adecuada recogida selectiva en origen, la gran mayoría pueden considerarse inertes o equiparables a inertes, por lo que su poder contaminante es escaso.

Reducción en la producción de residuos como medida preventiva. Se trata tanto de limitar la generación de residuos como de disminuir la cuantía de sustancias peligrosas o contaminantes presentes en ellos.

- **Reutilización de los residuos con un pequeño tratamiento específico.** - En este caso el producto se utiliza con el mismo fin para el que fue originalmente concebido.
- **Reciclado de los residuos tras un tratamiento.** - Los residuos se someten a una transformación dentro de un proceso de producción para poder ser utilizados nuevamente, tanto para el mismo fin para el que fueron concebidos como para fines diferentes.
- **Revalorización o valorización energética de los residuos o cualquier otra forma de valorización no incluida en las etapas anteriores.**- La Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados, define el término valorización como “cualquier operación cuyo resultado principal sea que el residuo sirva a una finalidad útil al sustituir a otros materiales, que de otro modo se habrían utilizado para cumplir una función particular, o que el residuo sea preparado para cumplir esa función en la instalación o en la economía en general”.

Figura 2.6 Jerarquía de residuos. Fuente: Elaboración propia a partir de la Directiva Marco de Residuos



Fuente: Elaboración propia a partir de la Directiva Marco de Residuos (Unión Europea, 2008)

Como última opción quedaría la eliminación mediante vertido o destrucción total o parcial.

Tabla 2.5 Destinos posibles de las fracciones de RCD

Fracción a considerar	Reutilización	Reciclado	Otras formas de revalorización u valorización (fundamentalmente energética)
Productos cerámicos	X	X	
Hormigón		X	
Piedras		X	
Madera	X		X
Vidrio		X	
Plásticos		X	X
Metales	X	X	
Papel y cartón		X	X
Yaso			X
Materiales bituminosos		X	

Fuente: Xunta de Galicia (2005)

En la tabla 2.5 se indican los posibles destinos de las distintas fracciones de los RCD. Como puede verse en la tabla 2.5 las fracciones de hormigón y piedras, objeto de la presente tesis, no pueden reutilizarse (han sufrido un proceso de demolición), ni revalorizarse energéticamente (ni las piedras ni el hormigón son combustibles). Por tanto, solo pueden reciclarse. Al ser reducidas sus opciones de valorización, se hace aún más necesario buscar nuevas alternativas de reciclado de este tipo de material.

Por otro lado, la correcta gestión de los RCD generados se realiza habitualmente mediante operaciones en los siguientes tipos de plantas (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2009):

- Plantas de transferencia: en ellas tiene lugar el depósito temporal de RCD que han de ser eliminados o tratados en instalaciones localizadas a grandes distancias.
- Plantas de tratamiento: el fin último de estas plantas es escoger, ordenar y valorizar las diferentes fracciones que contienen los RCD. Así, se consiguen productos finales apropiados para su utilización directa, para un posterior tratamiento de valorización o reciclado o para su depósito en vertedero. Estas plantas pueden ser fijas (operan exclusivamente en el emplazamiento en que están ubicadas) o móviles (se desplazan temporalmente a las obras o a centros de valorización e eliminación para reciclar en origen).

Proceso de producción de los áridos de residuos de construcción y demolición.-

Recepción del material: el material es pesado y examinado visualmente para decidir si es apto o no y para comprobar que no presenta residuos peligrosos.

- Separación de residuos voluminosos, de gran tamaño, de forma manual o mecánica.
- Tamizado para la clasificación granulométrica de los residuos. Lo más recomendable es obtener tres fracciones: una fina (0-20 o 40 mm), una intermedia (20 o 40 – 60 u 80 mm) y una gruesa (mayor de 60 u 80 mm).
- Triaje manual: el residuo, tras la separación de voluminosos o tras el primer tamizado, va pasando por una cinta transportadora de banda ancha en la que los operarios escogen los materiales (de tamaños pequeños) que se van a separar (plásticos, maderas, papeles, cartones, metales) para depositarlos en su correspondiente contenedor y valorizarlos o eliminarlos posteriormente.
- Machaqueo para reducir el tamaño y separar algunos materiales tales como el acero del hormigón armado.

2.5 ENSAYOS DE CALIDAD DEL CEMENTO ASFÁLTICO

En los siguientes párrafos se describen brevemente los ensayos de laboratorio necesarios para determinar si los asfaltos cumplen con las especificaciones, y se hace referencia a los métodos de ensayo normalizados. Los asfaltos se presentan en una amplia variedad de tipos y grados normalizados.

2.5.1 Penetración a 25°C

Se define como la distancia, en décimas de mm., a la que penetra una aguja de dimensiones patrón normalizada, verticalmente en una muestra de asfalto en condiciones determinadas de temperatura, carga y tiempo; cuando no se mencionan específicamente otras condiciones, se entiende que la medida de la penetración se hace a 25°C, la aguja está cargada con un peso de 100 gramos y la carga se aplica durante un tiempo de 5 segundos.

La penetración determinada en estas condiciones se llama penetración normal, es evidente que cuanto más blando sea el betún asfáltico mayor será la cifra que indica su penetración.



Equipo para realizar el ensayo de penetración

Fuente: Elaboración propia

El ensayo de penetración es otra medida de dureza o consistencia relativa de un betún asfáltico, la prueba normal de penetración consiste, como primera medida, en estabilizar una muestra de cemento asfáltico a una temperatura de 25°C (77°F) en un baño de agua con temperatura controlada. Seguidamente, una aguja de dimensiones establecidas se coloca sobre una superficie de la muestra bajo una carga de 100 gramos y, por el tiempo exacto de 5 segundos, la distancia que la guja penetra en el cemento asfáltico es registrada en unidades de 0.1 mm. (Décima de milímetro), la cantidad de estas unidades se llama “penetración” de la muestra.

Los betunes asfálticos se clasifican en grados según su dureza o consistencia por medio de la penetración. El instituto del asfalto ha adoptado cuatro grados de betún asfálticos comprendidos dentro de los márgenes siguientes: 60-70, 85-100, 120-150 y 200-300, además el instituto tiene especificaciones para un betún asfáltico de penetración comprendida en el margen de 40-50, que se usa en aplicaciones especiales. (*Manual de ensayo para laboratorio de asfalto de la A.B.C.*)

2.5.2 Viscosidad Saybolt Furol a 135°C

La finalidad del ensayo de viscosidad es determinar el estado de fluidez de los asfaltos a las temperaturas que se emplean durante su aplicación. La viscosidad o consistencia del betún asfáltico se mide en el ensayo de viscosidad Saybolt-Furol.

En el ensayo de Saybolt-Furol, se emplea un viscosímetro Saybolt con orificio Furol, se coloca en un tubo normalizado cerrado con un tapón de corcho una cantidad de betún asfáltico, como las temperaturas a las que se determina la viscosidad de los betunes asfálticos son frecuentemente superiores a los 100°C, el baño de temperatura constante del viscosímetro se llena de aceite. Cuando el betún asfáltico ha alcanzado una temperatura establecida, se quita el tapón y se mide el tiempo necesario en segundos para que pase a través del orificio Furol 60 ml del material, cuanto más viscosos son los materiales, más se requiere tiempo para que pasen a través del orificio.

La base de este ensayo es la medida del tiempo necesario para que fluya un volumen constante de material bajo condiciones de ensayo, como temperatura y altura del líquido, rígidamente controladas. Mediante el tiempo medido, en segundos, es posible calcular la viscosidad. (*Manual de ensayo para laboratorio de asfalto de la A.B.C.*)

2.5.3 Punto de inflamación

El punto de inflamación de un betún asfáltico indica la temperatura a la que puede calentarse el material sin peligro de inflamación en presencia de llama libre, el punto de inflamación no debe ser confundido con el punto de combustión, el cual es la temperatura más baja en la cual el betún asfáltico se inflama y ardería. El punto de inflamación consiste, tan solo, en la combustión instantánea de las fracciones volátiles que se están separando del asfalto.

El punto de inflamación se determina para identificar la temperatura máxima a la cual este puede ser manejado y almacenado sin peligro de que se inflame, esta información es muy importante debido a que el cemento asfáltico es, generalmente, calentado en su almacenaje, con el fin de mantener una viscosidad lo suficientemente baja para que el material pueda ser bombeado.

El punto de inflamación de un betún asfáltico se mide por el ensayo en vaso abierto de Cleveland según condiciones normalizadas; el procedimiento básico para determinar el punto de inflamación consiste en calentar gradualmente, a una velocidad establecida, una pequeña muestra de cemento asfáltico en una copa de latón, mientras se está aplicando una pequeña llama sobre la superficie de la muestra.

De esta forma, se hace pasar periódicamente sobre la superficie de la muestra una pequeña llama, la temperatura a la cual se presenta destellos instantáneos de vapores,

suficientes para producir una llamarada repentina sobre la superficie, se denomina punto de inflamación (punto de llama). El ensayo de copa abierta de Cleveland es el procedimiento más comúnmente usado para determinar el punto de inflamación. (*Manual de ensayo para laboratorio de asfalto de la A.B.C.*)

2.5.4 Peso Específico

El peso específico es la proporción del peso de cualquier volumen de material al peso de un volumen igual de agua, ambos a una temperatura determinada. Por ejemplo, una sustancia con un peso específico de 1.6 pesa 1.6 veces que el agua.

- El asfalto se expande cuando es calentado y se contrae cuando es enfriado, esto significa que el volumen dado de una cierta cantidad de betún asfáltico será mayor a altas temperaturas. Entonces será importante conocer el peso específico, ya que nos dará un patrón para efectuar correcciones de temperatura-volumen.
- El peso específico es esencial en la determinación del porcentaje de vacíos en las mezclas asfálticas para pavimentación compactada.

El peso específico es determinado, generalmente, usando el método de picnómetro, los resultados para el asfalto como para el agua, se expresan normalmente en términos de peso específico a una temperatura dada. Esto se debe a que el peso específico varía con la expansión del betún asfáltico, a diferentes temperaturas.



Ensayo del Peso Específico

Fuente: Elaboración propia

Por ejemplo, peso específico 1.05 a 15.6°/15.6°C (60°/60°F), significa que el peso específico del cemento asfáltico ensayado es de 1.05 cuando el cemento asfáltico y el

agua están a temperatura de 15.6°C (60°F). (*Manual de ensayo para laboratorio de asfalto de la A.B.C.*)

2.5.5 Punto de Ablandamiento

Los asfaltos de diferentes tipos reblandecen a temperaturas diferentes, el punto de reblandecimiento se determina usualmente por el método de ensayo arbitrario de anillo y bola. Aunque este ensayo no se incluye en las especificaciones para los asfaltos de pavimentación, se emplea frecuentemente para caracterizar los materiales más duros empleados en otras aplicaciones e indica la temperatura en la que estos asfaltos se convierten en fluidos. Consiste en llenar de asfalto fundido un anillo de latón de dimensiones normalizadas, la muestra así preparada se suspende en un baño con agua a 25 mm. Y sobre el centro de la muestra se sitúa una bola de acero de dimensiones y peso especificado. A continuación se calienta el baño a una velocidad determinada de 5°C por minuto, el asfalto se va ablandando hasta que las bolas tocan el fondo del recipiente; y se anota la temperatura en el momento en que la bola de acero toca el fondo del vaso de cristal, esta temperatura se llama punto de reblandecimiento del asfalto.

A partir de los valores de la penetración a 25°C y de la temperatura del anillo y bola, puede determinarse el índice de penetración de un betún, que da una cierta idea sobre el tipo y las características reológicas del mismo. Los betunes normales empleados en carreteras deben tener índices de penetración comprendidos entre -1 y +1, siendo inferiores a -1 para los materiales de gran susceptibilidad técnica y superiores a +1 en los betunes oxidados y en los modificados con polímeros. (*Manual de ensayo para laboratorio de asfalto de la A.B.C.*)

2.6 ENSAYOS DE CALIDAD DE LOS AGREGADOS

Para muchos ingenieros de materiales, la resistencia del material es frecuentemente considerada como un factor de calidad; sin embargo, este no es el caso necesariamente para mezclas en caliente para pavimento. Una estabilidad extremadamente alta de las mezclas asfálticas, muchas veces, es obtenida a expensas de bajar la durabilidad de los agregados, y viceversa.

Los áridos se emplean, combinados con los asfaltos de diversos tipos, para preparar mezcla de utilidades muy diversas. Como los áridos constituyen normalmente el

90% al 95% en peso de las mezclas asfálticas, sus propiedades tienen gran influencia sobre las del producto terminado, los áridos más empleados son piedra de canto rodado, grava triturada o natural, arena y filler naturales; en la construcción de pavimentos asfálticos el control de las propiedades de los áridos es tan importante como las del asfalto.

A continuación se detalla brevemente los ensayos normalizados que son realizados sobre los áridos, y se hace referencia a los procedimientos normalizados para la realización de estos ensayos. *Diseño de Mezclas Asfálticas (Ing.S.Minaya & A.Ordoñez)*

2.6.1 Granulometría

Este método de ensayo abarca el procedimiento para la determinación de la distribución de los tamaños de las partículas de agregado grueso y de agregado fino, empleando tamices de aberturas cuadradas, aunque también se utiliza cribas de laboratorio de aberturas circulares.

Hay dos métodos para determinar las proporciones relativas de los diversos tamaños de partículas en unos áridos:

- a) Análisis granulométrico por vía seca.
- b) Análisis granulométrico por vía húmeda.

a) Análisis Granulométrico por vía seca

Este método consiste en el tamizado por vía seca, el procedimiento consiste en agitar una cantidad pesada de áridos perfectamente secos sobre una serie de tamices con aberturas cuadradas. Los tamices están unidos de forma que el de mayor abertura está en la parte superior y los de abertura sucesivamente más pequeña están situados debajo. Bajo el último tamiz se coloca una bandeja que recoge todo el material que pasa a través de él, la agitación se aplica normalmente con aparatos automáticos, pero si no se disponen de estos, se lo puede realizar manualmente sin pérdida de áridos.

Se determina el peso del material retenido en cada tamiz y se expresa en porcentaje del peso de la muestra original, usualmente resulta conveniente anotar estos datos en un gráfico. En estos gráficos debe indicarse el porcentaje total, en peso, que pasa por cada tamiz. Las curvas así obtenidas son un instrumento que brindan rápidamente, una idea de las características granulométricas de los áridos.

Figura 2.7: Curva granulométrica de los áridos

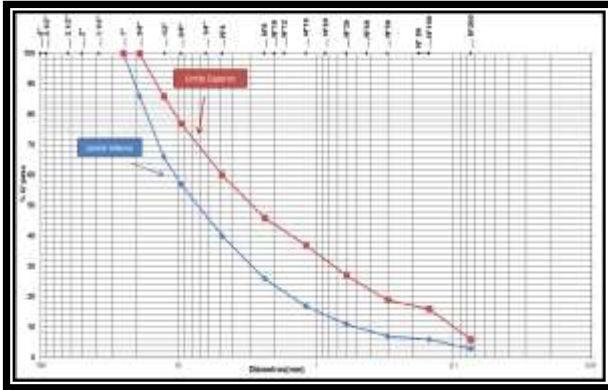


Gráfico Granulométrico

Fuente: Diseño de Mezclas Asfálticas (Ing.S.Minaya & A.Ordoñez)



Agregado de residuos de construcción y demolición

Fuente: Elaboración propia

b) Análisis granulométrico por vía húmeda

Este método de ensayo ofrece un procedimiento para determinar por vía húmeda la distribución de tamaños de los áridos finos y gruesos. Este procedimiento es deseable frecuentemente cuando los áridos contienen polvo extremadamente fino o arcilla que

pueden pegarse a las partículas más gruesas, en estos casos los resultados obtenidos del análisis granulométrico por vía seca son evidentemente erróneos. *Diseño de Mezclas Asfálticas (Ing.S.Minaya & A.Ordoñez)*



Fuente: Elaboración propia

2.6.2 Resistencia al desgaste por abrasión

El agregado pétreo está sujeto a una rotura adicional y a un desgaste por abrasión durante la elaboración, colocación y compactación de la mezcla asfáltica para pavimentación. El agregado sufre además la abrasión debido a las cargas del tránsito y deben tener, por lo tanto, en cierto grado, capacidad de resistir la trituración, degradación y desintegración.

El ensayo de abrasión o desgaste “Los Ángeles” mide la resistencia al uso o abrasión del agregado mineral, cuando el pavimento es sometido al tráfico vehicular, el porcentaje de desgaste medido por el ensayo de Los Ángeles no tiene en general ninguna relación con el pulimento de los áridos bajo el desgaste del tráfico. *Diseño de Mezclas Asfálticas (Ing.S.Minaya & A.Ordoñez)*



Máquina para el ensayo de los Ángeles

Fuente: Elaboración propia

El tambor de la máquina de desgaste es cargado con un peso determinado de partículas de agregado grueso, con una gradación prefijada que se asemeja al material propuesto para el diseño en la mezcla asfáltica, así como un peso normalizado de esferas de acero que han de actuar como carga abrasiva. A continuación se hace girar al tambor unas 500 vueltas, después de lo cual se extrae el material y se determina el porcentaje de material que pasa por el tamiz N°12, que se define como porcentaje de desgaste.

La elevada resistencia al desgaste indicada por un bajo porcentaje de pérdida por la abrasión es una característica deseable de los áridos que han de emplearse en la construcción de pavimentos asfálticos. *Diseño de Mezclas Asfálticas (Ing.S.Minaya & A.Ordoñez)*

2.6.3 Peso específico y absorción del agregado

Usualmente se determina el peso específico de los áridos por dos razones:

1. Para determinar el cálculo de los huecos de las mezclas asfálticas compactadas.
2. Para corregir las cantidades de áridos empleadas en una mezcla para pavimentación cuando su peso específico varía apreciablemente.

Los vacíos en la capa de pavimento asfáltico compactada aparecen en la muestra como pequeñas cavidades de aire entre las partículas de agregado recubiertas por asfalto; la elección del peso específico de un agregado usado en los cálculos de una mezcla asfáltica, podría tener un efecto sustancial sobre la cantidad calculada de vacíos en el pavimento compactado. El peso específico del agregado en la mezcla depende del grado en el que él mismo absorbe asfalto, cuando se usa el peso específico aparente se asume que el asfalto será absorbido por todos los poros permeables al agua.





Equipo para determinar el Peso Específico y absorción del agregado fino

Fuente: Elaboración propia

El concepto de peso específico efectivo se aproxima más al valor verdadero para la determinación de los vacíos de la mezcla asfáltica compactada. El peso específico bruto puede ser usado, sin embargo, si se considera una tolerancia por asfalto absorbido por el agregado. Para una combinación de agregados, los porcentajes de componentes del agregado total deberán requerir un ajuste por la diferencia de pesos específicos de cada uno de ellos. Cuando esto es necesario, los pesos específicos brutos son los que usualmente se emplean en los cálculos.

El peso específico de un agregado es el cociente entre el peso de un volumen unitario de material y el peso de igual volumen de agua a temperatura entre 20 y 25°C (68 y 77°F).



Equipo para determinar el Peso Específico y absorción del agregado grueso

Fuente: Elaboración propia

Hay tres tipos ampliamente usados de pesos específicos de los áridos:

- a) Peso específico aparente (G).
- b) Peso específico masivo, del agregado seco (real-efectivo) (Gb).
- c) Peso específico aparente con agregados saturados (brutos) (Gbs).

a) Peso específico aparente

Es la relación entre el peso de un volumen de material seco a una temperatura dada y el peso de igual volumen de agua destilada a esa temperatura. El volumen incluye los poros impermeables del material (esto es, la materia sólida, incluyendo sus huecos o poros impermeables). Considera al volumen del agregado como el volumen total excluyendo el volumen de poros o capilares que pueden llenarse de agua en 24 horas de embebimiento.

b) Peso específico masivo, del agregado seco (real-efectivo)

Es la relación entre el peso de un volumen del material seco a una temperatura dada y el peso de igual volumen de agua destilada estando el material en condición de saturado a superficie seca. El volumen incluye los vacíos permeables e impermeables del material.

