

## **INTRODUCCIÓN**

### **1.1 ANTECEDENTES.-**

En los últimos 30 años, los avances tecnológicos han puesto a disposición de la Ingeniería de Construcción de Pavimentos Flexibles una gama de cementos asfálticos, que resultan de cambios en los procesos de destilación del crudo y de procesos de modificación de cementos asfálticos convencionales con diferentes productos modificadores.

Un asfalto modificado es un asfalto común, al cual se le adicionan productos tales como látex, polietileno, cal, cemento, azufre, asfáltenos naturales, hule molido de neumáticos, aceites, resinas, fibras de acero, vidrio o asbesto entre otros, con el fin de modificar y mejorar algunas de sus características mecánicas y físicas.

Una mezcla asfáltica modificada es la combinación de material pétreo, ligante asfáltico y un aditivo que busca mejorar algunas de sus propiedades mecánicas, con el fin de elevar la vida útil del pavimento y su resistencia.

La historia de la modificación de asfalto no es tan reciente como se podría pensar, en 1843 fueron concedidas patentes para modificar asfalto con polímeros naturales y sintéticos. Con el pasar de los años el uso de polímeros aumentó, especialmente después de la introducción y desarrollo del Programa Estratégico de Investigación de Autopistas (Strategic Highway Research Program SHRP), a partir del cual se desarrollan especificaciones de ligantes asfálticos Superpave Performance Graded (PG) a principios de los años noventa. La gran mayoría de los polímeros empleados son elastómeros como el SBR y el SBS. El uso de polímeros ya es importante y está aumentando a escala mundial. En la actualidad se vienen empleando asfaltos modificados con hule molido de neumáticos en EE.UU., Portugal, Colombia, México, Argentina.

### **1.2 JUSTIFICACIÓN.-**

Ante la necesidad de mejorar las condiciones actuales de la red vial en Bolivia se inicia la búsqueda de nuevas metodologías que incluyan nuevos materiales, brindando la

posibilidad de tener mejores pavimentos económica y funcionalmente viables. La aplicación de la mezcla asfáltica tipo gap graded, preparada con asfalto Modificado con grano de caucho reciclado de llanta, representa un gran avance en la tecnología de los pavimentos para nuestro país.

Con los precios actuales, los betunes con caucho permiten aumentar la viscosidad de una manera más económica que los polímeros nuevos, de manera que se hace posible la aplicación de betunes muy viscosos, con los que no se contaba hasta ahora por cuestión de precio.

Los costos de mantenimiento en el tiempo de los pavimentos producidos con asfalto-caucho son menores a los de las mezclas convencionales.

Se cumple el principio ambiental de jerarquía, reutilizando y reciclando los residuos, y se reduce el volumen de neumáticos fuera de uso. Como se emplea grano de caucho de llantas en desuso, mitiga en parte el mal uso de estas llantas que son quemadas clandestinamente, afectando el medio ambiente.

Utilizar el asfalto modificado con caucho dará mayor vida útil al pavimento. Los químicos contenidos en el grano de caucho retardan el envejecimiento y la oxidación del asfalto, previniendo que llegue a ser quebradizo y agrietado. Debido a la flexibilidad del caucho en el asfalto, el asfalto con caucho resiste y reduce el agrietamiento.

### **1.3 DISEÑO TEÓRICO.-**

#### **1.3.1 Planteamiento del Problema.-**

##### **1.3.1.1 Situación problémica.-**

Debido a la constante subida de precios del petróleo y de los materiales que componen una mezcla asfáltica se ha optado por buscar nuevas formas de preparación de mezclas asfálticas, empleando materiales de fácil obtención y bajo costo, tratando siempre de contribuir y no afectar al medio ambiente. Éstas mezclas asfálticas deben cumplir con las pruebas correspondientes a las que son sometidas, dado que las carpetas asfálticas de los pavimentos flexibles están sometidas a las acciones de cargas suministradas por

los vehículos y por las condiciones de entorno, como el agua, viento, calor, luz solar, que van afectando su comportamiento y rendimiento a lo largo del tiempo.

Todas estas condiciones impuestas al asfalto dan como resultado una intensa investigación en este campo, desarrollando nuevos materiales asfálticos, así como nuevas formas en las cuales el asfalto modificado puede ser aplicado al substrato pétreo.

El asfalto modificado se ha convertido últimamente en la mejor opción para la fabricación de carpetas asfálticas de alto desempeño.

Una de las líneas importantes de investigación en materiales asfálticos consiste en diseñar un sistema que permita una fácil aplicación del asfalto, sobre todo del asfalto modificado con caucho, además de lograr una mejor adhesión entre el asfalto modificado y el material pétreo que sirve de substrato para el asfalto.

#### **1.3.1.2 Problema.-**

¿La utilización de mezclas asfálticas modificadas tipo gap graded en pavimentos rehabilitados de vías urbanas con materiales locales satisface las propiedades y características necesarias para este tipo de pavimento?

#### **1.3.2 Objetivos de la Investigación**

##### **1.3.2.1 Objetivo general:**

- Realizar el análisis del comportamiento de mezclas asfálticas con asfalto modificado, utilizando materiales dentro de la gradación Gap Graded con materiales locales y asfalto modificado 85-100, de manera que sea una mezcla asfáltica alternativa a utilizarse preferentemente en pavimentos urbanos.

##### **1.3.2.2 Objetivos específicos:**

- Seleccionar materiales locales que se obtendrán de la chancadora de San José de Charaja, para realizar la investigación de mezclas asfálticas con materiales de gradación Gap Graded, de manera que sean aptas para realizar estas mezclas alternativas.

- Caracterización de los agregados y cemento asfáltico 85-100 a través de ensayos de laboratorio para determinar si cumplen con sus especificaciones correspondientes.
- Preparación de los agregados con gradación tipo Gap Graded para realizar las mezclas asfálticas que serán evaluadas.
- Determinar el porcentaje óptimo de asfalto con pruebas de laboratorio para obtener una mezcla asfáltica más eficiente.
- Obtener un asfalto modificado con la adición de diferentes porcentajes de caucho del óptimo del asfalto para la preparación de la mezcla en estudio.
- Elaboración de la mezcla asfáltica tipo Gap Graded con un asfalto modificado con grano de caucho reciclado con diferentes porcentajes para evaluar su comportamiento.
- Evaluar los resultados de las propiedades mecánicas obtenidas de la comparación entre los resultados obtenidos en sus diferentes porcentajes de caucho del óptimo del asfalto para establecer las conclusiones correspondientes.
- Establecer conclusiones y recomendaciones en base a los resultados obtenidos en la investigación para que sirvan de información para futuros estudios referentes a este tema.