Considera el volumen total del agregado excluyendo al volumen de poros que absorbe el asfalto.

c) Peso específico aparente con agregado saturados (brutos)

Es la relación entre el peso saturado a superficie seca de un volumen del material a una temperatura dada y el peso de igual volumen de agua destilada. El volumen incluye los vacíos permeables e impermeables del material (incluyendo tanto los huecos permeables como los impermeables propios del material). Considera el volumen total de las partículas del agregado, incluyendo los poros que pueden ser llenados con agua en 24 hrs. de embebimiento. *Diseño de Mezclas Asfálticas (Ing.S.Minaya & A.Ordoñez)*

Absorción del agregado

Es el volumen de los vacíos permeables del material expresado en por cientos del peso en el aire del mismo secado en estufa. Como se ve por estas definiciones, la diferencia entre el peso específico aparente y el peso específico aparente con áridos saturados, indica la proporción de huecos permeables al agua de los áridos. Como el volumen medido para determinar el peso específico aparente con áridos saturados incluye los huecos impermeables, mientras que el volumen para el peso específico aparente excluye los huecos, es evidente que el volumen correspondiente al peso específico aparente es más pequeño que el empleado para el peso específico aparente con áridos saturados.

Como el peso específico es una relación peso-volumen, se deduce que el peso específico aparente es mayor que el peso específico aparente con áridos saturados en áridos que contienen huecos permeables, y que ambos valores son iguales para áridos que no contienen huecos de este tipo. El peso específico aparente de los áridos en una mezcla asfáltica depende de la proporción en que el asfalto penetre los huecos permeables al agua. Como el asfalto es más viscoso que el agua, usualmente penetrará en los huecos menos que el agua. Por ello, ha empezado a usarse el término “Peso específico efectivo” para indicar la proporción en que el árido es permeable al asfalto empleado en la mezcla. Como puede verse, el peso específico efectivo estará normalmente comprendido entre el peso específico aparente y el peso específico aparente con áridos saturados.

Diseño de Mezclas Asfálticas (Ing.S.Minaya & A.Ordoñez)

2.6.4 Cubicidad de las partículas

La cubicidad es un método que establece el procedimiento para determinar la masa de angularidad (chancado), canto rodado, alargamiento y laminaridad. Consiste en calcular el porcentaje de cada una de estas fracciones presentes en la muestra de agregado.

Este método se aplicará a todos los agregados pétreos que se emplearán en el diseño de la mezcla asfáltica en caliente.

Angularidad del agregado grueso

Esta propiedad asegura un alto grado de fricción interna del agregado y resistencia al ahuellamiento, se define como el porcentaje en peso del agregado mayor de 4.75 mm. con una o más caras fracturadas.

Para medir la angularidad del agregado grueso, deben contarse las partículas manualmente para determinar las caras fracturadas; una cara fracturada se define como alguna superficie fracturada que ocupa más del 25% del área del contorno de la partícula del agregado, visible en esa orientación.

Angularidad del agregado fino

Esta propiedad asegura un alto grado de fricción interna del agregado fino y de resistencia al ahullamiento. Se define como el porcentaje de vacíos de aire presente en los agregados menores de 2.36 mm. levemente compactados, los contenidos de vacíos mayores significan más caras fracturadas.

Alargamiento y laminaridad.-

Se refiere al porcentaje en peso del agregado grueso cuya relación entre las dimensiones máxima y mínima es mayor que 5, las partículas alargadas son indeseables porque tienden a quebrarse durante la construcción y cuando es sometido al tráfico vehicular.

Para medir la relación de dimensiones de una muestra representativa de las partículas del agregado, se emplea un calibrador. *Diseño de Mezclas Asfálticas (Ing.S.Minaya & A.Ordoñez).*

2.6.5 Limites de Atterberg

Cuando en una mezcla asfáltica requiere de un determinado tipo de filler mineral, el cual estará compuesto de partículas muy finas de caliza, cal apagada, u otras sustancias minerales, éste no debe tener plasticidad.

Cuando se determina que el filler mineral presenta la plasticidad, estos se expanden, provocando actividades altas, por lo tanto, es recomendable que un material utilizado en las mezclas asfálticas sea no plástico (así como la arena). *Diseño de Mezclas Asfálticas (Ing.S.Minaya & A.Ordoñez).*

2.6.6 Equivalente de arena.-

Este método establece un procedimiento rápido para determinar las proporciones relativas de polvo fino no convenientes o materiales similares a la arcilla, en los pétreos

que pasan por el tamiz de 4.75 mm. (Nº4). Por lo tanto el ensayo se aplica a la fracción que pasa por el tamiz Nº4.



Ensayo para el Equivalente de Arena

Fuente: Elaboración propia

Algunos agregados contienen ciertas sustancias extrañas que lo hacen inadecuados o son perjudiciales para ser empleados en las mezclas asfálticas de pavimentación, a menos que la cantidad de materiales extraños sea reducida. Las especificaciones para tales agregados normalmente contienen una sección en la cual se indica la cantidad permitida en el agregado. Los materiales típicos objetables son, sustancias orgánicas, partículas livianas, terrones de arcilla y arcilla que recubren las partículas de agregado grueso.

Para la determinación del equivalente de arena, se coloca una muestra del material en estudio en un cilindro graduado transparente que contiene una solución de cloruro cálcico, glicerina y formaldehído en agua. La muestra y la solución se agitan vigorosamente de una forma normalizada, se emplea la misma solución para impulsar el material arcilloso hacia arriba, haciéndolo salir de la muestra a medida que se llena el cilindro, introduciéndola a presión en el fondo mediante un tubo delgado. Después de un periodo de sedimentación de 20 minutos se lee en la graduación del recipiente la altura máxima de la suspensión de arcilla, por último se introduce en el cilindro un disco pesado de metal que se lo hace bajar hasta que descansa sobre la parte superior de la arena limpia y se lee la altura de la superficie inferior del disco. Se llama equivalente de arena a la relación de la lectura correspondiente a la superficie superior

de la arena a la capa superior de la arcilla multiplicada por 100. *Diseño de Mezclas Asfálticas (Ing.S.Minaya & A.Ordoñez).*

2.6.7 Afinidad con el asfalto

Este método describe el descubrimiento (separación de la película de asfalto del agregado por la acción del agua) y el procedimiento de inmersión estática a fin de determinar la adherencia del par betumen agregado en presencia de agua.

El descubrimiento puede originar que un material no sea conveniente para ser usado en mezclas asfálticas de pavimentación; la granulometría del material es cuestionable o no convence sobre su calidad, por lo que se lo puede emplear en forma satisfactoria realizando un ajuste mediante la combinación con otros agregados.

2.6.8 Ensayo de los sulfatos

El ensayo de resistencia a los sulfatos da una indicación de la resistencia de los áridos finos y gruesos a los agentes atmosféricos, el ensayo se realiza con áridos que no han dado buen resultado durante su empleo, mide la resistencia de los áridos a la disgregación o desintegración por soluciones saturadas de sulfato de sodio o magnesio. Este ensayo proporciona una información útil para juzgar la solidez de los agregados sujetos a la acción de la meteorización, particularmente, cuando no se dispone de una información adecuada de los datos de servicio del material expuesto a las condiciones de meteorización existentes. Se llama la atención al hecho de que los resultados del ensayo por el uso de las dos sales difieren considerablemente, por lo tanto para el presente proyecto se empleará el sulfato de sodio.

El ensayo se hace sumergiendo fracciones de tamaños clasificados de muestras de áridos en una solución saturada de sulfato de sodio. Los recipientes deben estar de tal forma que permitan la libre circulación de entrada y salida de la solución en la masa de la muestra sin pérdida de áridos. Después de la inmersión (tiempo de 18 a 20 horas aproximadamente) se secan las muestras en estufa. Tras un número determinado de ciclos (normalmente 5 ciclos) de inmersión y secado de las muestras de áridos se determina por tamizado el porcentaje de pérdida de peso de cada fracción granulométrica. El total de estos valores es el porcentaje de pérdida resultado del ensayo. *Diseño de Mezclas Asfálticas (Ing.S.Minaya & A.Ordoñez).*

2.7 ENSAYOS DE CALIDAD DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE

Una mezcla asfáltica en caliente consiste en una combinación de agregados uniformemente mezclados recubiertos por cemento asfáltico. Para secar los agregados y obtener suficiente fluidez del cemento asfáltico como para lograr adecuada Trabajabilidad y mezclado, tanto el agregado como el asfalto deben ser calentados antes del mezclado; de ahí el término “mezcla asfáltica en caliente”.

No sólo es importante ensayar el asfalto y los agregados separadamente, sino que deben efectuarse combinaciones de estos materiales hasta establecer las proporciones y características adecuadas para estas mezclas.

En una mezcla asfáltica en caliente de pavimentación, el asfalto y el agregado son combinados en proporciones exactas, las proporciones relativas de estos materiales determinan las propiedades físicas de la mezcla y eventualmente el desempeño de la misma como pavimento terminado.

El método que se utilizará para el presente proyecto de investigación en el diseño de mezclas asfálticas en caliente, es el Método Marshall, es el procedimiento más usado en el mundo. El Método Marshall es un experimento de laboratorio dirigido al diseño de una adecuada mezcla asfáltica por medio del análisis de su estabilidad/fluencia y densidad/vacíos.

Una de las virtudes del método Marshall es la importancia que asigna a las propiedades densidad/vacíos del material asfáltico, este análisis garantiza que las importantes proporciones volumétricas de los componentes de la mezcla estén dentro de rangos adecuados para asegurar una mezcla asfáltica durable.

Las mezclas asfálticas en caliente pueden ser producidas por un amplio rango de combinaciones de agregados, cada uno con sus características particulares adecuadas al diseño especificado y a sus usos de construcción. *Diseño de Mezclas Asfálticas (Ing.S.Minaya & A.Ordoñez).*

2.8 PROPIEDADES CONSIDERADAS EN EL DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

Las buenas mezclas asfálticas en caliente trabajan bien debido a que son diseñadas, producidas y colocadas de tal manera que se logra obtener las propiedades deseadas.

Hay varias propiedades que contribuyen a la buena calidad de pavimentos de mezclas en caliente que se deben considerar, éstas son las siguientes:

- La estabilidad.
- La durabilidad.
- La impermeabilidad.
- La trabajabilidad.
- La flexibilidad.
- Resistencia a la fatiga.
- Resistencia al deslizamiento.

El objetivo primordial del procedimiento de diseño de mezclas es el de garantizar que la mezcla de pavimentación posea cada una de estas propiedades que fueron nombradas anteriormente. Por lo tanto, el inspector deberá estar consciente de qué significa cada una de estas propiedades, cómo es evaluada, y qué representa en términos de rendimiento del pavimento. *Diseño de Mezclas Asfálticas (Ing.S.Minaya & A.Ordoñez).*

Estabilidad

La estabilidad de un asfalto, es la capacidad para resistir el desplazamiento y deformación bajo las cargas del tránsito. Un pavimento estable es capaz de mantener su forma y figura bajo cargas repetitivas; un pavimento inestable desarrolla ahuellamiento (canales), ondulaciones (corrugaciones) y otras señas que indican cambios en la mezcla.

Los requisitos de estabilidad sólo pueden establecerse después de un análisis completo del tránsito, debido a que las especificaciones de estabilidad para un pavimento dependen del tránsito esperado. Las especificaciones de estabilidad deben ser lo suficientemente altas para acomodar adecuadamente el tránsito esperado, pero no más altas de lo que exijan las condiciones de tránsito. Valores muy altos de estabilidad producen un pavimento demasiado rígido, y por lo tanto, menos durable.

La estabilidad de una mezcla depende de la fricción interna y de la cohesión, la fricción interna en las partículas de agregado (fricción entre partículas), está relacionada con características del agregado tales como la forma y textura superficial.

La cohesión resulta de la capacidad ligante del asfalto, un grado propio de fricción y cohesión interna. Existen muchas causas y efectos asociados con una estabilidad insuficiente en el pavimento varias de las cuales se enuncia en el siguiente cuadro:

Tabla 2.6 ESTABILIDAD BAJA	
Causas	Efectos
Exceso de asfalto en la mezcla.	Ondulaciones, ahuellamiento y afloramiento o exudación.
Exceso de arena de tamaño medio en la mezcla.	Baja resistencia durante la compactación y, posteriormente, durante un cierto tiempo, dificultad para la compactación.
Agregado redondeado sin o pocas superficies trituradas.	Ahuellamiento y canalización.

Fuente: Diseño de Mezclas Asfálticas (Ing.S.Minaya & A.Ordoñez)

Durabilidad

La durabilidad de un pavimento asfáltico es la habilidad para resistir factores tales como la desintegración del agregado, cambios en las propiedades del asfalto (polimerización y oxidación), y separación de las películas de asfalto. Estos factores pueden ser el resultado de la acción del clima, tráfico, o una combinación de ambos.

La durabilidad de una mezcla puede ser mejorada de tres formas, estas son: usando la mayor cantidad posible de asfalto, usando una graduación densa de agregado resistente a la separación, y compactando la mezcla para obtener la máxima impermeabilidad.

La mayor cantidad posible de asfalto aumenta la durabilidad porque las películas gruesas de asfalto no se envejecen tan rápido como lo hacen las películas delgadas, en consecuencia las películas gruesas tienen la ventaja de que el asfalto retiene por más tiempo sus características originales; además el máximo contenido de asfalto sella eficazmente un gran porcentaje de vacíos interconectados en el pavimento.

Una gradación densa de agregado firme, duro y resistente a la separación, contribuye de tres maneras:

1. Mayor durabilidad del pavimento.
2. Contacto más cercano entre las partículas de agregado lo cual mejora la impermeabilidad de la mezcla.
3. Mayor resistencia a la desintegración bajo las cargas del tránsito vehicular.

Por lo tanto, un agregado resistente a la separación, soporta la acción del agua y el tránsito, las cuales tienden a separar las películas de asfalto de las partículas de agregado, conduciendo a la desintegración del pavimento.

La intrusión de aire y agua en el pavimento puede minimizar, si se diseña y compacta la mezcla para darle al pavimento la máxima impermeabilidad posible.

Existen muchas causas y efectos asociados a la poca durabilidad del pavimento, en la siguiente tabla se presenta una lista de algunas causas y efectos.

Tabla 2.7 POCA DURABILIDAD	
Causas	Efectos
Bajo contenido de asfalto en la mezcla.	Endurecimiento rápido del asfalto y desintegración por pérdida de agregado.
Alto contenido de vacíos debido al diseño o a la falta de compactación.	Endurecimiento temprano del asfalto seguido por el agrietamiento o desintegración.
Agregado susceptibles al agua (hidrofilicos).	Películas de asfalto se desprenden del agregado dejando un pavimento desgastado o desintegrado.

Fuente: Diseño de Mezclas Asfálticas (Ing.S.Minaya & A.Ordoñez)

Impermeabilidad

La impermeabilidad de un pavimento asfáltico es la resistencia al paso de aire y agua hacia su interior, o a través de él. Esta característica está relacionada con el contenido de vacíos de la mezcla compactada, y es así como gran parte de las discusiones sobre vacíos en las secciones de diseño de mezcla se relacionan con la impermeabilidad.

Aunque el contenido de vacíos es una indicación del paso potencial de aire y agua a través de un pavimento, la naturaleza de estos vacíos es más importante que su cantidad; el grado de impermeabilidad está determinado por el tamaño de los vacíos, sin importar si están o no conectados y por el acceso que tienen a la superficie del pavimento.

Aunque la impermeabilidad es importante para la durabilidad de las mezclas compactadas, virtualmente todas las mezclas asfálticas usadas en la construcción de carreteras tienen cierto grado de permeabilidad. Esto es aceptable, siempre y cuando la permeabilidad esté dentro de los límites especificados. En la tabla siguiente se cita ciertas causas y efectos relacionados con valores bajos de permeabilidad para pavimentos asfálticos de gradación densa.

Tabla 2.8 MEZCLA DEMASIADO PERMEABLE	
Causas	Efectos
Bajo contenido de asfalto en la mezcla.	Las películas delgadas de asfalto causarán tempranamente, un envejecimiento y una desintegración de la mezcla.
Alto contenido de vacíos en la mezcla de diseño.	El agua y el aire pueden entrar fácilmente en el pavimento causando oxidación y desintegración de la mezcla.
Compactación inadecuada.	Resultará con vacíos altos en el pavimento, lo cual conducirá a infiltración de agua y baja estabilidad.

Fuente: Diseño de Mezclas Asfálticas (Ing.S.Minaya & A.Ordoñez)

Trabajabilidad

La Trabajabilidad está descrita por la facilidad con que una mezcla de pavimentación puede ser colocada y compactada. Las mezclas que poseen buena trabajabilidad son fáciles de colocar y compactar; la trabajabilidad puede ser mejorada modificando los parámetros del diseño de la mezcla, el tipo de agregado, y/o la granulometría.

Las mezclas gruesas (mezclas que contienen un alto porcentaje de agregado grueso) tienen una tendencia a segregarse durante su manejo, y también pueden ser difíciles de compactar.

A través de mezclas de prueba en el laboratorio puede ser posible adicionar agregado fino, y tal vez asfalto, a una mezcla gruesa, para volverla más trabajable. La trabajabilidad es especialmente importante en sitios donde se requiere colocar y rastrillar a mano cantidades considerables de mezcla, como por ejemplo alrededor de tapas de alcantarillas, curvas pronunciadas, y otros obstáculos similares.

Las mezclas que son fácilmente trabajables o deformables se conocen como mezclas tiernas, las mezclas tiernas son demasiado inestables para ser colocadas y compactadas apropiadamente.

Aunque el asfalto no es la principal causa de los problemas de trabajabilidad, tiene algún efecto sobre esta propiedad, debido a que la temperatura de la mezcla afecta la viscosidad del asfalto, una temperatura demasiado baja hará que la mezcla sea poco trabajable, mientras que una temperatura demasiado alta podrá hacer que la mezcla se vuelva tierna.

La siguiente tabla cita algunas causas y efectos relacionados con la trabajabilidad de mezclas de pavimentación.

Tabla 2.9 MALA TRABAJABILIDAD	
Causas	Efectos
El tamaño máximo de las partículas del agregado es grande.	Superficie áspera, difícil de colocar.
Demasiado agregado grueso.	Puede ser difícil de compactar.
Temperatura muy baja de la mezcla.	Agregado sin revestir, mezcla poco durable, superficie áspera, difícil de compactar.
Demasiada arena de tamaño medio.	La mezcla se desplaza bajo la compactadora y permanece tierna y blanda.
Bajo contenido de relleno mineral.	Mezcla tierna altamente permeable.
Alto contenido de relleno mineral.	Mezcla muy viscosa, difícil de manejar, poco durable.

Fuente: Diseño de Mezclas Asfálticas (Ing.S.Minaya & A.Ordoñez)

Flexibilidad

La flexibilidad es la capacidad de un pavimento asfáltico para acomodarse, sin que se agriete, a movimientos y asentamientos graduales de la subrasante. La flexibilidad es una característica deseable en todo pavimento asfáltico debido a que virtualmente todas las subrasantes se asientan (bajo cargas) o se expanden (por expansión del suelo).

Una mezcla de granulometría abierta con alto contenido de asfalto es, generalmente, más flexible que una mezcla densamente (agregado compacto) graduada de bajo contenido de asfalto. Algunas veces los requerimientos de flexibilidad entran en conflicto con los requisitos de estabilidad, de tal manera que se debe buscar el equilibrio de los mismos.

Por esta razón, un pavimento asfáltico debe tener la capacidad de adaptarse a asentamientos localizados o diferenciales sin quebrarse. Generalmente, la flexibilidad de una mezcla asfáltica se incrementa con altos contenidos de asfalto y agregados de granulometría relativamente abierta.

Tabla 2.10 FALTA DE FLEXIBILIDAD	
Causas	Efectos

Granulometría densamente graduada.	Mezcla con tendencia a ser rígida.
Bajo contenido de asfalto.	Mezcla con tendencia a ser rígida.

Fuente: Diseño de Mezclas Asfálticas (Ing.S.Minaya & A.Ordoñez)

Resistencia a la fatiga

Esta característica en un pavimento es la resistencia a la flexión repetida bajo las cargas de tránsito. Se ha demostrado, por medio de la investigación, que los vacíos (relacionados con el contenido de asfalto) y la viscosidad del asfalto tienen un efecto considerable sobre la resistencia a la fatiga. A medida que el porcentaje de vacíos en un pavimento aumenta, ya sea por diseño o por falta de compactación, la resistencia a la fatiga del pavimento (el periodo de tiempo durante el cual un pavimento en servicio es adecuadamente resistente a la fatiga) disminuye. Así mismo, un pavimento que contiene asfalto que se ha envejecido y endurecido considerablemente tiene menor resistencia a la fatiga.

Las características de resistencia y espesor de un pavimento y la capacidad de soporte de la subrasante, tienen mucho que ver con la vida del pavimento y con la prevención del agrietamiento asociado con las cargas del tránsito. Los pavimentos de gran espesor sobre subrasantes resistentes no se flexionan tanto, bajo las cargas, como los pavimentos delgados o aquellos que se encuentran sobre subrasantes débiles.

La siguiente tabla presenta una lista de las causas y los efectos que conducen a una mala resistencia a la fatiga.

Tabla 2.11 MALA RESISTENCIA A LA FATIGA	
Causas	Efectos
Bajo contenido de asfalto.	Agrietamiento por fatiga.
Vacíos altos de diseño.	Envejecimiento temprano del asfalto, seguido por agrietamiento por fatiga.
Falta de compactación.	Envejecimiento temprano del asfalto, seguido por agrietamiento por fatiga.
Espesor inadecuado de pavimento.	Demasiada flexión seguida por agrietamiento por fatiga.

Fuente: Diseño de Mezclas Asfálticas (Ing.S.Minaya & A.Ordoñez)

Resistencia al deslizamiento

Resistencia al deslizamiento es la habilidad de una superficie de pavimento de minimizar el deslizamiento o resbalamiento de las ruedas de los vehículos, particularmente cuando la superficie es mojada. Para obtener buena resistencia al

deslizamiento, el neumático debe ser capaz de mantener contacto con las partículas de agregado en vez de rodar sobre una película de agua en la superficie del pavimento (hidroplaneo). La resistencia al deslizamiento se mide en terreno con una rueda normalizada bajo condiciones controladas de humedad en la superficie del pavimento, y a una velocidad de 65 Km/hr (40 min/hr).

Una superficie áspera y rugosa de pavimento tendrá mayor resistencia al deslizamiento que una superficie lisa, la mejor resistencia al deslizamiento se obtiene con un agregado de textura áspera, en una mezcla de gradación abierta y con tamaño máximo de 9.5 mm. (3/8 pulgada) a 12.0 mm. (1/2 pulgada); además de tener una superficie áspera, los agregados deben resistir el pulimento (alisamiento) bajo el tránsito. Los agregados calcáreos son más susceptibles al pulimento que los agregados silíceos. Las mezclas inestables que tienden a deformarse o a exudar (flujo de asfalto a la superficie) presentan problemas graves de resistencia al deslizamiento.

La tabla presenta una lista de las causas y los efectos relacionados con una mala resistencia al deslizamiento.

Tabla 2.12 POCA RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO	
Causas	Efectos
Exceso de asfalto.	Exudación, poca resistencia al deslizamiento.
Agregado mal graduado o con mala textura.	Pavimento liso, posibilidad de hidroplaneo.
Agregado pulido en la mezcla.	Poca resistencia al deslizamiento.

Fuente: Diseño de Mezclas Asfálticas (Ing.S.Minaya & A.Ordoñez)

2.9 CARACTERÍSTICAS DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

Una muestra de mezcla de pavimentación preparada en laboratorio puede ser analizada para determinar su posible desempeño en la estructura del pavimento. El análisis está enfocado hacia sus valores característicos de la mezcla y la influencia que éstas pueden tener en el comportamiento de la mezcla.

Descripción	Unidad
Contenido de asfalto	(%)
Densidad real de la mezcla	(gr./cc)
Densidad máxima teórica	(gr./cc)
Vacíos de aire en la mezcla	(%)

Vacíos del agregado mineral (V.A.M.)	(%)
Relación betumen vacíos (R.B.V)	(%)
Estabilidad de la mezcla	(Libras)
Fluencia de la mezcla	(1/100")

(Propiedades Mecánicas de Mezclas en caliente con áridos de RCD de la Ing. Ana María Rodríguez Pasandín)

2.9.1 Peso específico de los agregados

Como el agregado total está compuesto por fracciones separadas de agregado grueso, agregado fino y filler natural, todos con distinto peso específico, los cálculos posteriores se verán facilitados enormemente mediante el cálculo del peso específico bruto del agregado total. Generalmente, los pesos parciales se expresan en por ciento del peso total del agregado. Para introducir en la fórmula (que se detalla a continuación), el peso específico del agregado grueso y agregado fino, se utiliza el peso específico masivo (bulk), y para el filler se utiliza el peso específico aparente; por lo tanto, la fórmula de peso específico bruto promedio del agregado mineral combinando será la siguiente:

$$G_{agreg} = \frac{PA}{VA} = \frac{100}{\frac{\%AG(a)}{Gag(a)} + \frac{\%AF(b)}{Gag(b)} + \frac{\%F(c)}{GF(c)} + \dots + \frac{\%An}{G(n)}}$$

Dónde:

Gagreg.= Peso específico promedio del agregado mineral combinado

PA= Peso total expresado en porcentaje

AG(a), AG (b), F(c),.....An = Porcentaje en pesos de los agregados a, b, c.....n

Gag= Pesos específicos brutos de los agregados a, b, c.....n

2.9.2 Contenido de asfalto (%)

El contenido efectivo de asfalto de una mezcla para pavimentación es el total menos la cantidad de asfalto perdida por absorción dentro del agregado. Esta porción de asfalto efectivo total es la que permanece como recubrimiento exterior de las partículas de agregado, el comportamiento de una mezcla para pavimentación depende del contenido efectivo de asfalto.

El contenido de asfalto efectivo es la concentración de peso del ligante asfáltico no absorbido, el contenido de asfalto absorbido es la concentración de peso del ligante asfáltico absorbido del agregado. Normalmente se lo expresa como porcentaje del peso del agregado. La proporción de asfalto en la mezcla es importante y debe ser determinada exactamente en el laboratorio y luego controlada con precisión durante la elaboración de la mezcla en la planta.

El contenido óptimo de asfalto de una mezcla depende, en gran parte, de las características del agregado, tales como la granulometría y la capacidad de absorción. La granulometría del agregado está directamente relacionada con el contenido óptimo del asfalto, entre más finos contenga la graduación de la mezcla, mayor será el área superficial total, y mayor será la cantidad de asfalto requerida para cubrir uniformemente las partículas. Por otro lado, las mezclas más gruesas (agregados más gruesos) exigen menos asfaltos debido a que poseen menos área superficial total.

La relación entre el área superficial del agregado y el contenido óptimo de asfalto es más pronunciada cuando hay relleno mineral (fracciones muy finas de agregado que pasan a través del tamiz N°200). Los pequeños incrementos en la cantidad de relleno mineral pueden absorber, literalmente, gran parte del contenido de asfalto, resultando una mezcla inestable y seca. Las pequeñas dimensiones tienen el efecto contrario: poco relleno mineral resulta en una mezcla muy rica (húmeda). Cualquier variación en el contenido de relleno mineral causa cambios en las propiedades de la mezcla, haciéndola variar de seca a húmeda.

La capacidad de absorción (habilidad para absorber asfalto) del agregado usado en la mezcla es importante para determinar el contenido óptimo de asfalto, esto se debe a que se tiene que agregar suficiente asfalto a la mezcla para permitir la absorción, y para que además se puedan cubrir las partículas en su totalidad con una película adecuada de asfalto. Los técnicos hablan de dos tipos de asfalto, cuando se refieren al asfalto absorbido y al no absorbido: contenido total de asfalto y contenido efectivo de asfalto. El contenido total de asfalto es la cantidad de asfalto que debe ser adicionada a la mezcla para producir las cualidades deseadas en la mezcla. El contenido efectivo de asfalto es el volumen de asfalto no absorbido por el agregado; es la cantidad de asfalto que forma una película ligante efectiva sobre las superficies de los agregados, el

contenido efectivo de asfalto se obtiene al restar la cantidad absorbida de asfalto del contenido total de asfalto.

La capacidad de absorción de un agregado es obviamente una característica importante en la definición del contenido de asfalto de una mezcla, el contenido óptimo de asfalto de una mezcla asfáltica se determina a partir de los datos que se obtienen de las gráficas que se realizan después de realizar los ensayos con las briquetas que se realizaron en laboratorio con anterioridad, de tales gráficas se hacen consideraciones en tres de las curvas de resultados obtenidos con el ensayo Marshall.

El contenido óptimo de asfalto de la mezcla, es el promedio numérico de los valores de contenido de asfalto, determinados en cada una de las gráficas.

Se toman en cuenta las siguientes curvas para la determinación del contenido óptimo de asfalto. (*Propiedades Mecánicas de Mezclas en caliente con áridos de RCD de la Ing. Ana María Rodríguez Pasandín*)

- A. Estabilidad Máxima.
- B. Máximo peso unitario.
- C. Valor medio para el porcentaje de vacíos.

2.9.3 Densidad Máxima real de la mezcla (gr/cm³).

Las mezclas asfálticas cuya densidad real se quiere determinar, pueden ser moldeadas en laboratorio, u obtenerse directamente de un pavimento. El diámetro y la longitud de la muestra deben ser no menores a cuatro veces el tamaño máximo del agregado empleado y su altura; por lo menos, una vez y medio el tamaño del agregado. La densidad real de la mezcla es comúnmente llamada peso unitario de mezclas asfálticas. Las muestras obtenidas directamente de un pavimento deben ser representativas de la mezcla empleada y no contener materias extrañas al propio pavimento. Al hacer el ensayo, las muestras deben cubrirse con parafina derretida, a fin de tapar todos los poros, o vacíos de la mezcla, y dejar la muestra al aire, 30 minutos antes de pesarla.

La fórmula para determinar la densidad real de la mezcla de las briquetas es:

$$Dr \left(\frac{gr}{cm^3} \right) = \frac{PB(grams)}{VP(cm^3)}$$

Dónde:

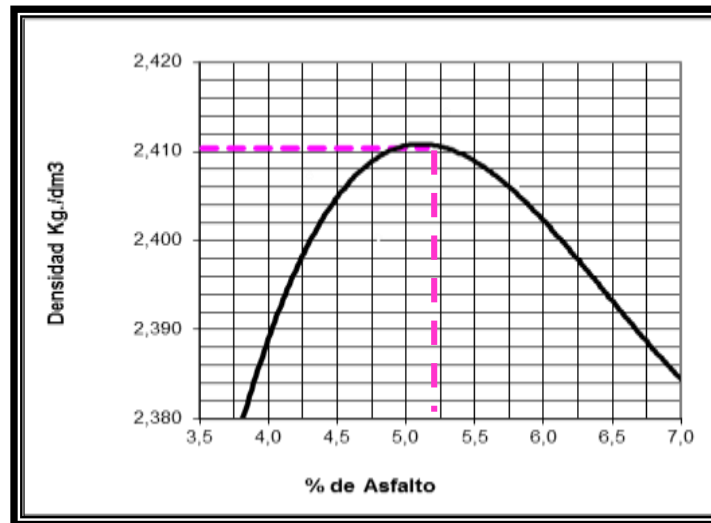
D_r = Densidad real de la mezcla (briqueta)

PB = Peso de la briqueta sin parafina

VB = Volumen de briqueta sin parafina

En la siguiente curva de la figura 2.8 densidad vs. contenido de asfalto, se observa como varía la densidad máxima teórica en función del contenido de asfalto.

Figura 2.8: **Densidad (gr/cm³) vs Asfalto (%)**



Fuente: Elaboración propia

La curva que se observa en la figura correspondiente a la Densidad Real de la mezcla total es similar a la curva de Estabilidad, pero el contenido de asfalto óptimo correspondiente a la Densidad Real Máxima es ligeramente superior que al correspondiente a la Estabilidad Máxima (pero no siempre). Para un determinado punto de densidad se observa su correspondiente porcentaje de contenido de asfalto hasta un punto donde la densidad es máxima y, por lo tanto, para tal punto se obtiene el contenido de asfalto óptimo en porcentaje.

Para trazar la curva de la Densidad real máxima es conveniente determinar unos 5 puntos, procurando que dos de ellos tengan un menor porcentaje de asfalto (rama izquierda de la curva), uno cerca del punto de densidad máxima, y los otros dos en la zona con mayor porcentaje de asfalto (rama derecha de la curva). Lógicamente un mayor número de puntos permitirá un mejor y más exacto trazado de la curva. (*Propiedades Mecánicas de Mezclas en caliente con áridos de RCD de la Ing. Ana María Rodríguez Pasandín*)

2.9.4 Densidad máxima teórica (gr/cm³)

El peso específico máximo teórico, de una mezcla asfáltica compactada, es la que considera el volumen del agregado mineral y el del asfalto, sin tomar en cuenta el volumen de vacíos llenos de aire.

La densidad de la mezcla compactada está definida como su peso unitario (el peso de un volumen específico de mezcla). La densidad es una característica muy importante que se debe tomar en cuenta, debido a que es esencial tener una alta densidad en el pavimento terminado para obtener un rendimiento duradero. La fórmula para su cálculo es la siguiente:

$$D_{mt} \left(\frac{gr}{cm^3} \right) = \frac{100}{\frac{\%C.A.}{GCA} + \frac{100 - \%C.A.}{G_{agreg.}}}$$

Dónde:

D_{mt} = Densidad máxima teórica

%C.A. = Porcentaje de cemento asfáltico

GCA = Peso específico de cemento asfáltico

$G_{agreg.}$ = Peso específico del agregado

En las pruebas y análisis de diseño de mezclas, la densidad de la muestra compactada se expresa, generalmente en kilogramos por metro cúbico (gr/cm^3), (Kg/m^3), o libras por pie cubico (lb/ft^3). La densidad es calculada al multiplicar la gravedad específica total de la mezcla por la densidad del agua (1.000 Kg/m^3) o (62.416 lb/ft^3). La densidad obtenida en el laboratorio se convierte en la densidad patrón, y es usada como referencia para determinar si la densidad del pavimento terminado es o no adecuado. Las especificaciones usualmente requieren que la densidad del pavimento sea un porcentaje de la densidad de laboratorio. Esto se debe a que muy rara vez la compactación in-situ logra las densidades que se obtienen usando los métodos normalizados de compactación de laboratorio (porque en laboratorio se tienen las condiciones ideales del 100%). (*Propiedades Mecánicas de Mezclas en caliente con áridos de RCD de la Ing. Ana María Rodríguez Pasandín*)

2.9.5 Vacíos de la mezcla (%)

Expresado en porcentaje del volumen total indica la diferencia relativa entre la densidad teórica y la real para el estado de compactación alcanzado. El contenido de vacíos de aire (también porcentaje de vacíos) es la concentración, en volumen, del aire en la muestra de la mezcla compactada. Es importante tener en cuenta que en una mezcla asfáltica, una parte de los vacíos, o poros, existentes entre las partículas del agregado mineral, se llena de asfalto, quedando lleno de aire el resto de los vacíos. En un pavimento asfáltico, es importante que el porcentaje de vacíos llenos de aire se controle. Como dijimos anteriormente, la mezcla asfáltica compactada deberá tener un porcentaje de vacíos, comprendido entre 3 y 5% del volumen total de la mezcla.

Por lo tanto, como ya se indicó, los vacíos de la mezcla se expresan como un porcentaje del volumen total de la muestra. Así, representan el volumen que no es ocupado ni por el asfalto ni por agregado.

Los vacíos de aire son espacios pequeños de aire, o bolsas de aire, que están presentes entre los agregados revestidos en la mezcla final compactada, por lo que es necesario que todas las mezclas densamente graduadas contengan cierto porcentaje de vacíos para permitir alguna compactación adicional bajo el tráfico, y proporcionar espacios a donde pueda fluir el asfalto durante esta compactación adicional.

$V_m(\%) = \frac{D_{mt} - D_{rm}}{D_{mt}} * 100$ El porcentaje permitido de vacíos está entre 3 y 5 por ciento, dependiendo del diseño específico. La fórmula para su cálculo es:

Dónde:

V_m = Vacíos de la mezcla compactada

D_{mt} = Densidad máxima teórica

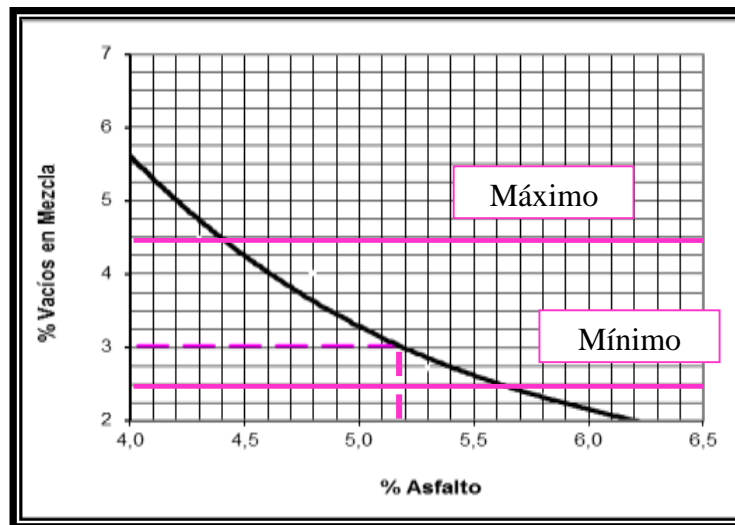
D_{rm} = Densidad real promedio

La durabilidad de un pavimento asfáltico depende del contenido de vacíos. La razón de esto es que entre menor sea la cantidad de vacíos, menor va a ser la permeabilidad de la mezcla. Un contenido demasiado alto de vacíos proporciona pasajes, a través de la mezcla, por los cuales puede entrar el agua y el aire, y causar deterioro. Por otro lado, un contenido demasiado bajo de vacíos puede producir exudación de asfalto; una

condición en donde el exceso de asfalto es expulsado fuera de la mezcla hacia la superficie.

En la figura 2.9 el porcentaje de vacíos vs. Contenido de asfalto, se observa cómo se va desarrollando la curva y su futura tendencia hacia adelante. El porcentaje de vacíos decrece, con el aumento del contenido de asfalto.

Figura 2.9: Vacíos (%) vs Asfalto (%)



Fuente: Elaboración propia

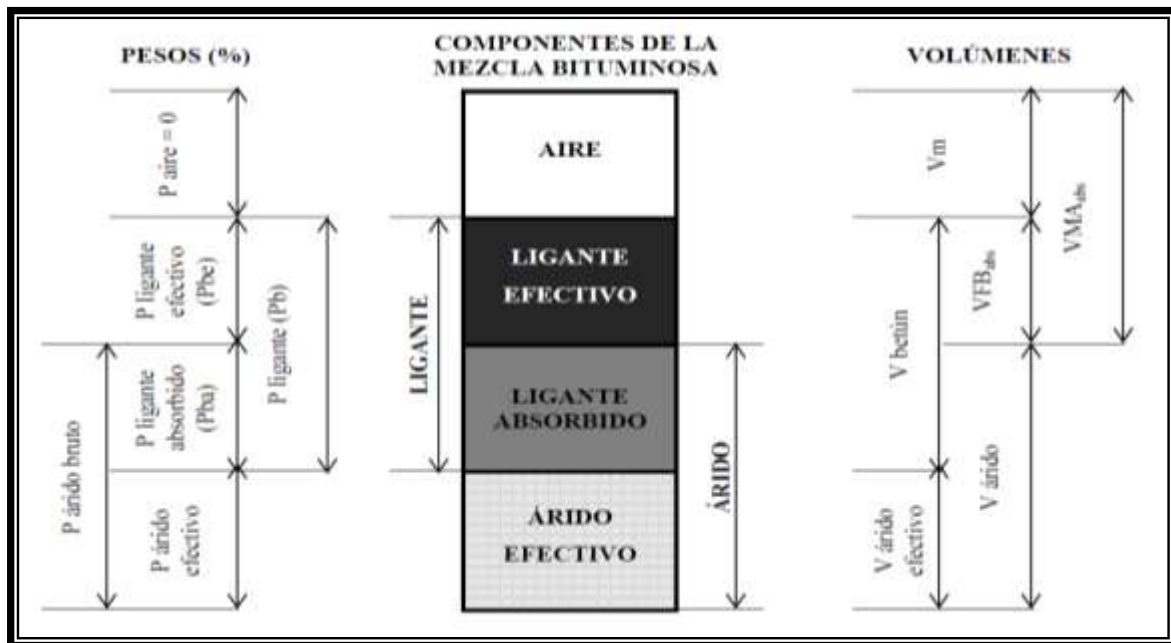
Al igual que la anterior gráfica, la curva de vacíos de la mezcla se traza con unos 5 puntos, se observa que la curva va decreciendo a medida que va aumentando el porcentaje del contenido de asfalto. En la figura también se muestra que se tiene un máximo y un mínimo de vacíos, y para obtener una mezcla que nos resulte satisfactoria se toma un porcentaje medio de vacíos que sería del 4%; como se indicó anteriormente no es bueno tener un porcentaje alto o bajo porcentaje de vacíos debido a que en el futuro, y con el desarrollo de la vida útil del pavimento, provocan diferentes consecuencias y ocasionan a que el pavimento sea deficiente.