### **1.3.3 Hipótesis.-**

Si elaboramos mezclas asfálticas modificadas con características de los asfaltos modificados con caucho tipo gap graded utilizando materiales locales, entonces podremos evaluar las propiedades físico-mecánicas de éste y cómo contribuyen a la reducción de la susceptibilidad térmica del asfalto, haciéndolo más rígido a temperaturas elevadas y más flexible a bajas temperaturas.

### **1.3.4 Definición de Variables Dependiente e Independiente**

#### **1.3.4.1 Variable dependiente.-**

#### **Propiedades Físico-Mecánicas.-**

Las propiedades físico-mecánicas del asfalto se refieren a la durabilidad, adhesión y cohesión, susceptibilidad a la temperatura, endurecimiento y envejecimiento, pureza. El asfalto es susceptible a los cambios de temperatura, sufre envejecimiento por intemperismo, es afectado por la oxidación. Sus propiedades mecánicas son limitadas frente a diversos factores; es quebradizo a bajas temperaturas, fluye a altas temperaturas, además de tener una baja recuperación elástica, lo que limita su rango de utilidad. Por estas razones modificaremos el cemento asfáltico para mejorar sus propiedades mecánicas.

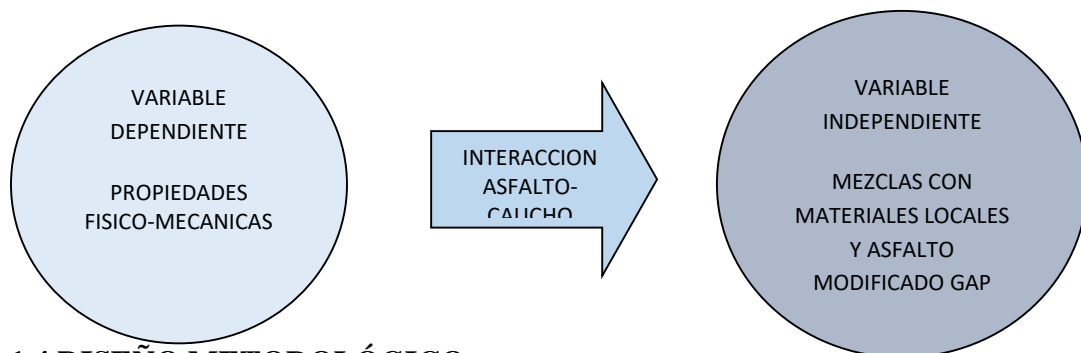
#### **Proceso para la modificación.-**

La vía húmeda garantiza una adecuada interacción entre las fracciones de caucho y las fracciones malténicas y resinosas del asfalto, dándose el proceso de humectación e hinchamiento. Se busca de esta forma lograr que el caucho pueda interactuar con el asfalto y lograr la modificación del mismo.

#### **1.3.4.2 Variable independiente.-**

##### **Asfalto Modificado tipo GAP GRADED.-**

La mezcla asfáltica tipo gap graded se preparó mezclando un asfalto Virgen de viscosidad especial y el grano de caucho reciclado de llanta Malla #30 en las condiciones preestablecidas por el Laboratorio para este tipo de proceso. La granulometría de este tipo de mezcla asfáltica gap graded presenta una gradación particular establecida.



#### **1.4 DISEÑO METODOLÓGICO**

#### **1.4.1 Unidad de Estudio.-**

La unidad de estudio es la mezcla asfáltica.

Una mezcla asfáltica es una mezcla de agregados de trituración, debidamente gradados con cemento asfáltico en caliente o en frío.

#### **1.4.2 Población**

La población se refiere a las Mezclas asfálticas modificadas.

Las mezclas asfálticas modificadas son aquellas mezclas en las que se ha incorporado al asfalto un polímero, con el fin de modificar sus propiedades físicas y mecánicas.

#### **1.4.3 Muestra**

Se refiere a la Mezcla asfáltica modificada con caucho tipo gap graded.

Es una mezcla asfáltica a la cual se le ha incorporado al asfalto granos de caucho y además tiene una graduación de materiales granulares tipo gap graded (graduación media).

#### **1.4.4 Muestreo**

El grano de caucho reciclado (GCR) se obtendrá por medios propios mediante el raspaje de llantas en desuso empleando un esmeril. En el caso del asfalto se emplea el asfalto (85-100) de tipo convencional y se lo obtiene del SEDECA (Servicio Departamental de Caminos), como también así los materiales granulares (grava, gravilla triturada y arena triturada).

#### **1.4.5 Métodos y Técnicas**

Los métodos y técnicas empleados fueron de carácter experimental y no probabilísticos.

Para desarrollar el diseño de la mezcla asfáltica Gap Graded con asfalto modificado con grano de caucho reciclado de llanta, se realiza una aproximación al contenido óptimo de asfalto utilizando pruebas tipo Marshall. Previamente se deben caracterizar los materiales que componen este tipo de mezcla asfáltica.

Para la caracterización del asfalto y del asfalto-caucho se realiza los siguientes ensayos de laboratorio:

- Método de ensayo de Penetración (ASTM D 5 AASHTO T49-97).
- Método para determinar el punto de ablandamiento con el aparato de anillo y bola (ASTM D 36 AASHTO T53-96).
- Ensayo de Viscosidad (ASTM D 88-81 (1987) AASHTO T 72-90).
- Ensayo de Gravedad específica de materiales bituminosos semisólidos (ASTM D 70-76 AASHTO T 228-93).
- Método para determinar los puntos de inflamación y combustión mediante la copa abierta de Cleveland (ASTM D1310-01 AASHTO T79-96).

Para la caracterización de los agregados pétreos, se deben realizar los siguientes ensayos:

- Análisis granulométrico por tamizado (ASTM D422 AASHTO T88).
- Gravedad específica y absorción del agregado grueso y fino (ASTM C127 y C128)
- Equivalente de Arena (ASTM D2419).
- Porcentaje de caras fracturadas en los áridos (D 5821 NTL 358).
- Método para determinar el desgaste mediante la máquina de Los Ángeles (ASTM C 131 AASHTO T96)

Con el método de diseño Marshall se obtendrán los resultados para:

- Estabilidad (libras)
- Densidad ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )
- Vacíos de Agregado Mineral (VAM) (%)
- Vacíos con Aire (%)
- Fluencia (1/100 plg)

Y con esto el óptimo de asfalto.