La densidad y el contenido de vacíos están directamente relacionados. Entre más alta la densidad, menor es el porcentaje de vacíos en la mezcla, y viceversa. Las especificaciones de la obra requieren, usualmente, una densidad que permita acomodar el menor número posible (en la realidad) de vacíos como ya se indicó.

2.9.6 Vacíos del agregado mineral V.A.M. (%)

Expresado en porcentaje del volumen total, representa el volumen de vacíos existentes en el agregado mineral al estado de densificación alcanzado. Parte del volumen de vacíos está ocupado por el cemento asfáltico.

Figura 2.10: **Diagrama de componentes de una mezcla compactada**



Fuente: Elaboración propia

El espacio inter granular ocupado por el asfalto y el aire en una mezcla compactada se denomina vacíos del agregado mineral, (VAM). Se define como la suma del volumen de aire y el volumen de asfalto efectivo, expresada como porcentaje del volumen total, el volumen de asfalto absorbido no es usualmente considerado como VAM.

Los vacíos del agregado mineral son expresados en porcentaje del volumen total de la muestra. Representa el volumen de la mezcla compactada que no es ocupado por el agregado, el espacio inter granular ocupado por el asfalto y el aire en una mezcla compactada se denomina vacíos del agregado mineral VAM. En el diagrama de componentes, la suma del volumen de aire y el volumen de asfalto efectivo, es el VAM. El volumen de asfalto absorbido por el agregado no es usualmente considerado como parte del VAM. Por lo que, los vacíos del agregado mineral, son los espacios de aire que existen entre las partículas de agregado en una mezcla compactada de pavimentación, incluyendo los espacios que están llenos de asfalto.

El VAM representa el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto (todo el asfalto menos la porción que se pierde, por absorción, en el agregado), y el volumen de vacíos necesario de la mezcla.

Tabla 2.13: Vacíos en el agregado mineral de acuerdo al tamaño de las partículas

Tamices Standard		Tamaño máximo nominal de la partícula		Volumen mínimo de vacíos en el agregado mineral por ciento
Standard (mm.)	Alternativo	mm	plg	
1.18	N°16	1.18	0.0469	23.5
2.36	N°8	2.36	0.093	21.0
4.75	N°4	4.75	0.187	18.0
9.50	3/8	9.50	0.375	16.0
12.50	1/2	12.50	0.50	15.0
19.00	3/4	19.00	0.75	14.0
25.00	1.0	25.00	1.00	13.0
37.50	1.5	37.50	1.50	12.0
50.00	2.0	50.00	2.00	11.5
63.00	2.5	63.00	2.50	11.0

Fuente: (Manual de ensayo para laboratorio de asfalto de la A.B.C.)

Cuanto mayor sea el VAM, más espacio habrá disponible para las películas de asfalto. Existen valores mínimos para el VAM como se detalla en el cuadro anterior, los cuales están recomendados y especificados en función del tamaño del agregado. Estos valores se basan en el hecho de que cuanto más gruesa sea la película de asfalto que cubre las partículas de agregado, más durable será la mezcla.

Para que pueda lograrse un espesor durable de película de asfalto, se deben tener valores mínimos de VAM. Un aumento en la densidad de la graduación del agregado, hasta el punto donde se obtengan valores de VAM por debajo del mínimo especificado, puede resultar en películas delgadas de asfalto con mezclas de baja durabilidad y apariencia seca. Por lo tanto, es contraproducente y perjudicial, para la calidad del pavimento, disminuir el VAM para economizar en el contenido de asfalto.

Figura 2.11: Diagrama de volúmenes de una mezcla compactada



Fuente: (*Propiedades Mecánicas de Mezclas en caliente con áridos de RCD de la Ing. Ana María Rodríguez Pasandín*)

En el esquema gráfico se puede observar que el volumen de vacíos puede ser un índice de la susceptibilidad de una mezcla compactada; el pasaje de aire o de agua es de mucha importancia para la interconexión de vacíos y su comunicación con la superficie.

En casos extremos, cuando no es posible o practicable, por razones económicas u otras, alcanzar los requerimientos de especificaciones, se permite una tolerancia del 1% en los vacíos.

La fórmula para su cálculo es la siguiente:

$$VAM(\%) = Vm(\%) + \frac{CA(\%) * D_{rm}}{GCA}$$

Dónde:

VAM (%) = Vacíos del agregado mineral

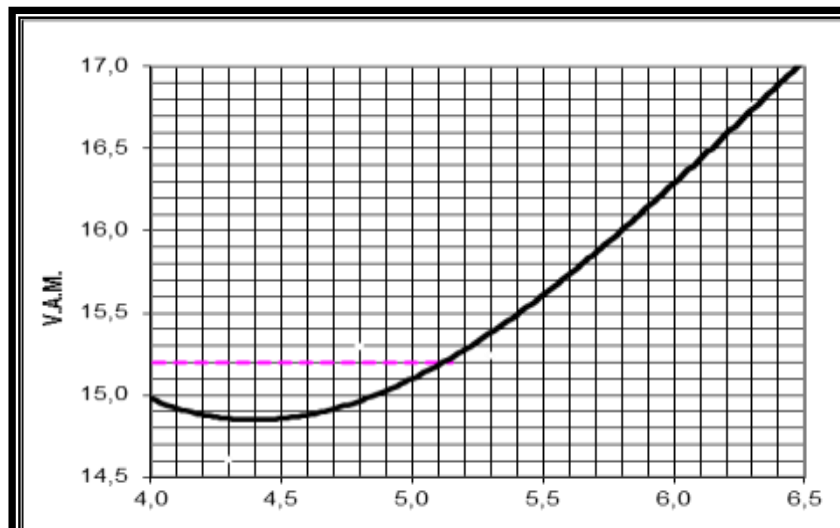
Vm (%) = Vacíos de la mezcla compactada

C.A. (%) = Porcentaje de cemento asfáltico

GCA = Peso específico de cemento asfáltico

Drm = Densidad real promedio

Figura 2.12: V.A.M. (%) vs Asfalto (%)



Mínimo

Fuente: Elaboración propia

Bajo ninguna circunstancia, se debe sobrepasar el valor de la fluencia o alcanzar valores inferiores a la estabilidad mínima requerida. Se debe enfatizar que estas variaciones se deben sobrepasar, sólo bajo condiciones extremas, a menos que el comportamiento, con combinaciones específicas de agregados, muestre condiciones satisfactorias para una mezcla asfáltica.

En la figura mostrada anteriormente, la curva del porcentaje de vacíos en el agregado mineral, generalmente decrece hasta un valor mínimo, para luego crecer con el incremento del porcentaje de asfalto. En la gráfica se observa que hay un valor mínimo, en caso de obtener una mezcla que se encuentre por debajo de este límite, es por deficiencia de asfalto o por vacíos de aire.

A medida que se reduce el tamaño de las partículas, se exige un volumen mayor de asfalto, porque se está aumentando el área superficial; consecuentemente se debe obtener mezclas con mayor porcentaje de V.A.M. y, en el caso de una dosificación que hubiese obtenido un V.A.M menor al requerido de acuerdo a las especificaciones, se debe estudiar nuevamente otra mezcla y así sucesivamente hasta obtener un valor de V.A.M. igual o mayor al requerido. (*Propiedades Mecánicas de Mezclas en caliente con áridos de RCD de la Ing. Ana María Rodríguez Pasandín*)

2.9.7 Relación betumen vacíos R.B.V. (%)

Expresa el porcentaje de los vacíos del agregado mineral ocupado por cemento asfáltico en la mezcla compactada.

$$RBV(\%) = \frac{VAM(\%) - Vm(\%)}{VAM(\%)} * 100$$

Esta propiedad es el porcentaje de los vacíos del agregado mineral (VAM), que contiene asfalto. La fórmula para su cálculo es la siguiente:

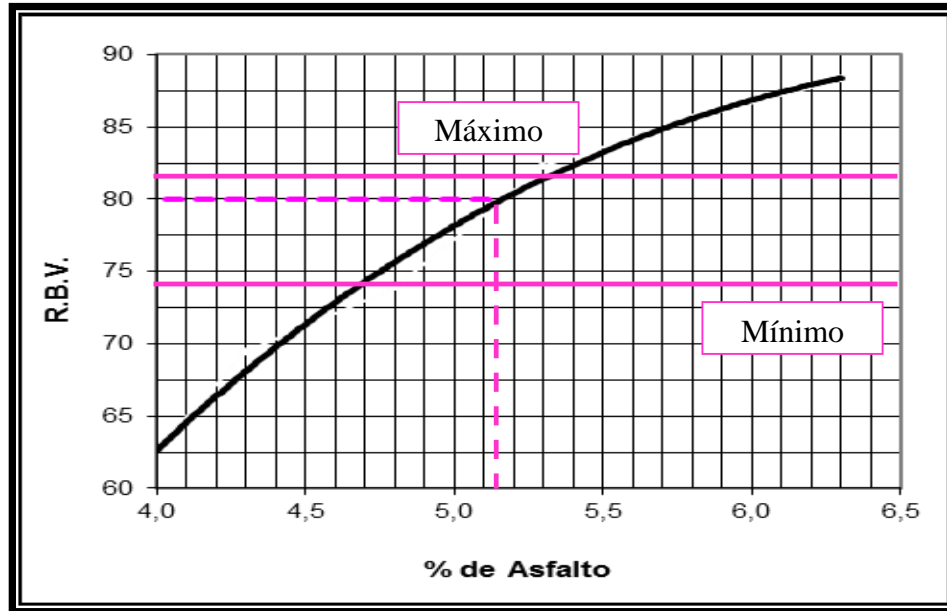
Dónde:

RBV (%) = Relación betumen vacíos

VAM (%) = Vacíos del agregado mineral

Vm (%) = Vacíos de la mezcla compactada

Figura 2.13: **R.B.V. (%) vs Asfalto (%)**



Fuente: Elaboración propia

En la figura de la curva del porcentaje de la relación betumen vacíos vs. contenido de asfalto, se observa cómo se va desarrollando la curva y su futura tendencia hacia delante. El R.B.V. va en aumento proporcionalmente con el aumento del contenido de asfalto.

Similar a las anteriores gráficas, la curva del R.B.V. de la mezcla se traza con unos 5 puntos, en la cual se observa, llevando un control del ensayo, que la curva va en crecimiento a medida que se va aumentando el porcentaje del contenido de asfalto.

En la figura se muestra que se tiene un máximo y un mínimo de valores para la curva, y para obtener una mezcla que resulte satisfactoria, se toma un porcentaje medio entre el valor máximo y mínimo de R.B.V. que sería del 78,5%. (*Propiedades Mecánicas de Mezclas en caliente con áridos de RCD de la Ing. Ana María Rodríguez Pasandín*)

2.9.8 Estabilidad de la mezcla (Lb.)

Se entiende por estabilidad la carga máxima (carga de rotura), obtenida cuando se ejecuta el ensayo de acuerdo a las condiciones establecidas para ello, este parámetro se puede adoptar como una medida de la resistencia de la mezcla al corte.

La estabilidad Marshall de una mezcla asfáltica es la carga mínima en Kg. que soporta una probeta de 6.35 cm. de altura y 10.16 cm. de diámetro, cuando se lo ensaya a una temperatura dada cargándola en sentido diametral a una velocidad de 5.8 cm/minuto. Es la resistencia al desplazamiento lateral de la mezcla asfáltica. La estabilidad es la capacidad de una mezcla asfáltica para resistir deformaciones provocadas por las cargas impuestas. Los pavimentos sin estabilidad sufren deformaciones (ahuellamiento y corrimiento u ondulaciones). La estabilidad depende de la fricción interna y de la cohesión.

La fricción interna depende de la textura superficial, granulometría del agregado, forma de las partículas, densidad de la mezcla y cantidad de asfalto. Es una combinación de la resistencia friccional y de la trabazón del agregado de la mezcla.

La resistencia friccional aumenta con la rugosidad superficial de las partículas del agregado. También aumenta con el área de contacto entre partículas, la resistencia por trabazón depende del tamaño y forma de las partículas.

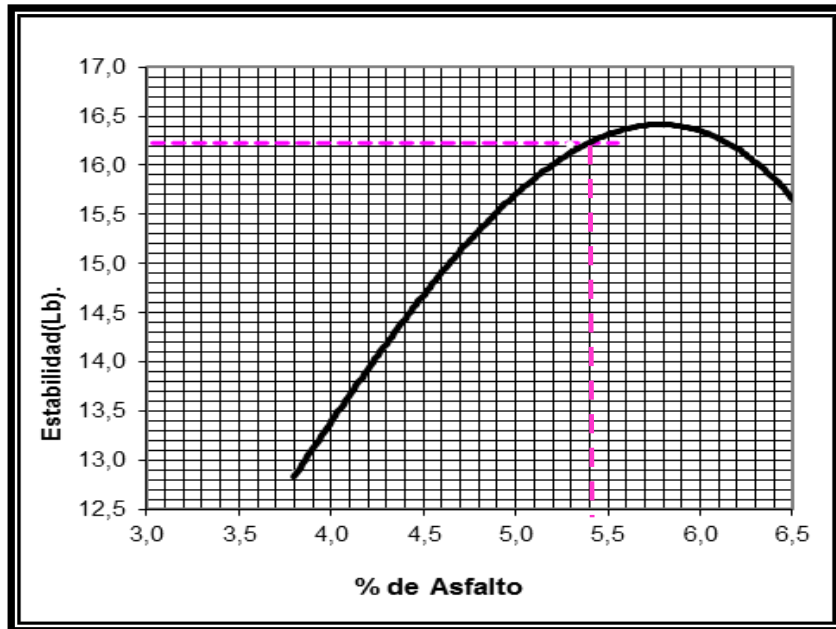
La cohesión es la fuerza aglutinante propia de una mezcla asfáltica para pavimentación, el asfalto sirve para aumentar las presiones de contacto desarrolladas entre las partículas de agregado. La cohesión varía directamente con la intensidad de la carga, el área cargada y la viscosidad del asfalto. Además, varía inversamente con la temperatura, la cohesión aumenta con el incremento del contenido de asfalto hasta un máximo y luego decrece.

En el esquema de la figura 2.14 estabilidad vs contenido de asfalto que se muestra a continuación, se puede observar la variación de la estabilidad con respecto a los distintos grados de asfalto, que puede ser de 3% al 9%, y medimos la estabilidad que presenta cada estado, se lo realiza golpeando con un peso conocido.

Generalmente, para medir la estabilidad de una mezcla asfáltica o su resistencia al desplazamiento lateral, se emplea diversos métodos pero para el presente caso de estudio, se utilizará el Método Marshall.

En la figura mostrada se puede observar que los valores de la estabilidad se incrementan, a medida que se va aumentando el porcentaje del contenido de asfalto, hasta un valor máximo.

Figura 2.14: **Estabilidad (Lb) vs Asfalto (%)**



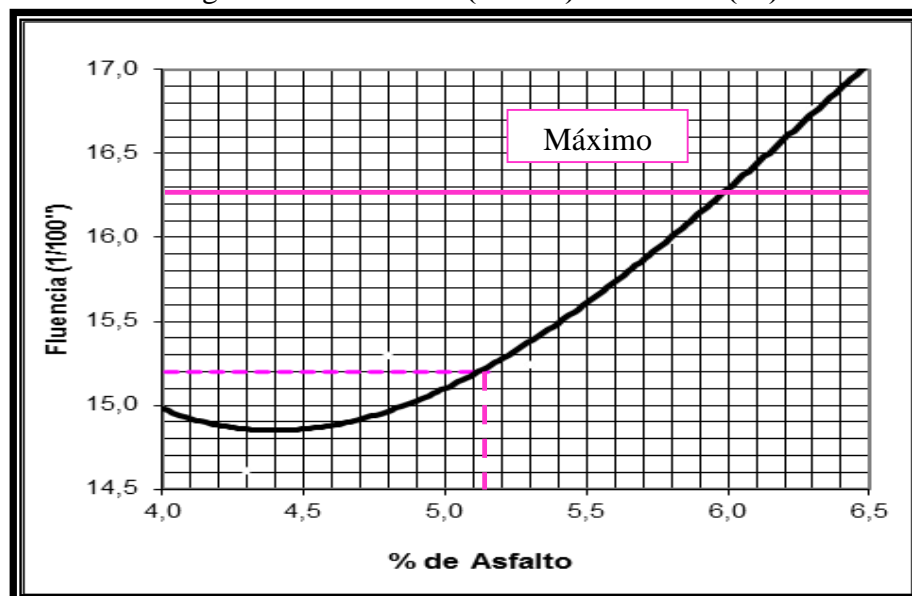
Fuente: Elaboración propia

La estabilidad máxima en una masa de agregados no se alcanza hasta que la cantidad de asfalto que recubre las partículas haya llegado a un valor crítico. Un porcentaje adicional del mismo actúa como lubricante más que como ligante, reduciendo la estabilidad de la mezcla pero aumentando su durabilidad. Por esta razón, frecuentemente es necesario mantener el contenido de asfalto tan alto como sea posible conservando una adecuada estabilidad.

2.9.9 Fluencia de la mezcla (1/100")

Es la deformación total expresada en mm., que experimenta la probeta desde el comienzo de la aplicación de la carga en el ensayo de estabilidad, hasta el instante de producirse la falla.

Figura 2.15: Fluencia (1/100") vs Asfalto (%)



Fuente: Elaboración propia

Los valores de la fluencia se incrementan, con el aumento del contenido de asfalto en la mezcla y viceversa.

El flujo es la deformación que ocurre en el instante de la rotura y, por tanto, una medida de plasticidad y capacidad de fluidez de la mezcla, esta deformación se considera en la misma dirección de aplicación de la carga.

2.9.10 Relación estabilidad – fluencia

Para entender si es una mezcla buena o mala, se recurre al concepto de rigidez analizando de manera combinada los parámetros de estabilidad y flujo. Como un resultado importante del estudio; se plantea un procedimiento de diseño, en el cual se limite las estabilidades Marshall, mediante la relación antes planteada, pues existen muchas personas de nuestro medio con la falsa creencia de que una mezcla de alta estabilidad es en general buena, lo que de hecho lleva a fortalecer la tendencia a fabricar mezclas muy rígidas, asunto que favorece la resistencia a la deformación plástica, pero a costa de una debilidad frente al fenómeno de la fatiga.

Dado que es fundamental que dentro de la idea de buena calidad se observe la rigidez de la mezcla como parámetro esclarecedor de su capacidad mecánica, se hace en consecuencia necesario establecer un intervalo que controle la rigidez Marshall para, de esta manera, limitar la tendencia a producir mezclas con exceso de estabilidad (que es sinónimo de una mezcla con excesiva rigidez).

En nuestro medio existe la tendencia por fabricar mezclas muy rígidas, con la falsa idea de que la mayor resistencia a la deformabilidad es positiva para la mezcla, pero en realidad se puede estar induciendo a la figuración prematura de las capas asfálticas diseñadas bajo ciertas circunstancias.

Este convencimiento errado, es propiciado en cierta manera por las Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción de Vías que en muchos casos no limitan el exceso de estabilidad Marshall y la especifican independientemente del flujo Marshall.

Una forma de controlar la rigidez de las mezclas, es empleando la relación estabilidad/flujo, para verificar que se está evaluando de forma correcta la calidad mecánica de las mezclas asfálticas. (*Propiedades Mecánicas de Mezclas en caliente con áridos de RCD de la Ing. Ana María Rodríguez Pasandín*)

2.9.11 Adherencia agregados-cemento asfáltico

La adherencia es la capacidad de un agregado de retener una película delgada de ligante bituminoso sobre su superficie aun en presencia de agua.

De acuerdo a dicha capacidad, los agregados se clasifican en hidrófilos cuando son más afines al agua que a los cementos asfálticos (agregados ácidos) e hidrófobos cuando no presentan afinidad por el agua (agregados alcalinos).

La afinidad es también una función de la actividad superficial de los agregados, la que está presente principalmente por el tipo de carga que exhibe la superficie de las partículas que dependen fundamentalmente de los minerales presentes. Resumiendo, se puede decir entonces que, la actividad de un suelo se mide a través de la capacidad de atraer iones, la cual permite determinar en forma aproximada la magnitud de la carga disponible en una partícula.

En el caso de una mezcla asfáltica, lo que se trata de alcanzar es una cohesión a través del aglutinante para que ésta, en combinación con la fricción interna de las partículas granulares, genere una resistencia al corte, adecuada al material artificialmente producido. Esta cohesión dependerá entonces de la capacidad de las partículas de absorber una película de aglutinante que, además de recubrir las partículas y protegerlas del intemperismo, produce un efecto análogo al de la capa de agua absorbida de los suelos arcillosos.

La capacidad de absorber la película de ligante dependerá entonces de la actividad superficial de las partículas de agregado y principalmente del tipo de carga disponible. Por otro lado la carga eléctrica, debido a las valencias no satisfechas, podrá ser positiva o negativa. En el primer caso, las partículas granulares repelaran a las moléculas bipolares de agua produciendo un buen mojado de su superficie por parte del cemento asfáltico (buena afinidad con el cemento asfáltico) y, en el segundo, ocurrirá un fenómeno inverso, es decir, las moléculas bipolares de agua serán atraídas por las partículas de los agregados y la absorción de aglutinante se verá inhibida (mala afinidad con el cemento asfáltico).

Cuando el contenido de sílice en el agregado es superior a 66% se denomina al material como agregado ácido o hidrófilo y será un material con una afinidad pobre por el ligante. En cambio cuando el contenido de sílice es inferior a 55%, se tiene un predominio de cargas positivas y el agregado es de tipo alcalino presentando una buena afinidad con el asfalto.

Si el contenido de sílice varía entre 55-66%, el agregado se denomina como agregado intermedio y su comportamiento estará determinado no sólo por su naturaleza, sino también por el tipo de cemento asfáltico.

En consecuencia se puede decir que, en la adherencia de las mezclas asfálticas intervienen fenómenos superficiales entre los agregados y el cemento asfáltico gobernados por la energía generada por las fuerzas en la interface de ambos, donde el factor más importante y decisivo en la adherencia es la naturaleza de los agregados, pero en mayor o menor grado interviene también la naturaleza del cemento asfáltico.

De las características de los iones de intercambio de los agregados, nace entonces la definición de agregados hidrófilos y agregados hidrófobos; son denominados hidrófilos cuando la carga superficial está determinada por iones negativos (aniones) e hidrófobos cuando son cationes los que definen la carga superficial de la piedra (carga positiva). En el primer caso, la afinidad de los agregados será mala y en el segundo caso, buena. El estudio de la adherencia del agregado con un determinado ligante bituminoso es un tema de creciente importancia en la ingeniería de pavimentos, disciplina que considera que el comportamiento de las mezclas depende, en general, de su correcta dosificación, del empleo de una técnica constructiva adecuada y fundamentalmente de las características físico química de ambos componentes (agregado pétreo y cemento asfáltico). (*Propiedades Mecánicas de Mezclas en caliente con áridos de RCD de la Ing. Ana María Rodríguez Pasandín*).

2.10 UTILIZACIÓN DE ÁRIDOS RECICLADOS DE RCD EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

La utilización de áridos reciclados (Áridos Reciclados) procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD) en el sector de la construcción ha experimentado un desarrollo creciente en los últimos años (Alaejos Gutiérrez y Calvo Calzada, 2010). Sin embargo, todavía se necesita una mayor investigación para poder diversificar sus

aplicaciones y hacer que su empleo deje de ser novedoso y pase a ser una práctica habitual.

En el caso de su utilización para capas de firmes, cabe mencionar que la mayor parte de las investigaciones realizadas se centran en el uso de los mismos en las capas de base y subbase, Esto se debe fundamentalmente a que las capas de base y subbase consumen una mayor cantidad de áridos que las capas de rodadura e intermedia (Huang et al., 2007). Además, en las capas inferiores del firme las exigencias técnicas son menores que en las capas superiores.

Por otro lado, fuera de nuestro país también hay investigaciones sobre el empleo de otros tipos de ARs procedentes de RCD. Así, se investigó sobre la posible utilización de AR de tipo cerámico, procedente del machaqueo de ladrillos, para la fabricación de macadam bituminoso en caliente y en frío (Sobhan y Zakaria, 2001; Ellis et al., 2004), y mezclas bituminosas en caliente (Khalaf, 2004). También cabe citar el empleo de AR de tipo hormigón en ladrillos cohesionados con betún (Thanaya, 2009).

Por otro lado, el estudio de la Federal Highway Administration (FHWA) mencionado anteriormente también indica que dada la mayor demanda de ligante de este tipo de áridos, como consecuencia de su elevada absorción (Anónimo, 1984; FHWA, 2004b), su utilización en las mezclas bituminosas no parece tener un futuro prometedor (FHWA, 2004). No obstante, es preciso considerar que si bien es cierto que existe un aumento de costes derivados del mayor consumo de ligante, también habría que tener en cuenta la reducción en los costes medioambientales (reducción en el consumo de materias primas, menor volumen de RCD en vertederos, etc). Y por supuesto, recalcar lo indicado por Petrarca y Galdiero (1984): al ser menor la densidad de la mezcla fabricada con AR, también será menor la masa de mezcla bituminosa a disponer para un mismo espesor de mezcla convencional. Esto podría llegar a compensar el incremento en el contenido óptimo de ligante de las mezclas fabricadas con AR.

2.11 DEFICIENCIAS EN LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS PROVOCADAS POR LOS AGREGADOS

El objetivo primordial en el diseño de mezclas asfálticas en caliente es garantizar una mezcla de calidad para la pavimentación, a continuación se indica las características de los agregados que provocan deficiencias en las mezclas asfálticas en caliente:

- Tamaño y granulometría de los agregados.

-Agregados con gradación gruesa.

- Limpieza de los agregados.
- Resistencia al desgaste de los agregados.
- Textura superficial de los agregados.
- Forma de los agregados.

-Agregado canto rodado.

-Agregado triturado.

- Porosidad de los agregados.
- Afinidad de los agregados con el asfalto.

Tamaño y granulometría de los agregados.-

Agregados con gradación gruesa

Las mezclas con una gradación gruesa (mezclas que contienen un alto porcentaje de agregado grueso) tienen una tendencia a segregarse durante su manejo, y también pueden ser difíciles de compactar. La Trabajabilidad está descrita por la facilidad con que una mezcla de pavimentación puede ser colocada y compactada, aquellas con mala trabajabilidad son difíciles de colocar y compactar por el diseño de ser una gradación muy gruesa, la trabajabilidad puede ser mejorada modificando los parámetros del diseño de la mezcla, el tipo de agregado, y/o granulometría.

Este tipo de gradación (agregados más gruesos) requiere menor contenido de asfalto, debido a que poseen menos área superficial total para cubrir uniformemente todas las partículas, y es más evidente para los agregados de canto rodado que presentan superficies lisas y pueden ser fácilmente recubiertos con una película de asfalto. Los agregados triturados gruesos en la mayoría de los casos presentan un alto contenido de vacíos en la mezcla, lo que permite la circulación de aire y agua a través de un pavimento, además, lo que conduce a prematuros endurecimientos del asfalto. Por lo que, el grado de impermeabilidad está determinado por el tamaño de los vacíos, sin importar si están o no conectados, y por el acceso que tienen a la superficie del pavimento. Es aceptable, un cierto porcentaje de vacíos siempre y cuando estén dentro de las especificaciones.

Con el peso específico de los agregados gruesos, se puede calcular los vacíos de las mezclas asfálticas compactadas, y de esa manera poder corregir las cantidades de áridos empleados en una mezcla para pavimentación para obtener un menor porcentaje de vacíos en la mezcla (a mayor peso específico mayor porcentaje de vacíos). (*Propiedades Mecánicas de Mezclas en caliente con áridos de RCD de la Ing. Ana María Rodríguez Pasandín*)

Limpieza de los agregados

Algunos agregados contienen ciertas sustancias extrañas que los hacen inadecuados para mezclas asfálticas de pavimentación, a menos que la cantidad de materias extrañas sea reducida. Las especificaciones para tales agregados normalmente contienen una sección en la cual se indica el material extraño y se lo limita a cantidades permitidas en el agregado. Los materiales típicos objetables son las sustancias orgánicas, partículas livianas, terrones de arcilla y arcilla que recubren las partículas de agregado grueso. La limpieza del agregado frecuentemente puede ser determinada por la inspección visual, pero un tamizado por vía húmeda, generalmente, es más valioso. El ensayo del Equivalente de arena, es un método para determinar la proporción relativa de polvo fino no conveniente o de arcilla.

Resistencia al desgaste de los agregados

El agregado está sujeto a la rotura adicional y a un desgaste por abrasión durante la elaboración y compactación de la mezcla asfáltica para pavimentación. El agregado sufre a además la abrasión debido a las cargas del tránsito, deben tener por lo tanto, en cierto grado capacidad de resistir la trituración, degradación y desintegración. El agregado de la superficie del pavimento o cerca de ella requiere una dureza mayor que el agregado de las capas inferiores, donde las cargas inferiores no son tan concentradas. (*Propiedades Mecánicas de Mezclas en caliente con áridos de RCD de la Ing. Ana María Rodríguez Pasandín*).

Textura superficial de los agregados

Al igual que la forma de las partículas, la textura superficial influye en la trabajabilidad y resistencia de las mezclas asfálticas para pavimentación, la textura superficial ha sido frecuentemente considerada más importante que la forma de las partículas del agregado. Una textura superficial rugosa, similar a la del papel de lija, opuesto a una

superficie lisa, tiende a incrementar la resistencia de la mezcla y requiere un porcentaje adicional de asfalto para compensar la pérdida de trabajabilidad. Los vacíos en el agregado mineral compactado son, además, casi siempre mayores, lo cual provee un espacio extra por el aumento necesario de asfalto.

Las gravas naturales, tales como las de río, generalmente tienen una textura superficial lisa y partículas de forma redondeadas. La trituración, sin embargo, produce frecuentemente una textura superficial rugosa (especialmente a lo largo de la cara fracturada) y cambia la forma de las partículas. Los agregados de superficie lisa pueden ser fácilmente recubiertos con una película de asfalto, pero la película se adhiere de modo más efectivo a las superficies rugosas.

Forma de los agregados

Agregado de canto rodado

El agregado de canto rodado presenta un bajo grado de fricción interna entre sus partículas, provocando que las partículas de agregado se desplacen unas respecto a otras debido a las fuerzas ejercitadas por el tráfico, puede presentarse con el agregado grueso o agregado fino.

Las partículas alargadas son indeseables porque tienden a quebrarse durante la construcción y cuando es sometido al tráfico vehicular, provocando que el pavimento no sea estable y capaz de mantener su forma y figura bajo las cargas repetitivas; y por lo tanto, un pavimento inestable desarrolla ahuellamiento (canales), ondulaciones (corrugaciones) y otras señas que indican cambios en la mezcla.

La estabilidad de una mezcla depende de la fricción interna y de la cohesión; la fricción interna en las partículas de agregado (fricción entre partículas) está relacionada con características del agregado tales como la forma y textura superficial.

Una mezcla asfáltica cuando presenta mayor porcentaje de material canto rodado, más baja será la estabilidad de la mezcla y por otro lado, la resistencia al desplazamiento y deformación será menor; se puede considerar el de utilizar canto rodado para obtener mezclas más económicas, y donde el tráfico sea liviano.

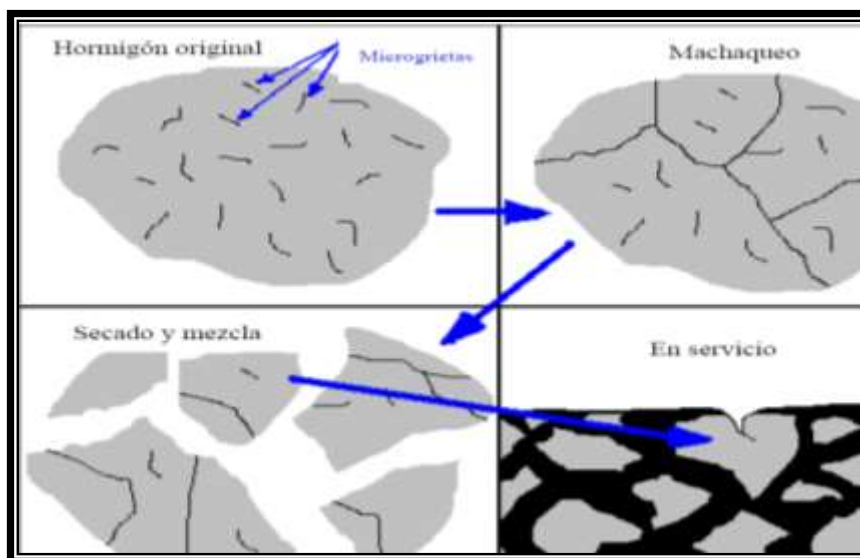
Los agregados de canto rodado bajan la resistencia de la mezcla, ya que el contenido de vacíos y el asfalto se adhieren con mayor facilidad, se aumenta así la trabajabilidad y la compactibilidad.

Las consecuencias de tener un bajo contenido de vacíos pueden originar inestabilidad o fluencia después de que el pavimento haya sido expuesto al tráfico por un determinado periodo de tiempo, a causa de un reacondicionamiento de las partículas y compactación adicional. (*Propiedades Mecánicas de Mezclas en caliente con áridos de RCD de la Ing. Ana María Rodríguez Pasandín*).

Agregado triturado

La forma de las partículas altera la trabajabilidad de la mezcla para pavimentación como así el esfuerzo necesario de compactación para obtener la densidad requerida. La forma de las partículas influye en la resistencia de la mezcla, las partículas irregulares y angulosas tales como la piedra triturada y algunas gravas y arenas naturales tienden a trabarse cuando son compactadas y resistir el desplazamiento.

Figura 2.16 Dilatación de dos partículas de agregado cuando están sometidos a esfuerzo de corte



Fuente: (*Propiedades Mecánicas de Mezclas en caliente con áridos de RCD de la Ing. Ana María Rodríguez Pasandín*)

Generalmente se obtiene una mejor trabazón con partículas de forma cónica y aristas angulosas; dicha trabazón es mínima con partículas redondeadas.

Las partículas redondeadas, tales como la grava y arenas naturales procedentes de los lechos de corrientes de agua, son usadas con éxito en mezclas asfálticas para pavimentación, especialmente las de granulometría cerrada.

Muchas mezclas asfálticas contienen partículas de agregado angulares y redondeadas, la fracción de agregado grueso es usualmente ripio o piedra triturada y el agregado fino es generalmente arena natural (partículas redondeadas). Tales mezclas usualmente confían la resistencia principalmente el agregado triturado y la trabajabilidad y compactabilidad a las partículas redondeadas de arena.

Los agregados triturados tienden a incrementar la resistencia a la mezcla y requieren un porcentaje adicional de asfalto para compensar la pérdida de trabajabilidad. El contenido de vacíos para estos agregados son casi siempre mayores, lo cual provee un espacio extra para el aumento necesario de asfalto. (*Propiedades Mecánicas de Mezclas en caliente con áridos de RCD de la Ing. Ana María Rodríguez Pasandín*).

Porosidad de los agregados

La porosidad de un agregado se indica comúnmente por la cantidad de líquido que absorbe cuando se o embebe en agua. Un agregado poroso absorberá asfalto, lo cual hace que una mezcla asfáltica sea seca o menos cohesiva.

En estas mezclas debe ser incorporada una cantidad extra de asfalto para satisfacer la absorción del agregado. Los agregados muy porosos tienden a requerir una cantidad significativa de asfalto extra para compensar el alto tenor de absorción. Los agregados altamente porosos no son normalmente usados, a menos que posean otras cualidades que los hagan ventajosos, a pesar de su absorción. (*Propiedades Mecánicas de Mezclas en caliente con áridos de RCD de la Ing. Ana María Rodríguez Pasandín*).

Afinidad de los agregados con el asfalto

Una mala adherencia del agregado con el cemento asfáltico puede ocurrir si se presenta una o varias de las siguientes causas simultáneas: existencia de una película de agua absorbida o de impurezas en la interface (climas húmedos, mezclas en frío, agregados sucios); o también puede ser por el mojado defectuoso de la superficie del agregado como consecuencia de una viscosidad muy alta del ligante, de una temperatura muy elevada del agregado o por incompatibilidad físico-químico entre el ligante y el agregado.

La mala cantidad de los agregados provoca la pérdida sucesiva de material superficial por la abrasión del clima y/o del tráfico. Usualmente el agregado fino se desprende primero dejando maracas de pequeñas picaduras en la superficie del pavimento. A medida que continúa la erosión, las partículas mayores eventualmente se desprenden y

el pavimento pronto tiene una apariencia áspera y mellada típica de la erosión superficial, el desprendimiento, por lo tanto, es causado por agregados de baja calidad. (*Propiedades Mecánicas de Mezclas en caliente con áridos de RCD de la Ing. Ana María Rodríguez Pasandín*).

CAPÍTULO III

ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS

3.1 LUGAR DE EXTRACCIÓN DEL AGREGADO

Para realizar las investigaciones, fue necesario efectuar ensayos de los materiales componentes de una mezcla asfáltica en caliente para conocer sus características y propiedades y, de este modo, obtener la información de los datos básicos para el diseño de las mezclas. Todos los ensayos fueron hechos de acuerdo a la norma AASHTTO, la validez de los resultados se compararon con las limitaciones impuestas por esa norma. Es necesario que los asfaltos de petróleo usados en la construcción de pavimentos sean asfaltos uniformes y cumplan los requerimientos de calidad. El cemento asfáltico a utilizar es de grado de penetración 85-100.

Como es importante conocer las características de los agregados, para el presente proyecto se utilizarán materiales existentes en los afluentes de Tarija; los bancos de materiales (canteras) de agregados fueron identificados considerando su uso común en la práctica constructiva regional, en este caso el agregado a emplear es de la Planta seleccionadora de áridos de la Pintada localidad de Santa Ana, río Guadalquivir (Empresa Erika) y agregado de residuos de construcción y demolición.

La cantera de Santa Ana se localiza a unos 12 Km. al sur de la ciudad de Tarija, al lado de la carretera panamericana Tarija-Padcaya, sobre el río Santa Ana, el material es ampliamente utilizado en la región como árido fino (arena) y limpio. Los bancos se ubican en los meandros (curvas), del curso del río, que son los lugares donde se acumula mayor cantidad de material.

La cantera del Guadalquivir está localizada a 7 Km al norte de la ciudad de Tarija, sobre el río Guadalquivir. La vía de acceso es casi en su totalidad pavimentada, el árido grueso de la zona (grava y canto rodado) es procesado por la empresa Erika (Planta de Trituración), y es utilizado en la pavimentación, como también en las obras civiles.

Lo novedoso, en este estudio es la inclusión del agregado de residuos de construcción y demolición (RCD), ya sea de construcciones arquitectónicas o civiles, como un nuevo material en el diseño de un pavimento ligado a una mezcla densa en caliente para ver sus nuevas aplicaciones.

3.2 EVALUACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO

Este trabajo está enmarcado dentro de una investigación realizada en laboratorio con el objetivo de determinar la calidad del cemento asfáltico, mediante la verificación del cumplimiento de especificaciones y la obtención de las características que presenta a diferentes temperaturas.

Los ensayos de laboratorio se efectuaron sobre:

Muestra original para cementos asfálticos 85-100; los resultados de laboratorio obtenidos determinan la calidad de los cementos asfálticos mediante su verificación con el cumplimiento de las especificaciones del Servicio Nacional de Caminos (Laboratorio Central), permitiendo el cálculo de las temperaturas de mezclado y compactación a utilizarse en la elaboración de mezclas asfálticas en caliente.

Además, estos resultados especifican el deterioro que sufren los cementos asfálticos durante la operación de mezclado en planta. Se efectuaron los siguientes ensayos de calidad:

Tabla 3.1: **Ensayos del cemento asfáltico (85-100)**

Ensayo	Unidad	Valor	Especificaciones		Designación AASHTO
			Mínimo	Máximo	
Penetración a 25°C, 100grs, 5 seg.	mm.	97,3	85	100	T-49
Viscosidad Saybolt Furol a 135°C	seg.	190	> 85		T-72
Punto de Inflamación	°C	248	>232		T-48
Peso Específico	grs/cm ³	0,998	1.000	1.050	T-228
Punto de Ablandamiento	°C	49,50	43	53	T-53

Fuente: Elaboración propia

Las condiciones climáticas en Bolivia varían ampliamente en las tres regiones geográficas del altiplano valles y llanos. Las distribuciones de las temperaturas dependen de la altura que varía anualmente desde cerca de 25°C en los llanos hasta 18°C en los valles y 10°C en el altiplano. La temperatura máxima extrema del altiplano alcanza a 25°C y la mínima extrema a 26°C bajo cero que fue registrada en Uyuni, en

Agosto de 1946. Debido a la gran variación de temperaturas, se tomaron puntos de referencia en cada uno de los departamentos de Bolivia, en los que se obtuvo para Tarija una temperatura media de 18.7 °C, temperatura máxima de 37.5 °C, y la temperatura mínima de -7.4 °C.