#### **1.4.6 Análisis Estadístico**

El análisis estadístico se lo realizará para obtener el promedio de la densidad real. Todos estos datos son medidas y tendencias y se las debe analizar estadísticamente con las siguientes fórmulas:

- **Media aritmética ( $\Sigma x$ ).** También se le conoce como promedio ya que es el promedio de las lecturas o mediciones individuales que se tienen en la muestra, se determina con la fórmula siguiente:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Donde:

( $\Sigma x$ ) = media aritmética

$X_i$  = dato  $i$

$n$  = número de datos en la muestra

- **Media geométrica (G).** Es la raíz en  $n$ ésima del producto de los valores de los elementos de la muestra, es usada cuando los valores de los datos de la muestra no son lineales, es decir que su valor depende de varios factores a la vez, se determina de la siguiente forma:

$$G = \sqrt[n]{x_1 * x_2 * \dots * x_n}$$

Donde:

G = media geométrica

$X_i$  = dato  $i$

$n$  = número de datos en la muestra

- **Moda ( $x_{mod}$ ).** La moda se define como aquel valor o valores que más se repiten o que tienen mayor frecuencia entre los datos que se han obtenido en una muestra, la muestra de una población nos genera la distribución de los datos, una vez que éstos se han graficado y en esta gráfica es posible observar la moda



o modas de la misma, es por esto que una distribución de datos puede ser amodal (carece de moda), unimodal (tiene una sola moda), bimodal (tiene dos modas) o polimodal (tiene más de dos modas).

- **Desviación absoluta media** ( $\bar{d}$ ). Esta medida de dispersión representa la diferencia absoluta promedio que existe entre cada dato que se encuentra en la muestra y la media de los datos y se determina de la siguiente manera:

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{n}$$

Donde:

$X_i$  = dato  $i$

$\bar{x}$  = media aritmética de la muestra

$n$  = número de datos en la muestra

- **Varianza o variancia** ( $s^2$ ). Es el promedio de las diferencias elevadas al cuadrado entre cada valor que se tiene en la muestra ( $x_i$ ) y la media aritmética ( $\bar{x}$ ) de los datos y se determina de la siguiente manera:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$$

Donde  $n$  es el número de datos en la muestra.

- **Desviación estándar** ( $s$ ). Es la desviación o diferencia promedio que existe entre cada dato de la muestra y la media aritmética de la muestra. Y se obtiene a partir de la varianza, sacándole raíz cuadrada.

$$s = \sqrt{s^2}$$

Donde:

$s^2$ = varianza o variancia

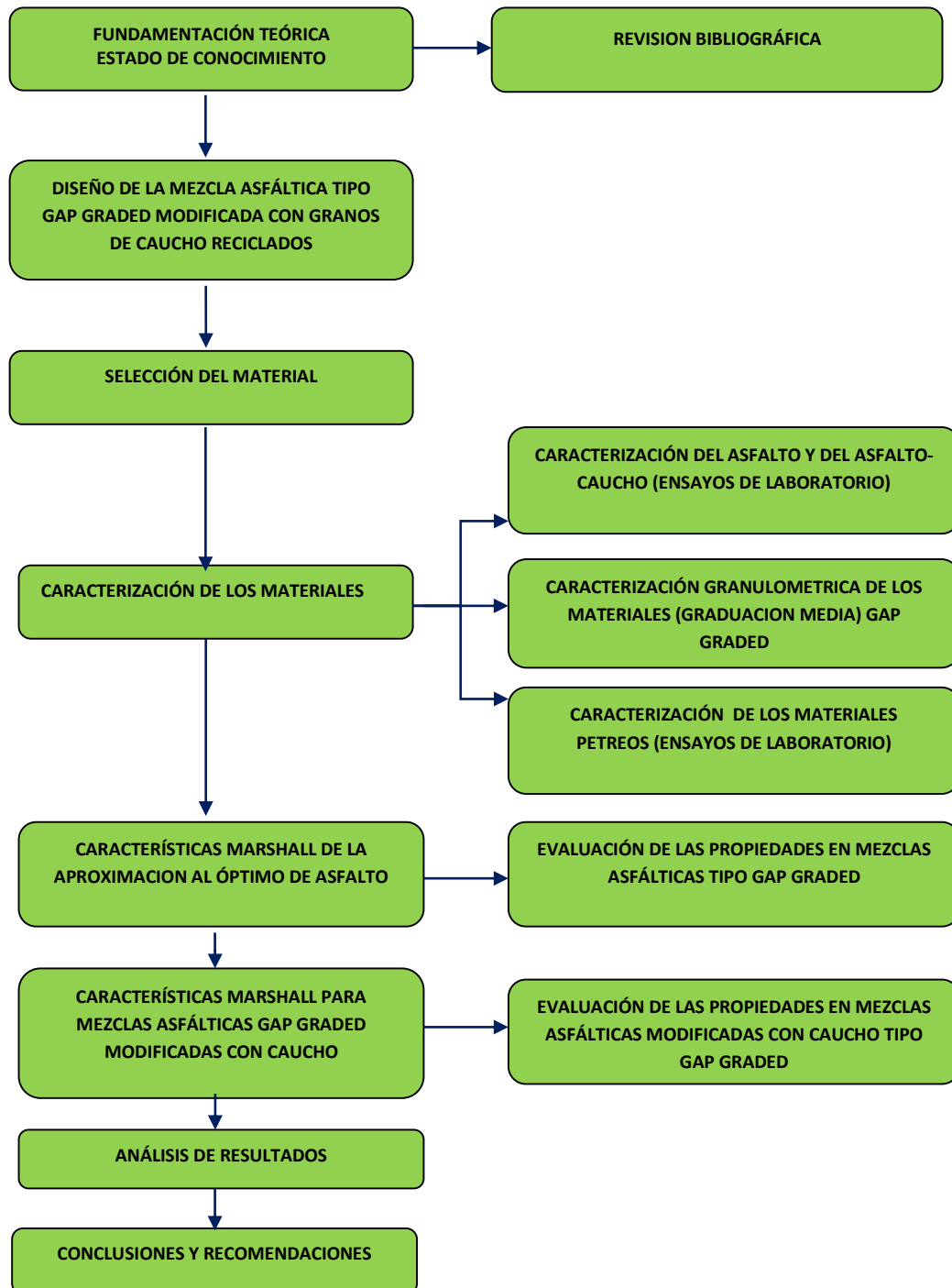
- **Media armónica (H).** La media armónica se define como el recíproco del promedio de los recíprocos de cada uno de los datos que se tienen en la muestra, y se determina de la siguiente manera:

$$H = \frac{1}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 1/x_i} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n 1/x_i}$$

- **Mediana ( $x_{med}$ ).** La mediana es aquel valor que se encuentra en la parte central de los datos que se tienen en la muestra una vez que éstos han sido ordenados según su valor o magnitud. Para calcular la mediana, se presentan dos casos:
  - a). Cuando el número de datos en la muestra es impar.- En este caso después de ordenar los datos de la muestra en cuanto a su magnitud, es decir de mayor a menor valor o de menor a mayor valor, se procede a localizar aquel dato que se encuentra justo en el centro de los datos o en la parte central de los mismos, el valor de este dato será el que dé valor a la mediana.
  - b). Cuando el número de datos en la muestra es par.- En este caso después de ordenar los datos en cuanto a su magnitud, observamos que en la parte central de los datos no se encuentra dato alguno, en este caso, la mediana tomará el valor del promedio de dos datos; el que se encuentra antes de la parte central y el que se encuentra después de la parte central.