La elección del grado de cemento asfáltico más adecuado para cada región del país, tiene como objetivo evitar el fisuramiento transversal por contracción térmica a bajas temperaturas y conferir a la mezcla asfáltica, la estabilidad suficiente a temperatura elevada a través del módulo de rigidez adecuado para soportar las deformaciones impuestas por el tránsito. El envejecimiento del asfalto, es un proceso de oxidación, que se indica en el calentamiento y mezclado del material en la planta asfáltica y prosigue durante el tiempo sometido a las diferentes condiciones de servicio, en forma progresiva. Son diversos y de distinta naturaleza, los factores que influyen en el grado de alteración de la estructura coloidal del asfalto (temperatura de calentamiento y mezclado, contenidos de vacíos de la mezcla asfáltica en servicio, etc.), pero en todos los casos este fenómeno se refleja en un aumento progresivo de su consistencia, medida mediante los ensayos de Penetración, Viscosidad y en menor cuantía con el ensayo de Punto de ablandamiento.

La importancia del ensayo de Penetración es para permitir la consistencia o dureza relativa de los asfaltos sólidos y semi-sólidos, además es útil para efectos de clasificación de los cementos asfálticos. El valor que se registró de la penetración ensayada, como se muestra en el cuadro anterior, es de 97.3 mm. Por estar más cerca de 100 mm., esto nos indica que es un asfalto que tiene tendencia a ser blando y, por lo tanto de acuerdo al dato obtenido nos indica que es un cemento asfáltico 85-100, en el caso de registrar una penetración menor (un valor cercano al 85), predice que la rigidización de la mezcla asfáltica, la cual pasados ciertos límites, significa la aparición temprana de fisuras, grietas y desprendimientos debido a la incapacidad del asfalto de otorgar a la mezcla las condiciones necesarias de deformabilidad.

El ensayo de viscosidad tiene la finalidad de determinar la Viscosidad Saybolt Furol de materiales bituminosos, este ensayo se realizó a diferentes temperaturas (125°C, 135°C, 145°C), ayuda a determinar la temperatura a la cual se debe realizar el mezclado en planta y la temperatura a la cual se debe compactar la mezcla en plataforma; según

el ensayo, se obtuvo a 135°C un tiempo de 190 seg., lo cual equivale a la viscosidad de 190.

El punto de inflamación y combustión del asfalto se determina mediante el ensayo en vaso abierto de Cleveland, el punto de encendido no debe ser confundido con un halo azulado, que a veces circunda a la llama piloto. El conocimiento del punto de encendido y del punto de combustión del asfalto y de los productos del petróleo, con excepción de los aceites combustibles (fuel-oíl), es importante, desde la perspectiva de la prevención y evaluación de las condiciones de resistencia ante la eventualidad de algún accidente relacionado con el aumento considerable de la temperatura del asfalto, éste puede ser un incendio de gran magnitud o bien alguna explosión.

Todos los líquidos y la mayor parte de los sólidos sufren cambios de volumen cuando varía la temperatura, se expanden cuando se calientan y se contraen cuando se enfrían. El conocer el peso específico del cemento asfáltico puede servir para hacer correcciones de volumen cuando estos se miden a temperaturas elevadas.

El peso específico obtenido del ensayo es de 0.998 grs/cm³, lo que indica un valor fuera de lo propuesto en las especificaciones, por lo tanto, se debe realizar las correspondientes correcciones en el diseño de las mezclas asfálticas.

El ensayo del punto de ablandamiento tiene como objetivo determinar el punto de ablandamiento del cemento asfáltico en un intervalo comprendido entre los 30°C y los 175°C, este procedimiento es válido también para alquitranes.

Es importante conocer la influencia que la temperatura tiene sobre el material asfáltico, para inferir (deducir) su comportamiento y reacción, bajo ciertas condiciones especiales, a las que podría estar sometido.

3.3 EVALUACIÓN DE LOS AGREGADOS

a) Granulometría.-

1.- Gradación fina.- Para la ejecución de los dos primeros ensayos, se utilizó la gradación fina, con el propósito de ver la influencia de los finos en las mezclas asfálticas en caliente. Los agregados son combinados en el mismo porcentaje, para observar su influencia, pero se presenta la dificultad con las especificaciones, a pesar que de que se cuenta con una faja ancha

Gradación Fina (agregados pasa tamiz 3/4")

Tabla 3.2 **Gradación Fina**

PRIMERA COMBINACIÓN (SANTA ANA)			
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	RELACIÓN
A.G.T. de 3/4" (Río Santa Ana)	%	15	en peso
A.F.T. de 3/8" (Río Santa Ana)	%	40	en peso
Arena triturada (Río Santa Ana)	%	45	en peso
Total	%	100	en peso

SEGUNDA COMBINACIÓN (GUADALQUIVIR)			
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	RELACIÓN
A.G.T. de 3/4" (Río Guadalquivir)	%	15	en peso
A.F.T. de 3/8" (Río Guadalquivir)	%	40	en peso
Arena triturada (Río Guadalquivir)	%	45	en peso
Total	%	100	en peso

Fuente: Elaboración propia

TERCERA COMBINACIÓN (RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN)			
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	RELACIÓN
A.G.T. de 3/4"	%	15	en peso
A.F.T. de 3/8"	%	40	en peso
Residuos de arena de construcción	%	45	en peso
Total	%	100	en peso

Fuente: Elaboración propia

Las especificaciones para la gradación fina utilizado en el presente proyecto es extraído de las especificaciones de la Administradora Boliviana de Carretera (A.B.C.)

Tabla 3.3 Granulometría de las Mezclas proporción fino-grueso

CANTERA	STA. ANA	GUADAL.	R.C.D.	ESPECIF.
PROPORCIÓN	78 – 22%	79 – 21%	60 – 40%	
TAMIZ	% que pasa	% que pasa	% que pasa	
3/4"	100,0	100,0	100,0	100-100
1/2"	94,1	97,8	94,9	85-100
3/8"	89,1	92,2	89,0	75-100
Nº4	76,9	77,1	61,9	50-85
Nº10	59,2	54,1	40,9	30-75
Nº40	37,1	25,4	19,7	15-40
Nº80	19,8	10,6	14,1	8-30
Nº200	7,8	4,7	4,4	5-10

Fuente: Elaboración propia

Se realizó cada dosificación con cada cantera respectivamente, con el mismo porcentaje de aportación de los agregados en cada corte granulométrico, la intención es la de verificar la influencia de cada una de las granulometrías en las mezclas asfálticas en caliente. Más adelante en los diseños Marshall se indica cuál es su influencia, causas y efectos de cada granulometría.

La tabla anteriormente indicada representa cada dosificación que se ejecutó, con agregados de un solo afluyente (cantera) de una zona determinada, en la que se verifica que las proporciones de aportación tanto del agregado fino y grueso entre el río Santa Ana y el Guadalquivir tienen una similitud. Por otro lado, no ocurre lo mismo con los agregados de tipo Hormigón que vienen de los residuos de construcción y demolición, ya que se evidencia que el aporte del agregado grueso es del 40%. Por lo tanto, se establece que tiene mayor porcentaje de agregado grueso con 20% más que los otros agregados de cantera.

Los materiales utilizados para el ensayo son triturados, y como se puede observar la granulometría de los porcentajes del río Santa Ana, tiene una tendencia a ser más fina con referencia al río Guadalquivir.

2.- Gradación gruesa.- Para los ensayos cuatro, cinco y seis se utilizó una gradación gruesa, con el propósito de ver la influencia de los agregados en las mezclas asfálticas en caliente y cómo es su textura proyectada según las probetas Marshall.

Gradación Gruesa (agregados pasa tamiz 1")

Tabla 3.4 **Gradación gruesa**

CUARTA COMBINACIÓN (SANTA ANA-SANTA ANA)			
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	RELACIÓN
A.G.T. de 1" (Río Santa Ana)	%	32	en peso
A.F.T. de 1/2" (Río Santa Ana)	%	21	en peso
A.F.T. de 1/2"-N°30 (Río Santa Ana)	%	38	en peso
Arena Fina (Río Santa Ana la nueva)	%	9	en peso
TOTAL	%	100	en peso

Fuente: Elaboración propia

QUINTA COMBINACIÓN (GUADALQUIVIR-SANTA ANA)			
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	RELACIÓN

A.G.T. de 1" (Río Guadalquivir)	%	20	en peso
A.F.T. de 1/2" (Río Guadalquivir)	%	35	en peso
A.F.T. de 3/8" (Río Guadalquivir)	%	32	en peso
Arena Fina (Río Santa Ana la nueva)	%	13	en peso
TOTAL	%	100	en peso

Fuente: Elaboración propia

SEXTA COMBINACIÓN (R.C.D-GUADALQUIVIR-SANTA ANA)			
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	RELACIÓN
A.G.T. de 1" (R.C.D)	%	25	en peso
A.F.T. de 1/2"-Nº8 (Río Guadalq.)	%	32	en peso
A.F.T. de 3/8" (Río Guadalquivir)	%	33	en peso
Arena Fina (Río Santa Ana la nueva)	%	10	en peso
TOTAL	%	100	en peso

Fuente: Elaboración propia

Las especificaciones para la gradación gruesa utilizado en el presente proyecto es extraído de las presentadas por la Administradora Boliviana de Carretera (A.B.C.)

Tabla 3.5 Granulometría de las mezclas proporción fino-grueso

CANTERA	STA A.-STA A.	GUAD-STA A.	R.C.D-GUAD-STA A.	ESPECIF.
PROPORCIÓN	50.5 – 49.5	49.5 – 50.5	49.5 – 50.5	
TAMIZ	% que pasa	% que pasa	% que pasa	
1"	100,0	100,0	100,0	100-100
3/4"	93,2	94,2	90,1	86-100
1/2"	76,4	78,3	77,6	66-86
3/8"	67,9	69,3	67,9	57-77
Nº4	52,1	51,2	50,2	40-60
Nº8	36,6	38,1	36,7	26-46
Nº16	28,4	27,8	24,7	17-37
Nº30	20,5	19,5	19,7	11-27
Nº50	15,1	13,7	12,5	7-19
Nº100	11,7	10,1	8,0	6-16
Nº200	5,7	4,1	4,0	3-6

Fuente: Elaboración propia

Se realizó la combinación entre agregados de diferentes canteras, para así lograr una curva uniforme, debido a que de una sola cantera no se consigue, una buena gradación de los agregados y, de esa manera, cumplir con las especificaciones.

En cada dosificación se utilizó agregados de diferentes canteras, con diferentes porcentajes de aportación de los agregados en cada corte granulométrico, de acuerdo a las necesidades y requerimientos de las especificaciones, con la intención de verificar la influencia de cada una de las granulometrías en las mezclas asfálticas en caliente. Más adelante en los diseños Marshall se indica cuál es la influencia, causas y efectos de cada granulometría.

La tabla anteriormente indicada representa cada dosificación ejecutada con los agregados combinados de diferentes canteras.

Así por ejemplo, para la realización del Marshall con agregados del río Santa Ana (combinación cuarta), fue necesaria la utilización de arena fina encontrada aguas arriba de la planta de trituración de Sergut, (zona de la Pintada) aproximadamente a unos 10 a 12 Km. De igual manera se hizo con el Marshall del río Guadalquivir (combinación quinta), para la cual se utilizó la misma arena fina encontrada aguas arriba de la Planta de trituración de Sergut, (zona de la Pintada).

Para realizar el Marshall de los agregados de residuos de construcción y demolición (combinación sexta), se empleó agregados del río Guadalquivir y también fue necesaria la utilización de la misma arena fina encontrada aguas arriba de la planta de trituración de Sergut. (*Elaboración propia*).

b) Resistencia al desgaste por abrasión

Tabla 3.6 Porcentaje de desgaste los ángeles y porcentaje de laminaridad

(Agregado natural)

CANTERA	% con gradación "B"	% de alargamiento	% de laminaridad
SANTA ANA (Pintada)	32,0	6,6	6,0
GUADALQUIVIR (Erika)	30,7	10,9	3,2
Residuos de construcción y demolición (R.C.D)	22,6	9,6	11,1

Fuente: Elaboración propia

c) Cubicidad del agregado

Tabla 3.7 **Porcentaje de desgaste los Ángeles y porcentaje de cubicidad de la mezcla (Agregado triturado)**

CANTERA	% con gradación		% de laminaridad	% de caras fracturadas
	“B”	“C”		
COMBINACION CUARTA	32,3	28,7	11,1	94,2
COMBINACION QUINTA	25,7	24,9	18,0	91,7
COMBINACION SEXTA	26,2	22,4	7,0	84,0

Fuente: Elaboración propia

Los agregados utilizados para la realización de los diferentes ensayos son materiales triturados manualmente o mecánicamente; los del río Santa Ana y río Guadalquivir proceden de las plantas de trituraciones “Sergut” y “Erika” y los agregados de residuos de construcción y demolición (R.C.D), son agregados triturados manualmente.

El ensayo de desgaste para los agregados naturales y de la mezcla de agregados triturados se ejecutó con la gradación “B” porque el material empleado es el pasante del tamiz de 1” (tamiz de referencia), por lo tanto es adecuado el tipo de gradación “B”, el motivo es porque en las mezclas asfálticas rara vez se utilizan agregados mayores al tamiz de referencia (tamiz 1”).

En la tabla, se muestra el desgaste de los agregados, en un porcentaje menor al desgaste por abrasión cuando el tamaño de los agregados es menor; y ocurre todo lo contrario cuando el agregado es de mayor tamaño. La ejecución del ensayo se realizó con la gradación “B” utilizando agregados que pasan el tamiz 3/8” y retenido en N°4 y para la gradación “A” con agregados de 3/4”, es evidente un mayor desgaste en la columna de la gradación “B”.

En este ensayo se demuestra que agregados de un mismo río, pero de diferentes zonas de extracción, no son iguales en la geometría de sus partículas. Luego de que estos materiales son procesados industrialmente, es decir triturados o chancados, el porcentaje de la geometría de las partículas es diferente; pero continúa dentro de los requerimientos deseados por las especificaciones.

Con otra porción de los agregados, anteriormente utilizados, se realizó el ensayo de laminaridad; en la tabla se puede apreciar una similitud entre las canteras a acepción del río Santa Ana, que presenta un menor porcentaje de laminaridad. Con respecto a las caras fracturadas, el porcentaje está dentro de los requerimientos.

d) Peso específico y absorción del agregado

Tabla 3.8 Peso específico y porcentaje de absorción agregado fino (natural)

CANTERA	PESO ESPECÍFICO (gr/cm ³)			% de absorción
	“G”	“Gb”	“Gbs”	
SANTA ANA (Pintada)	2,771	2,619	2,574	2,10
GUADALQUIVIR (Erika)	2,711	2,627	2,658	1,18
Residuos de Arena de Construcción	2,769	2,638	2,685	1,80

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.9 Peso específico y porcentaje de absorción agregado grueso (natural)

CANTERA	PESO ESPECÍFICO (gr/cm ³)			% de absorción
	“G”	“Gb”	“Gbs”	
SANTA ANA (Pintada)	2,614	2,541	2,572	1,02
GUADALQUIVIR (Erika)	2,641	2,546	2,582	1,42
Residuos de construcción y demolición (R.C.D)	2,666	2,582	2,613	1,23

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.10 Peso específico (gr/cm³) de la mezcla de agregados proporción fino: grueso

CANTERA	PROPORCION FINO: GRUESO	PESO ESPECIFICO “Gb” (gr/cm ³)
COMBINACION CUARTA	49,5:50,5	2,583
COMBINACION QUINTA	55,0:45,0	2,582
COMBINACION SEXTA	49,5:50,5	2,636

Fuente: Elaboración propia

Como indicamos anteriormente, los agregados de un mismo río pero de diferentes zonas o bancos de extracción no son iguales en la geometría de sus partículas, las características mineralógicas y su origen geológico; lo que proporciona diferentes valores de pesos específicos. La elección del peso específico de un agregado usado en los cálculos de una mezcla asfáltica podría tener un efecto sustancial sobre la cantidad calculada de vacíos en el pavimento compactado. El peso específico del agregado en la mezcla depende del grado en el que el mismo absorbe el asfalto; son tres los tipos de pesos específicos utilizados en el presente ensayo: El peso específico aparente “G”, el peso específico efectivo “Gb” y el peso efectivo con superficie saturada seca “Gbs”. De los tres, el peso específico “Gb” es el que se aproxima más al valor verdadero para la determinación de los vacíos de la mezcla asfáltica compactada.

Como el asfalto es más viscoso que el agua, usualmente penetrará en los huecos menos que el agua y, por lo tanto, es necesario que la absorción del agregado deba ser menor a 2%. En el caso de agregados del río Santa Ana, donde existe un porcentaje de absorción mayor al 2%, se debe realizar un incremento en el porcentaje de asfalto durante el mezclado para llenar el exceso de huecos. Con el fin de obtener un menor porcentaje de error en la absorción de asfalto, en lo posible, se debe utilizar agregados con un bajo porcentaje de absorción.

En las tablas se detalla la diferencia entre el peso específico fino y el peso específico grueso y como se puede apreciar hay una diferencia sustancial entre ambos y lo mismo ocurre con la absorción donde se tiene valores más altos para los finos.

e) Equivalente de arena

Los valores del equivalente de arena del agregado natural son mayores en referencia al agregado triturado de la combinación cuarta, quinta y sexta. Según las especificaciones, el agregado natural cumple con los valores del equivalente de arena, pero por condiciones estructurales (baja resistencia a la fricción interna y al ahuellamiento) no se debe utilizar agregados de canto rodado.

Tabla 3.11 **Porcentaje de equivalente de arena (agregado natural)**

CANTERA	UNIDAD	EQUIVALENTE DE ARENA
SANTA ANA (Pintada)	%	69
GUADALQUIVIR (Erika)	%	65
Residuos de arena de construcción	%	62

Fuente: Elaboración propia

Cuando se utilizan agregados triturados el valor del equivalente de arena es menor al canto rodado como se puede observar en la siguiente tabla.

Tabla 3.12 **Porcentaje de equivalente de arena de la mezcla de agregados (Agregado triturado)**

CANTERA	UNIDAD	EQUIVALENTE DE ARENA
COMBINACIÓN CUARTA	%	55
COMBINACIÓN QUINTA	%	58
COMBINACIÓN SEXTA	%	66

Fuente: Elaboración propia

En el caso de que un determinado agregado arroje valores de equivalente de arena menor al 45% como se indica en las especificaciones, esto nos indica que el agregado contiene ciertas sustancias extrañas que lo hacen inadecuado o perjudicial para ser empleado en las mezclas asfálticas de pavimentación.

f) Afinidad con el asfalto

Los agregados utilizados para realizar el ensayo de la adherencia del agregado, son agregados naturales y la combinación con agregado triturado.

Tabla 3.13 **Porcentaje de adherencia del agregado (agregado natural)**

CANTERA	UNIDAD	ADHERENCIA DEL AGREGADO
SANTA ANA (Pintada)	%	99
GUADALQUIVIR (Erika)	%	100
Residuos de arena de construcción	%	100

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.14 **Porcentaje de adherencia de la mezcla de agregados (Agregado triturado)**

CANTERA	UNIDAD	ADHERENCIA DEL AGREGADO
COMBINACIÓN CUARTA	%	98
COMBINACIÓN QUINTA	%	98
COMBINACIÓN SEXTA	%	98

Fuente: Elaboración propia

Los agregados naturales, por la geometría de sus partículas, presentan valores de adherencia con el cemento asfáltico mayor con respecto a los agregados triturados, pero como se dijo anteriormente por las condiciones estructurales, el agregado natural no puede utilizarse en las mezclas asfálticas.

g) Resistencia a los sulfatos

Tabla 3.15 **Porcentaje de resistencia a los sulfatos (agregado natural)**

CANTERA	UNIDAD	RESISTENCIA A LOS SULFATOS
SANTA ANA (Pintada)	%	4,46
GUADALQUIVIR (Erika)	%	3,82

Residuos de arena de construcción	%	2,17
-----------------------------------	---	------

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.16 **Porcentaje de resistencia a los sulfatos de la mezcla de agregados (Agregado triturado)**

CANTERA	UNIDAD	RESISTENCIA DEL AGREGADO
COMBINACIÓN CUARTA	%	4,23
COMBINACIÓN QUINTA	%	3,09
COMBINACIÓN SEXTA	%	2,33

Fuente: Elaboración propia

De similar manera que el anterior ensayo, se utilizó agregado natural y para las combinaciones cuarta, quinta y sexta se empleó el agregado triturado. Para este tipo de ensayo, las características mineralógicas y su origen geológico tienen una gran incidencia en la resistencia a los sulfatos de los agregados. (*Elaboración propia*).

3.4 VARIACIÓN EN LA MEZCLA ASFÁLTICA SEGÚN LA PROCEDENCIA Y COMBINACIÓN DE LOS AGREGADOS

Tabla 3.17 **Análisis de los resultados de gradación fina**

Tabla 3.17 (a): número de combinación y procedencia de los agregados

Combinación	Procedencia del agregado
1 ^a	Río Santa Ana (planta de trituración "Sergut")
2 ^a	Río Guadalquivir (planta de trituración "Erika")
3 ^a	Residuos de Arena de Construcción

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.17 (b): porcentaje de agregado para cada combinación

Combinación	AGT-3/4" (%)	AGT-3/8" (%)	AFTT-Nº4 (%)
1 ^a	15,0	40,0	45,0
2 ^a	15,0	40,0	45,0
3 ^a	15,0	40,0	45,0

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.17 (c): valores característicos de la mezcla asfáltica para cada combinación

Combinación	Densidad (grs/cm3)	Vacíos de la mezcla (%)	R.B.V. (%)	Estabilidad (Lb)	Fluencia (1/100")	C.A %
1 ^a	2,293	3,8	78,0	2455	12,5	5,75
2 ^a	2,297	3,8	78,0	2540	13,7	5,90
3 ^a	2,319	3,2	81,0	2680	14,7	6,12

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.18 Análisis de los resultados de gradación gruesa

Tabla 3.18 (a): número de combinación y procedencia de los agregados

Combinación	Procedencia del agregado
4 ^a	Río Guadalquivir (Erika) y arena fina (Santa Ana la Nueva)
5 ^a	Río Santa Ana (Sergut) y arena fina (Santa Ana la Nueva)
6 ^a	(R.C.D), Rio Guadalquivir (Erika) y arena fina (Santa Ana la Nueva)

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.18 (b): porcentaje de agregado para cada combinación

Combinación	AGT 1" (%)	AGT 1/2" (%)	AFT N°4 (%)	Arena Fina (%)	1/2"- N°30 (%)	1/2"- N°8 (%)	AGT 3/8" (%)
4 ^a	32,0	21,0		9,0	38,0		
5 ^a	20,0	35,0	32,0	13,0			
6 ^a	25,0			10,0		32,0	33,0

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.18 (c): valores característicos de la mezcla asfáltica para cada combinación

Combinación	Densidad (grs/cm3)	Vacíos de la mezcla (%)	R.B.V. (%)	Estabilidad (Lb)	Fluencia (1/100")	C.A %
4 ^a	2,278	4,0	75,5	2270.0	10,0	5,50
5 ^a	2,303	3,4	78,0	2340.0	11,3	5,27
6 ^a	2,314	4,4	75,0	2380.0	9,0	5,50

Fuente: Elaboración propia

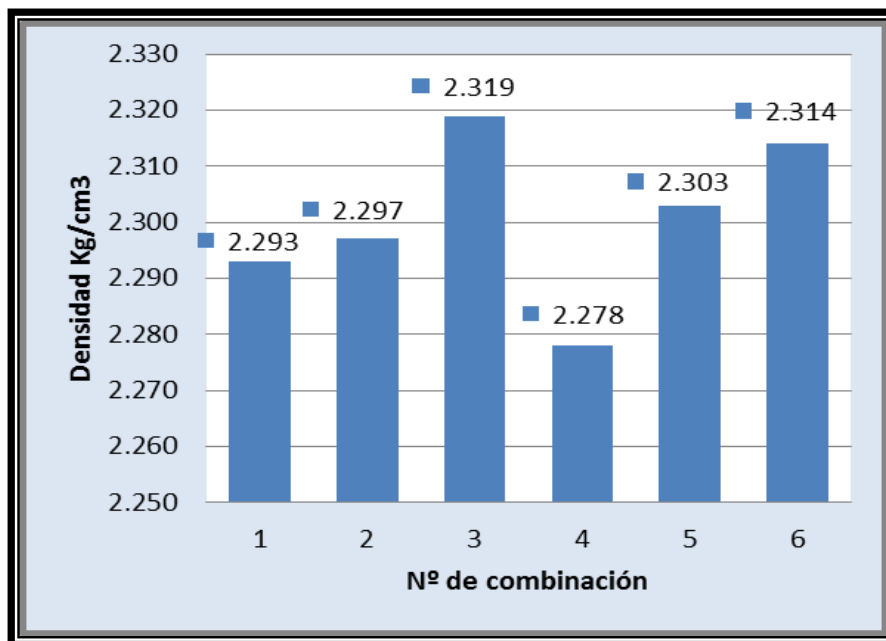
a) Variación de la densidad según la procedencia y combinación de los agregados

Tabla 3.19 **Variación de la densidad en la mezcla asfáltica según la procedencia y combinación de los agregados**

Combinación	Densidad (Kg/cc)	Gradación
1 ^a	2,293	Fina
2 ^a	2,297	
3 ^a	2,319	
4 ^a	2,278	Gruesa
5 ^a	2,303	
6 ^a	2,314	

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.1 **Variación de la densidad en la mezcla asfáltica según la procedencia y combinación de los agregados**



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica anterior se puede observar cómo la mezcla asfáltica con agregados procedentes de los residuos de construcción y demolición presenta una mayor densidad, tanto en la gradación fina como en la gradación gruesa.

Así mismo se puede apreciar que la densidad con agregados del río Santa Ana es menor en comparación al resto de las combinaciones. En los dos casos de la gradación fina y gruesa, la densidad tiene una directa relación con el contenido de vacíos de la mezcla.

En la tercera combinación, se tiene una mayor densidad y por lo tanto, se obtendrá menor porcentaje de vacíos en la mezcla y viceversa. Por otro lado, con la cuarta combinación, como se tienen menor valor en la densidad, se obtendrá mayor porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica compactada.

La densidad es una característica muy importante, por lo que se recomienda tener una alta densidad en la mezcla asfáltica terminada (pavimento compactado) y, de esa manera, será duradero.

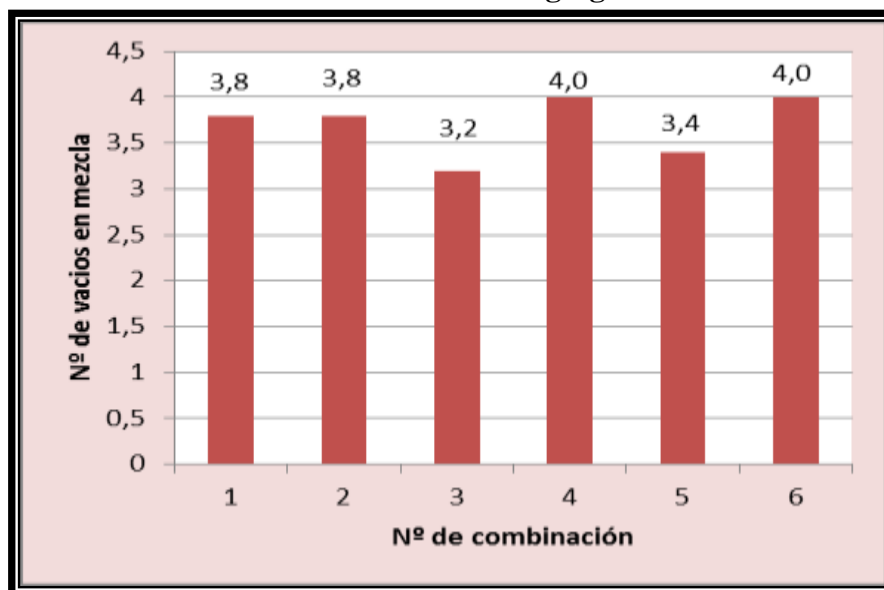
b) Variación del porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica según la procedencia y combinación de los agregados

Tabla 3.20; **Variación de los vacíos en la mezcla asfáltica según la procedencia y combinación de los agregados**

Combinación	Vacíos de la mezcla (%)	Gradación
1 ^a	3,8	Fina
2 ^a	3,8	
3 ^a	3,2	
4 ^a	4,0	Gruesa
5 ^a	3,4	
6 ^a	4,0	

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.2 **Variación de los vacíos en la mezcla asfáltica según la procedencia y combinación de los agregados**



Fuente: Elaboración propia

El porcentaje de vacíos es mayor cuando se realiza una gradación gruesa; y ocurre lo contrario cuando se elabora una gradación fina, pues el porcentaje de vacíos es menor. Se define como porcentaje de vacíos a las pequeñas bolsas de aire que se encuentran presentes en la mezcla final compactada.

Es necesario que todas las mezclas contengan un cierto porcentaje de vacíos para permitir una compactación adicional bajo el tráfico.

Como se observa en la gráfica la combinación tercera presenta una menor cantidad de vacíos y, por lo tanto, será menor la permeabilidad de la mezcla, pero el bajo contenido de vacíos puede producir exudación de asfalto. En el caso de la combinación cuarta y sexta, el contenido de vacíos es más alto lo que proporciona un pasaje, a través de la mezcla, por los cuales puede entrar agua y aire causando un prematuro deterioro en el pavimento.

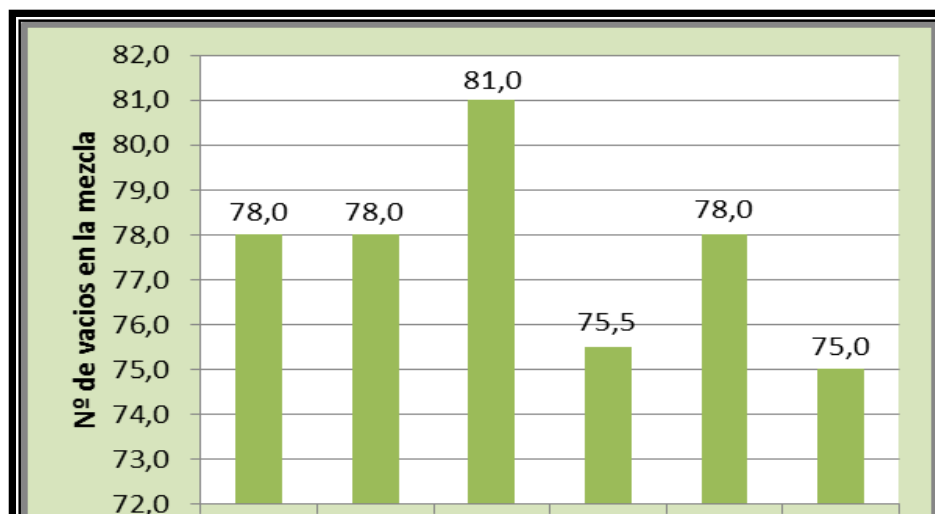
c) Variación de la relación betumen vacíos (R.B.V.) en la mezcla asfáltica según la procedencia y combinación de los agregados

Tabla 3.21: Variación de la relación betumen vacíos (R.B.V.) en la mezcla asfáltica según la procedencia y combinación de los agregados

Combinación	R.B.V. (%)	Gradación
1 ^a	78,0	Fina
2 ^a	78,0	
3 ^a	81,0	
4 ^a	75,5	Gruesa
5 ^a	78,0	
6 ^a	75,0	

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.3 Variación de la relación betumen vacíos en la mezcla asfáltica según la procedencia y combinación de los agregados



Fuente: Elaboración propia

La relación betumen vacíos (R.B.V.) vincula el porcentaje de cemento asfáltico con el porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica compactada.

Con los ensayos realizados, se establece la directa relación que existe entre el porcentaje de vacíos en la mezcla y la relación betumen vacíos. En el análisis del porcentaje de vacíos en la mezcla, las combinaciones primera y segunda tienen similitud en los valores y como consecuencia se tiene valores iguales en el porcentaje de la relación betumen vacíos. En la combinación tercera obtiene el menor porcentaje de vacíos y por lo tanto, el valor del porcentaje es mayor en la relación betumen vacíos, como se puede observar en la gráfica. En las combinaciones cuarta y sexta, el porcentaje de vacíos es mayor en relación al resto, y se presenta en la gradación gruesa.

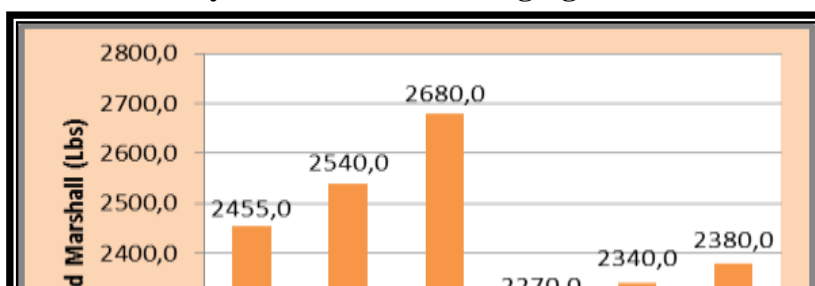
d) Variación de la estabilidad en la mezcla asfáltica según la procedencia y combinación de los agregados

Tabla 3.22: Variación de la estabilidad en la mezcla asfáltica según la procedencia y combinación de los agregados

Combinación	Estabilidad (Lb)	Gradación
1 ^a	2455	Fina
2 ^a	2540	
3 ^a	2680	
4 ^a	2270	Gruesa
5 ^a	2340	
6 ^a	2380	

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.4 Variación de la estabilidad en la mezcla asfáltica según la procedencia y combinación de los agregados



La gradación fina es una mezcla asfáltica más densificada en comparación a gradación gruesa, dando como consecuencia mayores estabilidades. El porcentaje de las combinaciones de los agregados para las combinaciones primera, segunda y tercera es el mismo; La primera combinación presenta una estabilidad Marshall baja, esto es provocado por el porcentaje de la granulometría a partir del tamiz N°4 hasta el tamiz N°200; es mayor en comparación de las otras combinaciones esto nos da un mayor porcentaje en arena fina y gruesa, por lo tanto es una mezcla más trabajable.

La tercera combinación presenta una granulometría más gruesa, en comparación de las anteriores y, por lo tanto, se tiene mayor estabilidad. En algunos casos cuando se obtiene una mayor estabilidad y un bajo contenido de cemento asfáltico, las mezclas asfálticas tienden a ser rígidas.

Según la bibliografía estudiada, se recomienda una estabilidad mínima de 1500 libras para tráfico pesado pero no indican una estabilidad máxima.

En la gradación gruesa, la estabilidad es menor en comparación a la gradación fina y, por lo tanto, las mezclas asfálticas gruesas tienen la tendencia a segregarse durante su manejo y en la mayoría de los casos son difíciles de compactar; especialmente en la combinación cuarta presenta un contenido alto de vacíos, lo que permite la circulación de aire y agua a través del pavimento, que puede conducir a prematuros endurecimientos del asfalto.

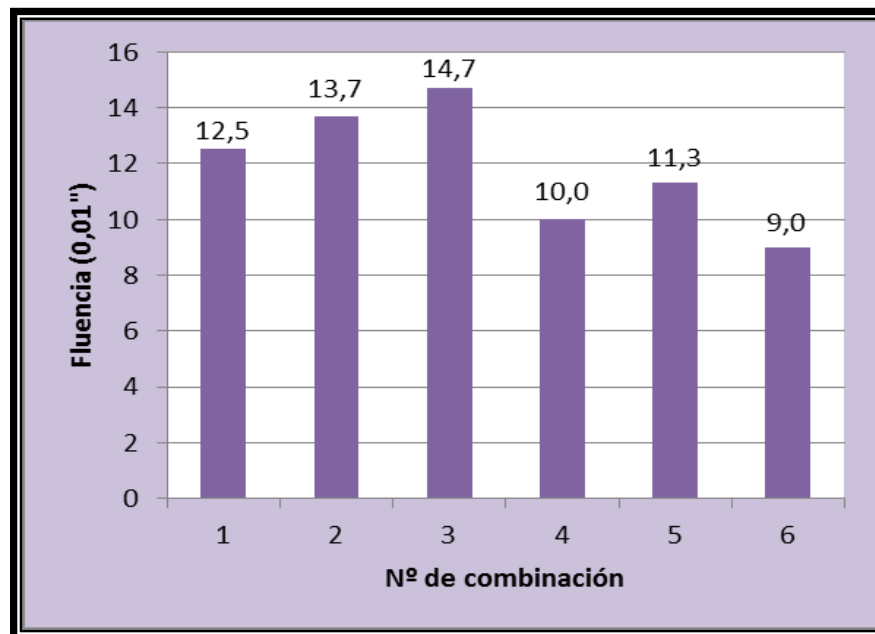
e) Variación del flujo en la mezcla asfáltica según la procedencia y combinación de los agregados

Tabla 3.23: Variación del flujo en la mezcla asfáltica según la procedencia y combinación de los agregados

Combinación	Flujo (0.01")	Gradación
1 ^a	12,5	Fina
2 ^a	13,7	
3 ^a	14,7	
4 ^a	10,0	Gruesa
5 ^a	11,3	
6 ^a	9,0	

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.5 Variación del flujo en la mezcla asfáltica según la procedencia y combinación de los agregados



Fuente: Elaboración propia

La fluencia aumenta a medida que sube el porcentaje de arena gruesa y fina (arena tamiz N°4-N°200), otro factor para la variación de la fluencia es el porcentaje de cemento asfáltico, como en el caso de la gradación fina que tiene los mayores valores de fluencia.

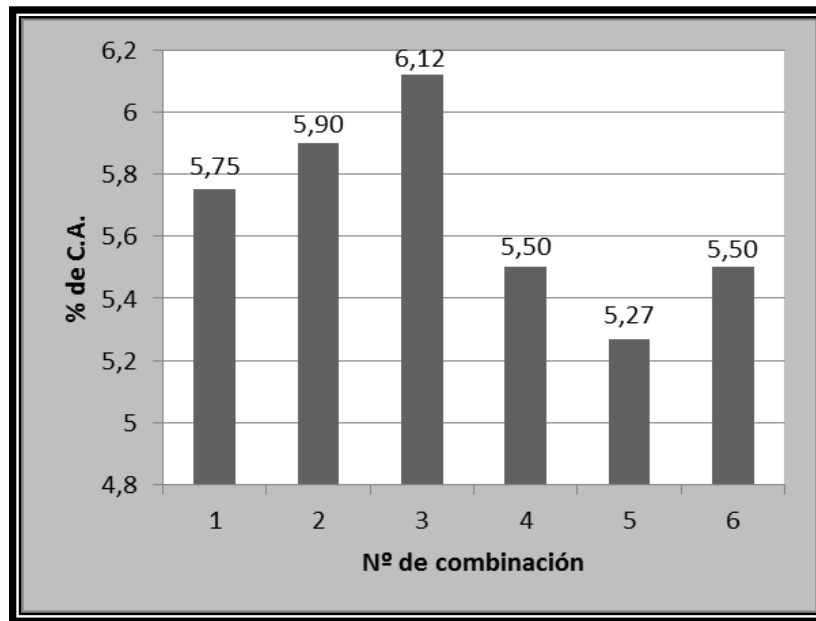
f) Variación del porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla asfáltica según la procedencia y combinación de los agregados

Tabla 3.24: **Variación del porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla asfáltica según la procedencia y combinación de los agregados**

Combinación	% C.A	Gradación
1 ^a	5,75	Fina
2 ^a	5,90	
3 ^a	6,12	
4 ^a	5,50	Gruesa
5 ^a	5,27	
6 ^a	5,50	

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.6 **Variación del porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla asfáltica según la procedencia y combinación de los agregados**



Fuente: Elaboración propia

La granulometría del agregado está directamente relacionada con el contenido óptimo de asfalto. Entre más finos sean los agregados que contenga la gradación de la mezcla, mayor será el área superficial a cubrir y, por consecuencia, mayor resultará la cantidad de asfalto requerida para envolver, uniformemente todas las partículas.