#### 1.4.7 Esquema Metodológico





## ESTADO DE CONOCIMIENTO SOBRE MEZCLAS ASFÁLTICAS Y LA UTILIZACIÓN DE ASFALTO MODIFICADO TIPO GAP GRADED

### 2.1 EL ASFALTO

### 2.1.1 Definición

El asfalto se define como una mezcla de hidrocarburos, derivado del petróleo naturalmente o por destilación.



**Fig.1 Asfalto Natural Lago Peach Lake en la Isla de Trinidad**

Fuente Internet



**Fig.2 Asfalto Refinado**

Fuente: Elaboración Propia

El asfalto es una mezcla sólida y compacta de hidrocarburos y de minerales que mayormente es empleada para construir el pavimento de las calzadas. Es un material viscoso, pegajoso y de color negro. En las mezclas asfálticas es usado como aglomerante para la construcción de carreteras. Está presente en el petróleo crudo y compuesto casi por completo de betún (bitumen), es una sustancia que constituye la fracción más pesada del petróleo crudo. Se encuentra a veces en grandes depósitos naturales.

El asfalto es un material bituminoso de color negro o café oscuro, constituido principalmente por asfaltenos, resinas y aceites, elementos que proporcionan características de consistencia, aglutinación y ductilidad; es sólido o semisólido y tiene propiedades cementantes a temperaturas ambientales normales. Al calentarse se ablanda gradualmente hasta alcanzar una consistencia líquida. Éstos pueden tener dos orígenes; los derivados de petróleos y los naturales.

Los asfaltos naturales, fueron producidos a partir del petróleo, por un proceso natural de evaporación de las fracciones volátiles, dejando las asfálticas como residuo. Estos pueden encontrarse como escurrimientos superficiales en depresiones terrestres, dando origen a los lagos de asfalto, como los de las islas Trinidad y Bermudas. También aparecen impregnando los poros de algunas rocas, denominándose rocas asfálticas. Así también se encuentran mezclados con elementos minerales, como pueden ser arenas y arcillas en cantidades variables, debiendo someterse a posteriores procesos de purificación, para luego poder ser utilizadas en pavimentación.

### 2.1.2 Producción del Asfalto

El asfalto se obtiene de la refinación por destilación del crudo de petróleo. Es un proceso en el cual las diferentes fracciones (productos) son separadas fuera del crudo, por medio de un aumento en etapas de la temperatura.

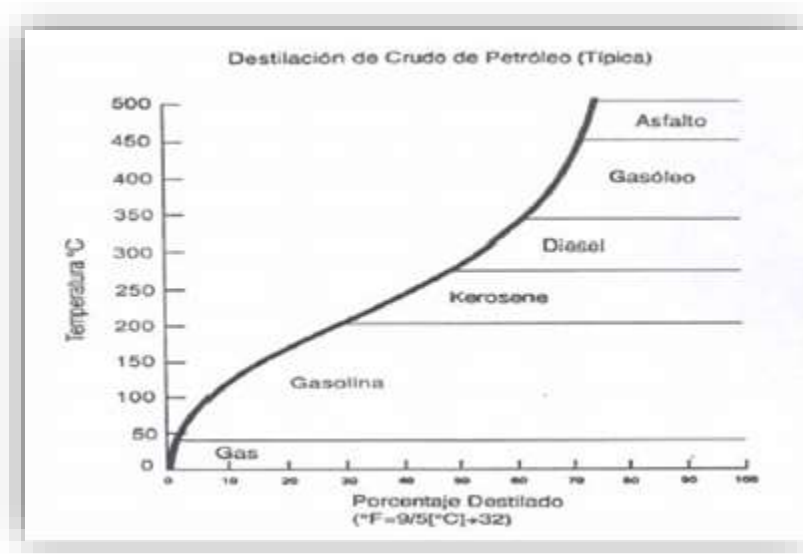


Fig.3 Productos y Temperaturas Típicas de Destilación (Instituto del Asfalto. Manual del Asfalto)

Fuente: Maxil Coyopotl, Roberto y Salinas Hernández, Marco A. (2006). Ventajas y Desventajas del uso de polímeros en el Asfalto Tesis de licenciatura, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de las Américas-Puebla. Pag. 7

Dependiendo del uso, es el tipo de asfalto.

En las refinerías se deben tener maneras de controlar las propiedades de los asfaltos que se producen para poder cumplir con ciertos requisitos. Ésto se logra la mayor parte de las veces, mezclando varios tipos de crudos de petróleo antes de procesarlos, para producir grados intermedios. Así un asfalto muy viscoso y uno menos viscoso, pueden ser combinados para obtener un asfalto con viscosidad intermedia.

El petróleo crudo extraído de los pozos, es sometido a un proceso de destilación en el cual se separan las fracciones livianas como la nafta y keroseno de la base asfáltica mediante la vaporización, fraccionamiento y condensación de las mismas. En consecuencia, el asfalto es obtenido como un producto residual del proceso anterior. El asfalto es además un material bituminoso pues contiene betún, el cual es un hidrocarburo soluble en bisulfuro de carbono. El alquitrán obtenido de la destilación destructiva de un carbón graso, también contiene betún, por lo tanto también es un material bituminoso pero no debe confundirse con el asfalto, ya que sus propiedades difieren considerablemente.

El asfalto de petróleo moderno, tiene las mismas características de durabilidad que el asfalto natural, pero tiene la importante ventaja adicional de ser refinado hasta una condición uniforme, libre de materias orgánicas y minerales extraños.

### **2.1.3 Composición del Asfalto.**

El asfalto es considerado un sistema coloidal complejo, de hidrocarburos, en el cual es difícil establecer una distinción clara entre fase continua y dispersa.

Existen varias clasificaciones para los grupos de constituyentes que componen el asfalto. Una de las más usadas es la que separa el asfalto en:

Asfáltenos:

Son compuestos de alto peso molecular, principalmente de naturaleza aromática con pocas ramificaciones, se encuentran en sus cadenas de cantidad apreciables

elementos como oxígeno, azufre y nitrógeno. Los asfáltenos le dan la característica de dureza al asfalto y se encuentran disueltos en los maltenos.

Maltenos:

a) Resinas: Son moléculas de menor peso molecular, que tienen un mayor número de ramificaciones en las cadenas. También se observa la presencia de azufre y nitrógeno en sus cadenas, pero en menor frecuencia.

b) Aceites: Moléculas de peso molecular mucho menor, sus cadenas son menos ramificadas y con pocos anillos.

#### **2.1.4 Tipos de Asfalto.**

La mayor parte de los asfaltos producidos son utilizados en trabajos de pavimentación, destinándose una producción menor para aplicaciones industriales, como impermeabilizante, aislantes, etc.

De acuerdo a su aplicación, los asfaltos podemos clasificarlos en dos grupos:

##### **Asfaltos para pavimento.**

**a.1) Cemento Asfáltico:** Los cementos asfálticos son preparados especialmente para el uso en la construcción de pavimentos asfálticos. Es un material para su aplicación en trabajos de pavimentación, pues aparte de sus propiedades aglomerantes e impermeabilizantes, posee características de flexibilidad, durabilidad y alta resistencia a la mayoría de los ácidos, sales y álcalis.

**a.2) Asfaltos cortados:** los asfaltos cortados, también conocidos como asfaltos diluidos o cut-baks, resultan de la combinación del cemento asfáltico con destilados del petróleo.

Los diluyentes utilizados funcionan como vehículos, resultando productos menos viscosos que pueden ser aplicados con temperaturas más bajas.

De acuerdo con el tiempo de curado determinado por la naturaleza del diluyente utilizado, los asfaltos cortados se clasifican en:

- RC – Asfaltos cortados de curado rápido.
- MC – asfaltos cortados de curado medio.
- SC – asfaltos cortados de curado lento.

Sigla normalmente seguida de un número que indica su grado de viscosidad.

**a.3) Emulsiones asfálticas:** son dispersiones de cemento asfáltico en fase acuosa, con estabilidad variable. El tiempo de quiebre y de viscosidad de las emulsiones dependen, entre otros factores, de la cantidad y calidad de los agentes emulsificantes.

La cantidad de emulsificantes y aditivos químicos utilizados varía generalmente de 0.2% a 5% y la cantidad de asfalto es del orden del 95%.

El color de las emulsiones asfálticas antes del quiebre es marrón y después del quiebre negro, constituyendo esta característica un elemento auxiliar para la inspección visual y constatación rápida de la buena condición del producto. Las partículas de asfalto dispersas en la emulsión son visibles al microscopio variando de su tamaño de 0.1 a 10 micrones.

Las emulsiones asfálticas se calcifican según el tipo de carga de la partícula y tiempo de quiebre.

En cuanto a la carga de partícula, pueden ser:

- Catiónicas.
- Aniónicas.

Y en cuanto al tipo de quiebre:

- Quiebre rápido.
- Quiebre medio.
- Quiebre lento.



**a.4) Asfaltos modificados:** En su mayoría estos asfaltos son fabricados para la contracción de carreteras, son los cementos asfálticos combinados con algún polímero cuya función es mejorar alguna o varias de las propiedades físicas de éste.

#### **Asfaltos Industriales.**

**b.1) asfaltos oxidados:** los asfaltos oxidados o soplados, son asfaltos calentados y sometidos a la acción de una corriente de aire con el objeto de modificar sus características normales, a fin de adaptarlos para aplicaciones especiales.

Los asfaltos oxidados son utilizados generalmente para fines industriales como impermeabilizantes, película protectora, etc. El proceso de oxidación produce en el asfalto las siguientes modificaciones físicas principales:

- Aumento de peso específico y consistencia.
- Disminución de ductilidad.
- Disminución de susceptibilidad térmica.

En cuanto a la composición química elemental del asfalto, los procesos de oxidación producen aumento en contenido de carbono y una correspondiente disminución de hidrogeno.

Es preciso aclarar que debido al enfoque de esta investigación sólo se centra la atención en los tipos de asfalto (a.1) *Cemento Asfáltico* y (a.4) *Asfalto modificado*, siendo éstos, los asfaltos seleccionados para el proyecto en el diseño.

#### **2.1.5 Comportamiento Físico-Mecánico del Asfalto**

El comportamiento del cemento asfáltico está basado en su naturaleza visco-elástica; entonces, la conducta del mismo está en función tanto de las condiciones de carga como de la temperatura. Asimismo, tal conducta también depende del envejecimiento del asfalto.

Como se muestra a continuación en la figura 3.5, las altas temperaturas en un corto periodo de tiempo, son directamente proporcionales a lo que ocurre a bajas temperaturas en un largo periodo de tiempo.

Los asfaltos tienen propiedades ligantes y aglutinantes, compuestos en gran parte por hidrocarburos de consistencia semisólida a temperatura ambiente, pero pueden ser más fluidos en la medida en que se les incrementa la temperatura.

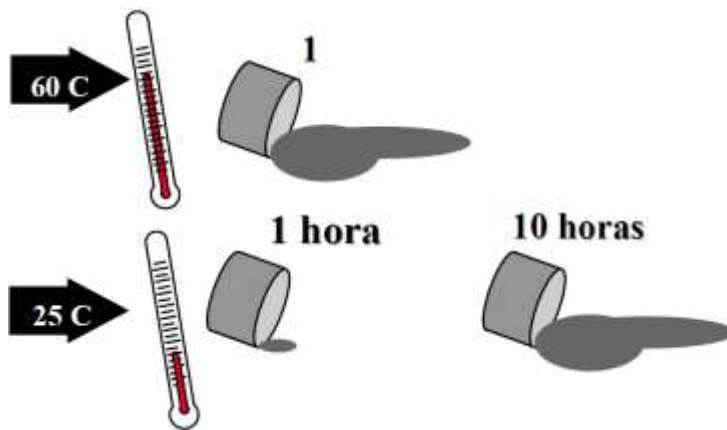


Fig.4 Conducta Visco-Elástica

Fuente: Elaboración Propia

### 2.1.6 Propiedades Físicas del Asfalto de Pavimentación

Las propiedades físicas de mayor importancia para el diseño, construcción y mantenimiento de pavimentos son:

- **Durabilidad:** es la medida de que tanto puede retener un asfalto sus características originales cuando es expuesto a procesos normales de degradación y envejecimiento.
- **Adhesión y cohesión:** la adhesión se refiere a la capacidad del asfalto para adherirse al agregado en la mezcla de pavimentación. Cohesión por otro lado,

es la capacidad del asfalto de mantener firmes las partículas del agregado en el pavimento terminado.

- **Susceptibilidad a la temperatura:** el asfalto es un material termoplástico, se vuelve más viscoso (duro) a medida que su temperatura disminuye y menos viscoso (blando) conforme su temperatura aumenta. Esta característica es conocida como susceptibilidad a la temperatura.
- **Endurecimiento y envejecimiento:** los asfaltos tienden a endurecerse en la mezcla asfáltica durante la construcción, y también en el pavimento terminado.
- **Pureza:** El cemento asfáltico está constituido en su mayor parte por bitumen, el cual es por definición un material totalmente soluble en bisulfuro de carbono. Aproximadamente el 99.5% de los asfaltos refinados son solubles en bisulfuro de carbono y si contienen impurezas éstas son inertes.