Como se muestra en la gráfica del porcentaje de C.A vs N° de combinación, el mayor porcentaje de cemento asfáltico se encuentra en la gradación fina.

Por otro lado, las mezclas con gradación gruesa requieren menor porcentaje de cemento asfáltico debido a que poseen menor área superficial total a ser cubierta.

Siempre se debe trabajar con el contenido óptimo de cemento asfáltico, si bajamos la cantidad de asfalto crece el contenido de vacíos y reduce el espesor de la película y, por lo tanto, la mezcla asfáltica puede volverse quebradiza. Además, con el paso del tiempo se acelera la oxidación e incrementa la permeabilidad, con lo que se disminuye la durabilidad del pavimento.

En la gráfica, las combinaciones 1^a, 2^a y 3^a con el mismo porcentaje de dosificación de los agregados, se observa la presencia de variaciones en el porcentaje de cemento asfáltico, esto se debe a:

- La granulometría (agregados finos absorben mayor cemento asfáltico).
- Capacidad de absorción (habilidad para absorber cemento asfáltico).

Por otro lado, dichas combinaciones (gradación fina) tienen la desventaja de requerir un mayor presupuesto económico (requiere mayor cantidad de asfalto) para su elaboración, pero la ventaja es que los agregados tienen mayor resistencia a la separación, porque al tener mayor cantidad de asfalto, presenta películas más gruesas, por lo tanto, el asfalto conserva sus propiedades por mayor tiempo. Siempre se debe tener cuidado con la cantidad de cemento asfáltico porque cuando se sobrepasa el nivel del porcentaje óptimo de cemento asfáltico, se produce una película demasiado gruesa sobre las partículas de agregado, lo cual resulta en pérdida de fricción entre partículas.

3.5 RELEVANCIA SOCIAL Y PRÁCTICA

En los últimos años la tecnología vial, al igual que otros campos de la Ingeniería, ha experimentado un avance extraordinario. En el presente trabajo, se ha hecho hincapié en la calidad de los agregados, utilizando los bancos principales y conocidos de Tarija, de donde en los pasados años como en la actualidad se extrae material para diversas obras como el mantenimiento y construcción de pavimentos.

La finalidad del presente trabajo es proporcionar a los profesionales de Ingeniería vial, técnicos constructores, estudiantes de Ingeniería y a la comunidad en general, una propuesta de guía y recomendaciones para diseñar y elaborar mezclas asfálticas en caliente.

Los diferentes ensayos realizados, permite a la persona interesada conocer con anticipación, la calidad de los materiales (agregados y cemento asfáltico como las características de las mezclas asfálticas, ventajas y desventajas en el momento de la construcción y durante la vida útil del pavimento).

Por otra parte, las diversas propuestas y recomendaciones permiten controlar y verificar el diseño de una determinada mezcla asfáltica. Lo que no ocurre, en construcciones de pequeño volumen, puesto que muy común control deficiente; sin embargo, en proyectos grandes el control y la organización son más estrictos y completos.

Las recomendaciones aquí expuestas están condicionadas, desde luego, a lo que indiquen las especificaciones particulares de la obra que se trate. Se recomienda a diseñadores y constructores no aferrarse ciegamente a las normas y ser capaz de probar nuevos materiales y procedimientos. Los reglamentos deben ser la fuerza matriz y no el freno, en la construcción de obras.

Ninguna especificación, reglamento o manual tiene un carácter inflexible, por lo que las normas pueden modificarse a juicio del Ingeniero. En efecto las especificaciones no son perfectas, de hecho, con frecuencia se modifican y se hacen cada vez más complejas.

La restricción (limitación) en la claridad y en algunos casos la innecesaria complicación en las especificaciones dirigidas a diseñadores y constructores pueden ser peligrosos, ya que pueden confundir. (*Propiedades Mecánicas de Mezclas en caliente con áridos de RCD de la Ing. Ana María Rodríguez Pasandín*).

3.6 COSTOS COMPARATIVOS DE CARPETA DE CONCRETO ASFÁLTICO CON RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (R.C.D) Y ÁRIDOS DE CANTERA

Se pretende brindar una comparación de costos para saber cuánto puede llegar a costar una carpeta de Concreto Asfáltico con áridos de cantera y áridos de residuos de construcción y demolición para fines constructivos.

Tabla 3.25 Carpeta de Concreto Asfáltico con áridos de cantera para un m³

Nº	INSUMOS/PARÁMETRO	UNIDAD	CANTIDAD	UNIT (Bs)	PARCIAL (Bs)
	A.MATERIAL				1610,9500
1	ARENA	m ³	0,4900	130,000	63,7000
2	ASFALTO CA 85-100	Kg	145,0000	9,650	1399,2500
3	DIESEL	l	20,0000	3,800	76,0000
4	GRAVA CLASIFICADA TRITURADA	m ³	0,4500	160,000	72,0000
	B.OBRERO				44,4500
1	AYUDANTE	hr	0,0500	12,000	0,6000
2	OP. COMPACTADORA NEUMATICOS 145 HP	hr	0,0700	260,000	18,2000
3	OPERADOR COMPACTAD. RODILLO LIZO VIBR.	hr	0,0900	15,000	1,3500
4	OPERADOR	hr	0,6200	15,000	9,3000
5	OPERADOR DE EQUIPO	hr	1,0000	15,000	15,0000

Fuente: Planilla actualizada de la Alcaldía Municipal

Cálculos y Operaciones.-

N°	PARÁMETRO	PARCIAL	%	FÓRMULA
D	TOTAL MATERIALES	1610,9500		A
E	SUBTOTAL MANO DE OBRA	44,4500		B
F	Cargas Sociales	24,4475	55	E
G	TOTAL MANO DE OBRA	79,1908		E+F+O
H	Herramientas menores	3,9595	5	G
I	TOTAL HERRAMIENTAS Y EQUIP.	149,1955		C+H
J	SUBTOTAL	1839,3363		D+G+I

Fuente: Elaboración Propia

N°	PARÁMETRO	PARCIAL	%	FÓRMULA
K	Imprevistos	0,0000	0	J
L	Gastos grales y administ.	183,9336	10	J
M	Utilidad	202,3270	10	J+L
N	PARCIAL	2225,5970		J+L+M
O	Impuesto al valor agreg.	10,2933	14,94	E+F
P	Impuesto a las Transacciones	68,7709	3,09	N
Q	TOTAL PRECIO UNITARIO	2294,3679		N+P

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.26 Carpeta de Concreto Asfáltico con áridos de Residuos de construcción y demolición

N°	INSUMOS/PARÁMETRO	UNIDAD	CANTIDAD	UNIT (Bs)	PARCIAL (Bs)
	A.MATERIAL				1880,0500
1	RESIDUOS DE ARENA DE CONSTRUCCION	m3	0,3900	120,000	46,8000
2	ASFALTO CA 85-100	Kg	145,0000	9,650	1399,2500
3	DIESEL	l	30,0000	3,800	114,0000
4	GRAVA DE RESIDUOS DE CONSTRUCCION Y DEMOLICION	m3	0,4000	200,000	80,0000
5	GRAVA CLASIFICADA TRITURADA	m3	0,6000	400,000	240,0000
	B.OBRERO				46,4000
1	PEON	hr	0,0500	15,000	0,7500
2	ALBAÑIL	hr	0,0900	20,000	1,8000
3	OP. COMPACTADORA NEUMATICOS 145 HP	hr	0,0700	260,000	18,2000
4	OPERADOR COMPACTAD. RODILLO LIZO VIBR.	hr	0,0900	15,000	1,3500
5	OPERADOR	hr	0,6200	15,000	9,3000
6	OPERADOR DE EQUIPO	hr	1,0000	15,000	15,0000
	C.EQUIPO				147,2360
1	COMPACTADORA NEUMATICOS 145 HP	hr	0,0700	260,000	18,2000
2	COMPACTADORA RODILLO LIZO VIBR.	hr	0,0900	250,400	22,5360
3	VOLQUETA	hr	0,0100	200,000	2,0000

Fuente: Elaboración Propia

Cálculos y Operaciones.-

N°	PARÁMETRO	PARCIAL	%	FÓRMULA
D	TOTAL MATERIALES	1880,0500		A
E	SUBTOTAL MANO DE OBRA	46,4000		B
F	Cargas Sociales	25,52	55	E
G	TOTAL MANO DE OBRA	82,6648		E+F+O
H	Herramientas menores	4,1332	5	G
I	TOTAL HERRAMIENTAS Y EQUIP.	26,6692		C+H
J	SUBTOTAL	1989,3841		D+G+I

Fuente: Elaboración Propia

N°	PARÁMETRO	PARCIAL	%	FÓRMULA
K	Imprevistos	0,0000	0	J
L	Gastos grales y administ.	198,9384	10	J
M	Utilidad	218,8322	10	J+L
N	PARCIAL	2407,1547		J+L+M
O	Impuesto al valor agreg.	10,7448	14,94	E+F
P	Impuesto a las Transacciones	74,3811	3,09	N
Q	TOTAL PRECIO UNITARIO	2481,5358		N+P

Fuente: Elaboración Propia

El resultado que se pretende obtener es que el agregado de residuos de construcción pueda cumplir con las especificaciones y normas para ser utilizado como agregado en mezclas asfálticas; además, se puede considerar la posibilidad de implementar su uso en vías de bajo y medio volumen de tráfico.

La diferencia que existe en costo entre una carpeta de Concreto Asfáltico con áridos de cantera y áridos de Residuos de construcción y demolición para un m³ es la siguiente: Los áridos de Residuos de construcción y demolición para un m³ cuesta más que una carpeta de concreto asfáltico con árido de cantera por el simple hecho que es material

reciclado y sólo se puede triturar manualmente pero siempre y cuando sea en proporciones pequeñas y no así en proporciones grandes como ser largas distancias donde entre agregados en cantidades por mayor.

Otro aspecto importante a tomar en cuenta en los residuos de construcción y demolición para proporciones grandes donde entre mucho agregado sería una nueva planta de trituración de áridos para poder seleccionar el agregado lo que costaría un gran gasto.

3.7 RESULTADOS DEL DISEÑO DE UNA MEZCLA DENSA EN CALIENTE CON ÁRIDOS DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN

A continuación se podrá observar una comparación de valores característicos de las mezclas asfálticas con sus debidas combinaciones tanto para agregado fino como para agregado grueso:

Tabla 3.27 Mezclas Asfálticas con agregado fino

Descripción	Unidad	Combinación N°			Especificaciones	
		Primera	Segunda	Tercera	Mínimo	Máximo
Peso Específico de cemento asfáltico	Grs/cm ³	0,997	0,997	0,997	0,995	1,050
Densidad máxima teórica	Grs/cm ³	2,391	2,397	2,402	-	-
Densidad real de la mezcla	Grs/cm ³	2,293	2,297	2,319	-	-
Vacíos de la mezcla (V _m)	%	3,8	3,8	3,2	3,0	5,0
Vacíos del agregado mineral (V.A.M.)	%	17,1	17,2	17,7	>15	-
Relación bitumen Vacíos (R.B.V)	%	78,0	78,0	81,0	75,0	82,0
Estabilidad Marshall	Libras	2455	2540	2680	>1500	-
Fluencia de la Mezcla	1/100"	12,5	13,7	14,7	8,0	18,0
Contenido de Cemento asfáltico	%	5,75	5,90	6,12	3,00	9,00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.28 Mezclas Asfálticas con agregado grueso

Descripción	Unidad	Combinación N°			Especificaciones	
		Cuarta	Quinta	Sexta	Mínimo	Máximo
Peso Específico de cemento asfáltico	Grs/cm ³	0,997	0,997	0,997	0,995	1,050
Densidad máxima teórica	Grs/cm ³	2,375	2,375	2,418	-	-

Densidad real de la mezcla	Grs/cm ³	2,278	2,303	2,314	-	-
Vacíos de la mezcla (V _m)	%	4,0	3,4	4,4	3,0	5,0
Vacíos del agregado mineral (V.A.M.)	%	17,0	16,2	17,5	>15	-
Relación bitumen Vacíos (R.B.V)	%	75,5	78,0	75,0	75,0	82,0
Estabilidad Marshall	Libras	2270	2340	2380	>1500	-
Fluencia de la Mezcla	1/100"	10,0	11,3	9,0	8,0	18,0
Contenido de Cemento asfáltico	%	5,50	5,27	5,5	3,00	9,00

La extracción de muestras se la realizó de bancos conocidos, de donde anteriormente se extrajo material para proyectos de construcción y mantenimiento de los pavimentos, Rio Guadalquivir, Rio Santa Ana y por último lo novedoso de nuestro estudio la extracción de agregados de residuos de construcción y demolición.

Tabla 3.29 Agregado Natural

ENSAYO	UNIDAD	CANTERA		
		STA. ANA	GUADALQ	RESIDUOS DE CONSTRUCCION
Peso Esp. Agregado grueso	gr/cm ³	2547	2546	2582
Absorción agregado grueso	%	1.02	1.42	1.23
Peso Esp. Agregado fino	gr/cm ³	2619	2627	2638
Absorción agregado fino	%	2.10	1.18	1.80
Desgaste de los Ángeles gradación B	%	32.0	30.7	22.6
Ensayo de durabilidad	%	4.46	4.23	2.17
Laminaridad	%	6.0	3.2	11.1
Alargamiento	%	6.6	10.9	9.6
Equivalente de Arena	%	59.0	55.0	62.0
Ensayo de adherencia	%	99.0	100.0	100.0

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.30 Agregado Triturado

ENSAYO	UNIDAD	COMBINACION		
		CUARTA	QUINTA	SEXTA
Desgaste de los Ángeles c/gradac. "B"	%	32.3	25.7	26.2
Desgaste de los Ángeles c/gradac. "C"	%	28.7	24.9	22.4
Ensayo de durabilidad	%	4.23	3.09	2.33

Caras fracturadas	%	94.2	91.7	84.0
Laminaridad	%	11.1	18.0	7.0
Límites de atterberg	%	NP.	NP.	NP.
Equivalente de arena	%	55.0	58.0	66.0
Ensayo de adherencia	%	98.0	98.0	98.0

Fuente: Elaboración propia

En este trabajo de investigación se realizó con dos tipos de gradaciones:

La gradación fina.

La gradación gruesa.

A continuación daremos una breve información general de las diferentes canteras o yacimientos de donde se extrajo los agregados.

Tabla 3.31 Análisis Granulométrico para gradación fina

Tamiz		Combinación N°			Especificaciones	
Pulg.	mm.	Primera	Segunda	Tercera	Mínimo	Máximo
3/4"	19,1	100,0	100,0	100,0	100	100
1/2"	12,7	94,1	97,8	94,9	85	100
3/8"	9,5	89,1	92,20	89,0	75	100
N°4	4,8	76,9	77,1	61,9	50	85
N°10	2,0	59,2	54,10	40,9	30	75
N°40	0,42	37,1	25,40	19,7	15	40
N°80	0,20	19,8	10,6	14,1	8	30
N°200	0,07	7,8	4,7	4,4	5	10

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.32 Análisis Granulométrico para gradación gruesa

Tamiz		Combinación N°			Especificaciones	
Pulg.	mm.	Cuarta	Quinta	Sexta	Mínimo	Máximo
1"	25	100,0	100,0	100,0	100	100
3/4"	19,1	93,2	94,2	90,1	86	100
1/2"	12,7	76,4	76,3	77,6	66	86
3/8"	9,5	67,9	69,30	67,9	57	77
N°4	4,8	52,1	51,20	50,2	40	60
N°8	2,36	36,6	38,10	36,7	26	46
N°16	1,18	28,4	27,80	24,7	17	37
N°30	0,60	20,5	19,5	19,3	11	27
N°50	0,30	15,1	11,7	12,5	7	19

N°100	0,15	11,7	10,1	8,0	6	16
N°200	0,025	5,7	4,1	4,0	3	6

Fuente: Elaboración propia

Los agregados de residuos de construcción y demolición presentan el mayor porcentaje en agregado grueso natural los cuales tienen un bajo porcentaje al desgaste, pero se hace difícil encontrar el agregado fino y, por lo tanto, es necesario realizar combinaciones con otras canteras. Los agregados extraídos de dicha cantera tienen un alto valor en su peso específico, por lo que, para la combinación de agregados, los porcentajes de componentes del agregado total deberán requerir un ajuste por la diferencia de pesos específicos de cada uno de ellos.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

- Se pudo cumplir con el objetivo trazado, el cual se refería a realizar una Evaluación comparativa de las propiedades mecánicas de una mezcla densa en caliente de briquetas Marshall utilizando como agregados residuos de construcción y agregados de cantera, para observar la capacidad y resistencia de los materiales.
- Se logró confirmar a cabalidad la hipótesis planteada de realizar mezclas asfálticas densas teniendo como base de agregados una combinación de agregados de residuos de construcción y demolición con agregados naturales para evaluar las propiedades de Estabilidad y Fluencia con briquetas de la Metodología Marshall.

Agregados

- Con la finalidad de acreditar los resultados obtenidos referente a los materiales, se realizaron ensayos repetitivos de los mismos para determinar las características más importantes de los agregados. La extracción de muestras se realizó de bancos conocidos, de donde anteriormente se sacó material para proyectos de construcción y mantenimiento de los pavimentos. Estos son Río Guadalquivir, Río Santa Ana y, por último, lo novedoso de nuestro estudio, la extracción de agregados de residuos de construcción y demolición.

Granulometrías

- De acuerdo a las granulometrías efectuadas, se hace evidente la necesidad de combinar agregados de dos o más bancos (canteras) de diferentes ríos, para cumplir con las especificaciones requeridas.
- El aporte del material pétreo a la estabilidad, se ve afectado por su fricción interna y ésta a su vez es determinada por el tamaño del agregado y la rugosidad de sus caras; según los ensayos realizados, estos indican que cuando los agregados provienen en un 100 % del proceso de trituración (máxima angularidad), la estabilidad Marshall será muy satisfactoria, pero en la mayoría de los casos la curva granulométrica no es la deseada y, por lo tanto, se hace necesario la combinación con otros agregados de menor angularidad, lo cual provoca que la estabilidad baje.
- Los resultados obtenidos mostraron que el agregado reciclado RCD puede cumplir con las especificaciones y normas para ser utilizado como agregado en mezclas asfálticas y podría ser considerada la posibilidad de implementar su uso inicialmente en vías de bajo y medio volumen de tráfico.
- El agregado reciclado de RCD se comportó de manera satisfactoria, los resultados de los ensayos demuestran el buen desempeño de las mezclas con agregados reciclados, y que este material puede ser una solución sustentable para el destino de los RCD.
- El costo en la construcción de una carpeta asfáltica con residuos de construcción y demolición es de 2481,5358 Bs por m³ por el simple hecho que para realizar una carretera se necesitaría mucha mano de obra o en lo posible una planta trituradora de áridos y seleccionadora por lo que convendría realizar una carpeta asfáltica con agregados de cantera en lo posible.
- Finalmente, es importante resaltar que el buen desempeño de una mezcla asfáltica elaborada con RCD como agregado, está ligado directamente al origen de los residuos utilizados, el cual, en el caso de esta investigación, tenía una cantidad importante de concreto y mortero. De esta manera el uso de agregados reciclados de los procesos de construcción y demolición se pueden convertir en una solución para regiones con carencia de agregados naturales.

4.2 RECOMENDACIONES

- La recomendación final que se propone en las obras de pavimentación, es la implementación de un sistema de control de calidad y uniformidad, mediante la utilización de equipos de mayores rendimientos y confiabilidad, acordes con las modernas tecnologías, determinando los parámetros más relevantes, vinculados con las condiciones funcionales de los pavimentos terminados.
- Es imprescindible apuntar que la producción del concreto asfáltico es un proceso industrial, por lo tanto, es susceptible a la aplicación de todas aquellas técnicas de control de calidad que se adecuen y permitan la optimización de la producción y el mejoramiento de la calidad.
- La granulometría del árido producto de la combinación de diferentes fracciones en una mezcla determinada, ha de asegurar a partir de su tamaño máximo que se logre una estructura con un adecuado esqueleto mineral, en el cual la fricción interna, el porcentaje de agregado y la compacidad son elementos graves en el éxito de las mismas.
- También se recomienda que en ningún caso resulta beneficioso obtener diseños y elaborar mezclas asfálticas de calidad y construir carreteras de primer orden, con diseños cuyos criterios del Ingeniero conceptual (especialista) no han sido cumplidos a cabalidad, pudiendo esto deberse a restricciones económicas o criterios de diseño del tipo simplista.