### **2.1.7 Función del Asfalto en los Pavimentos.**

Entre muchas otras, dos son las funciones más importantes ejercidas por el asfalto en un pavimento.

-Aglomerante.

-Impermeabilizante.

Como aglomerante proporciona una íntima ligazón entre los agregados, capaz de resistir la acción mecánica producidas por las cargas de los vehículos.

Como impermeabilizante, garantiza al pavimento una acción eficaz contra la penetración del agua proveniente, tanto de las precipitaciones como del subsuelo por acción capilar.

Ningún otro material garantiza mejor que el asfalto una ejecución económica y simultánea de estas funciones, al mismo tiempo que proporciona al pavimento características de flexibilidad que permite su acomodo sin fisuramiento, ante

eventuales consolidaciones de las capas subyacentes. Naturalmente, para que el asfalto desempeñe satisfactoriamente estas funciones que le son inherentes, es necesario que sea de buena calidad, y por sobre todo, que en la ejecución del pavimento se respeten todas las especificaciones establecidas en el diseño.

## **2.2 EL POLÍMERO**

### **2.2.1 Definición**

Los polímeros son sustancias de alto peso molecular formada por la unión de cientos de miles de moléculas pequeñas llamadas monómeros (compuestos químicos con moléculas simples). Se forman así moléculas gigantes que toman formas diversas: cadenas en forma de escalera, cadenas unidas o termo fijadas que no pueden ablandarse al ser calentadas, cadenas largas y sueltas.

Algunos modificadores poliméricos que han dado buenos resultados, se enlistan a continuación:

Homopolímeros: que tienen una sola unidad estructural (monómero).

Copolímeros: Tienen dos unidades estructurales distintas (EVA, SBS).

Uno de los materiales que se obtienen de los polímeros son los elastómeros, cuya propiedad tiene es que al estirarlos se sobrepasa la tensión de fluencia, no volviendo a su longitud original al cesar la sollicitación. Tiene deformaciones pseudo plásticas con poca elasticidad.

### **2.2.2 Elaboración de los Polímeros**

La utilización comercial de un nuevo producto como el caso de los polímeros depende del costo y sus propiedades. El costo, depende básicamente de su proceso de polimerización y la disponibilidad de los monómeros. Así, las principales fuentes de materia prima para la producción de monómeros son:

- Productos Naturales.

- Hulla o Carbón Mineral.
- Petróleo.

### 2.2.3 Producción de los Polímeros

Los polímeros al igual que muchos materiales se obtienen a partir de materia prima en plantas especializadas. El proceso para producir un polímero es llamado polimerización.

### 2.2.4 Clasificación de los Polímeros

Existen tres formas de clasificar los polímeros:

- Por su estructura química.
- Por su comportamiento mecánico.
- Por su desempeño mecánico.

Para nuestro estudio veremos la clasificación por su desempeño mecánico.

**-Clasificación por su Comportamiento Mecánico:** los polímeros pueden ser clasificados por su comportamiento mecánico en:

- **Plásticos:** son materiales poliméricos sólidos a temperatura ambiente. Existen dos tipos:
  - Termoplásticos
  - Termorígidos: a este grupo pertenecen los plastómeros.
    - **Elastómeros:** son deformables a temperatura ambiente, al aplicarle un esfuerzo son comprimibles, pero recobran su forma original al ser retirado este. La flexibilidad de los elastómeros se debe a cadenas flexibles, las cuales se amarran unas con otras.
    - **Fibras:** en este grupo se encuentran el Nylon, poliéster, etc.

### 2.2.5 Polímeros Utilizados en la Modificación de Asfaltos

Actualmente, los cementos asfálticos son modificados con elastómeros, caucho, SBR y SBS, o con plastómeros (EVA), los nombres completos para estos compuestos son los siguientes: Acetato de Etil-vinilo (EVA), Estireno-Butadieno- Latex (SBR) y Estireno-Butadieno-Estireno (SBS).

## **2.3 ASFALTOS MODIFICADOS**

### **2.3.1 Definición**

Los asfaltos modificados son producto de la incorporación en el asfalto de un polímero o de hule molido. Ésto se hace con el fin de modificar sus propiedades físicas y mecánicas para disminuir su susceptibilidad a la temperatura, humedad y oxidación e incrementar la adherencia con el material pétreo. Aumentar la resistencia de las mezclas asfálticas a la deformación y esfuerzos de tensión repetidos.

### **2.3.2 Modificación del Asfalto.**

La modificación del asfalto es una nueva técnica utilizada para el aprovechamiento efectivo de asfaltos en la pavimentación de vías carreteras. Esta técnica consiste en la adición de polímeros a los asfaltos convencionales con el fin de mejorar sus características mecánicas, es decir, su resistencia a las deformaciones por factores climatológicos y del tránsito (peso vehicular).

Los objetivos que se persiguen con la modificación de los asfaltos con polímeros, es contar con ligantes más viscosos a temperaturas elevadas para reducir las deformaciones permanentes, de las mezclas que componen las capas o superficie de rodamiento, aumentando la rigidez. Por otro lado disminuir el fisuramiento por efecto térmico a bajas temperaturas y por fatiga, aumentando su elasticidad. Finalmente contar con un ligante de mejores características adhesivas.

### **2.3.3 Asfaltos Modificados con Polímeros Tipo Elastómeros**

Se requiere mezclar tres componentes: asfalto, resina base y un endurecedor, lo que complica la modificación ya que debe existir compatibilidad entre estos.

Los asfaltos modificados tienen una elevada resistencia mecánica, gran resistencia a la tracción, buen poder humectante y adhesión a los agregados. Si el trabajo con este tipo de asfalto es realizado dentro de los parámetros correctos, su tiempo de vida está condicionado por la vida del agregado, no por el asfalto; en otras palabras el pavimento se deteriora por trituración o abrasión del agregado antes que por la falla del ligante (asfalto). Su resistencia al envejecimiento es excelente.

## **2.4 CLASIFICACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS**

Dada la gran cantidad de parámetros que definen un aglomerado asfáltico, existen diversos criterios para efectuar su clasificación. El siguiente esquema hace un breve resumen de todos ellos, que serán analizados seguidamente:

### **2.4.1 Por el Árido Empleado**

Se puede establecer una clasificación acumulativa en función de los tipos de árido que se van incorporando, obteniendo así cuatro clases de mezclas:

(a) Mástic asfáltico: Formado por una mezcla de polvo mineral o *filler* y un ligante hidrocarbonado, que suele ser betún de penetración.

(b) Mortero asfáltico: A la composición del mástic se le adiciona árido fino, es decir, arena de tamaño inferior a 8 mm., obteniendo esta nueva mezcla.

(c) Macadam asfáltico: Se obtiene mezclando árido grueso de granulometría uniforme (macadam) con un betún de penetración. También se denomina **tarmacadam** (tar = asfalto) y se empleaba antiguamente en estabilización de capas granulares.

(d) Hormigón asfáltico: Es el empleado usualmente en la construcción de capas asfálticas.

Se obtiene adicionando árido grueso al mortero, por lo que está formado por tres tipos de materiales: árido grueso (grava), árido fino (arena) y betún.

### **2.4.2 Por la Temperatura de Puesta en Obra**

Aunque en este apartado vamos a tratar sólo las mezclas en caliente, no está de más realizar esta aclaración de cara al estudio global de los aglomerados asfálticos. Existen, pues, dos tipos de mezclas según su temperatura de puesta en obra:

(a) Mezclas asfálticas en frío (MBF): En ellas, el ligante suele ser una emulsión bituminosa

En algunos países se emplean betunes fluidificados-, de forma que la viscosidad es suficientemente baja como para no requerir un calentamiento previo a su puesta en obra.

(b) Mezclas asfálticas en caliente (MBC): En este caso, el ligante utilizado para su confección es el betún de penetración, por lo que se necesita reducir su viscosidad calentándolo en obra a temperaturas que oscilan entre los 150 y los 200°C. De este modo se logra una mayor trabajabilidad y docilidad del material.

#### **2.4.3 Por el Porcentaje de Huecos en Mezcla**

La compacidad o la proporción de huecos que presente la mezcla influyen de forma determinante en sus características mecánicas, reológicas e impermeables, por lo que es conveniente conocer las diferentes tipologías existentes y los usos recomendados. Las Normas Internacionales tipifican las siguientes clases de mezclas:

(a) Mezclas densas (D): También denominadas cerradas. Su pequeño porcentaje de huecos (entre el 3 y el 5%) hace que su impermeabilidad sea muy alta, por lo que resguardan eficazmente del agua a las capas subyacentes. No suelen emplearse dada la alta cantidad de betún que requieren, dada la gran superficie específica que poseen por su alto contenido en filler.

(b) Mezclas semidensas (S): Son similares a las anteriores sólo que el porcentaje de huecos es algo menor (5 a 12%). Al tener un menor contenido en finos permiten una menor dosificación de ligante con el consiguiente ahorro económico. Son las más empleadas en capas de rodadura de carreteras y pavimentación urbana.



(c) Mezclas gruesas (G): La curva granulométrica de los áridos que forman este tipo de mezclas se aleja de la máxima compacidad, empleando menores cantidades de *filler*, lo que conlleva una menor cantidad de ligante. Su carencia de impermeabilidad hace que este tipo de mezclas sean idóneas para su empleo en capas intermedias o de base, dado que aunque tienen menor calidad que las anteriores son más económicas.

(d) Mezclas abiertas (A): Su elevado porcentaje de huecos y su práctica carencia de elementos finos hace que su índice de huecos sea muy alto (entre el 12 y el 20%). Resisten más por el rozamiento interno de las partículas que por cohesión, presentando una baja impermeabilidad. Se emplean en capas de base (tarmacadam).

(e) Mezclas porosas o drenantes (PA): Últimamente han adquirido una gran importancia en la pavimentación de firmes, ya que ofrecen una serie de propiedades muy ventajosas desde el punto de vista de la evacuación de aguas –mayor adherencia y seguridad- o la generación de ruido de rodadura. Lógicamente permiten el paso del agua en su interior, por lo que la capa inferior debe presentar características impermeables (mezcla densa o semidensa).

Tamiz	Gradación densa			Gradación abierta	
	3/8"	1/2"	3/4"	3/8"	1/2"
1"	100	100	100	100	100
3/4"	100	100	90-100	100	100

½"	100	90-100	70-90	100	95-100
3/8"	90-100	75-95	60-80	85-100	75-95
N°4	60-80	50-70	40-60	25-55	20-45
N°8	40-60	35-50	30-45	5-15	5-15
N°16	-	-	-	-	-
N°30	18-30	15-25	12-22	0-10	0-10
N°50	8-18	6-16	5-14	0-7	0-7
N°100	-	-	-	-	-
N°200	2-8	2-8	2-6	0-5	0-5

**Cuadro 1 Gradación de Materiales Granulares para Mezclas Densas y Abiertas**

Fuente: (Asociación Mexicana del Asfalto) **Asfaltos Modificados con Hule Molido, Limón y Cárdenas (2002)**.

#### **2.4.4 Por el Tamaño Máximo de los Áridos**

En función del tamaño máximo del árido empleado –arenas o gravas- cabe distinguir entre las siguientes mezclas:

(a) Mezclas de textura fina: En este tipo de mezclas, el tamaño máximo de sus áridos no excede de 8 mm. Destacan las lechadas asfálticas o slurrys ya estudiadas con anterioridad y los micros aglomerados en frío y en caliente, todos ellos tratamientos superficiales empleados en la rehabilitación de vías de cierta importancia.

(b) Mezclas de textura gruesa: Constituyen la gran mayoría de los aglomerados tipificados en España, empleando tamaños máximos de árido normalizados de 8, 12, 20 y 25 mm. Son los que definen una mejor macro textura del firme y determinan sus principales propiedades superficiales.

#### **2.4.5 Por la Granulometría de los Áridos**

La distribución de tamaños en los áridos empleados condiciona las características de la mezcla bituminosa, estableciendo a su vez una división en dos grandes familias:

(a) Mezclas continuas: Existe una distribución escalonada de tamaños de árido, de forma que las partículas más finas rellenan los huecos dejados entre las más gruesas. Este tipo de granulometrías es típica de las mezclas cerradas, caracterizadas por un alto contenido en filler. Se emplean de forma generalizada en nuestro país.

(b) Mezclas discontinuas: Su granulometría es discontinua, faltando áridos de tamaños comprendidos entre 2 y 8 mm. Son mezclas relativamente impermeables, aunque con peor comportamiento plástico y más caras. Destacan los macadams, cuya granulometría es uniforme.

#### **2.4.6 Por la Estructura del Árido**

Según la estructura y ordenación interna que presentan las partículas, se distinguen dos tipos de mezclas:

(a) Mezclas sin esqueleto mineral: Se trata de compuestos con un elevado contenido en filler –y por consiguiente de betún-, lo que hace que trabajen únicamente por cohesión al estar dispersos los áridos en el ligante, sin trabazón alguna. Destacan los mástics y asfaltos fundidos.

(b) Mezclas con esqueleto mineral: Entre ellas se engloban los hormigones y morteros bituminosos, por lo que son las más empleadas en casi todos los países. Se adaptan a cualquier situación de carga y son más económicas que las anteriores, dado que su contenido en ligante es más reducido.

### **2.5 GRADUACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICA EMPLEADA PARA NUESTRO ESTUDIO**

#### **2.5.1 Mezclas Asfálticas de Graduación Semidensa o Media (Gap Graded).**

La diferencia fundamental que tiene este tipo de graduación es la graduación particular que esta posee con rangos determinados específicos.

Dentro de la normativa tenemos también mezclas de graduación semidensa o media (Gap Graded), la cual es una mezcla uniforme y homogénea, elaborada con materiales pétreos bien graduados con tamaño nominal entre 25.4 milímetros (1 pulg.) y 6.3 milímetros (  $\frac{1}{4}$  pulg.), además que el porcentaje de vacíos va disminuyendo, siendo para esta mezcla un intervalo entre 5 y 12 %. Este tipo de mezcla ya no actúa principalmente como capa drenante, sino como una mejora de fricción, de frenaje y acabado de la superficie de rodamiento.

TAMIZ	GRADACION PARTICULAR GAP GRADED
1	100
$\frac{3}{4}$	90-100
$\frac{1}{2}$	65-85
$\frac{3}{8}$	50-70
N°4	30-45
N°8	16-28
N°30	6-16
N°50	4-12
P/N°200	2-6

**Cuadro 2** Graduación Gap Graded

**Fuente:** Aplicación de mezcla asfáltica tipo gap graded en vías de la ciudad de Bogotá D.C. – Colombia, Fabio Méndez Pinilla, Javier Ulloa Duarte, Leonel Hernández Agudelo

## 2.6 APLICACIÓN DEL GCR (GRANOS DE CAUCHO RECICLADOS) EN LOS PAVIMENTOS.-

Condiciones del caucho

El caucho es una sustancia natural o sintética que se caracteriza por su elasticidad, repelencia al agua y resistencia eléctrica. El caucho natural se obtiene de un líquido lechoso de color blanco llamado látex, que se encuentra en numerosas plantas.

El caucho sintético se prepara a partir de hidrocarburos insaturados.

Para nuestro proyecto emplearemos granos de caucho que se obtendrán de neumáticos en desuso. El GCR se obtiene por trituración mecánica o molienda de llantas desechadas, y debe ser de contextura fina.

Éste posee valiosos componentes que pueden contribuir al buen desempeño del asfalto, como lo son el negro de humo que es un antioxidante, las aminas, los aceites aromáticos, y los elastómeros SBS y SBR.

El caucho de llantas usadas puede ser incorporado en las mezclas asfálticas por medio de dos métodos diferentes denominados proceso húmedo y proceso seco. En el proceso húmedo, el caucho actúa modificando el ligante, mientras que en el proceso seco el caucho es usado como una porción de agregado fino.

Una de las principales características que presenta el cemento asfáltico modificado con GCR es el aumento en la viscosidad de la mezcla resultante, haciéndola más flexible a bajas temperaturas y menos plástica a altas. Entre los principales beneficios en los pavimentos están las mejoras a la deformación permanente, a la fatiga, y la resistencia al fisuramiento a bajas temperaturas.

En el proceso por vía seca la cantidad requerida de ligante tiende a aumentar, también se requiere un proceso especial para adicionar el GCR en planta, y un mayor tiempo de compactación en obra; el proceso por vía húmeda requiere un equipo adicional en planta para el mezclado y almacenamiento del asfalto-caucho, así como cambio de bombas y tuberías, adicionalmente requiere mayor energía para calentar la mezcla a mayores temperaturas con tiempos de reacción prolongados.

### **2.6.1 Proceso por Vía Húmeda:**

En este proceso el GCR es mezclado con el ligante para producir una mezcla asfalto-caucho, la cual es usada de la misma manera que un ligante modificado.

La proporción del GCR normalmente se encuentra entre el 14% y el 20%, dependiendo del ligante, por peso del total de la mezcla asfalto-caucho.

Cuando el cemento asfáltico y GCR son mezclados, el GCR reacciona con el ligante hinchándose y ablandándose por la absorción de aceites aromáticos, no siendo esta una reacción de tipo química. El grado de modificación del ligante depende de muchos factores, entre los cuales se encuentran el tamaño del GCR, la proporción y tipo del cemento asfáltico, el tiempo y temperatura de mezclado, el grado de agitación mecánica durante la reacción de la mezcla, el componente aromático del cemento asfáltico, y el uso de aditivos. El cemento asfáltico modificado con GCR mediante el proceso húmedo ha sido usado ampliamente como ligante en la reparación de grietas y sello de juntas, tratamientos superficiales, membranas retardantes de fisuras, y en la elaboración de mezclas asfálticas en caliente.

Se escogió este proceso porque de esta manera se modifica más el ligante que en el proceso de vía seca, además que puede ser empleado para sellos y tratamientos superficiales.

#### **2.6.2 Proceso por Vía Seca:**

El proceso seco es cualquier método donde el GCR se adiciona directamente a la mezcla asfáltica caliente, y es usado como un agregado fino que usualmente es mezclado con los áridos antes de adicionar el ligante. A diferencia del proceso húmedo, este proceso sólo requiere un sistema de alimentación que proporcione la cantidad adecuada de GCR, y que pueda agregarlo en el momento indicado para que se mezcle con los áridos cuando éstos alcancen cierta temperatura; normalmente el GCR es mezclado con los áridos antes de que el ligante sea adicionado.

El proceso seco puede ser usado para mezclas asfálticas en caliente con granulometrías densas, abiertas o discontinuas. Por ser un proceso en el que no se modifica de manera completa el ligante, éste no puede ser usado en otro tipo de aplicaciones como mezclas en frío, sellos o tratamientos superficiales.

### **2.7 MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON CAUCHO DE GRADUACIÓN MEDIA (GAP GRADED).-**

Su objetivo es lograr un pavimento de concreto asfáltico más durable y flexible, con mayor resistencia a la oxidación, a la reflexión de grietas y de surcos, obteniendo un excelente soporte estructural y una reducción importante en el ruido que produce el rodamiento de los vehículos.

La gradación Gap Graded garantiza que el asfalto - caucho llene los espacios dejados por los pétreos permitiendo que los vacíos con aire de la mezcla asfáltica estén entre 3% y 5%, permitiendo tener un pavimento impermeable y con gran desempeño en campo.

La mezcla resultante es muy densa, sella los pavimentos muy agrietados e impide que la humedad penetre a las capas inferiores. La estabilidad de este concreto proporciona un excelente soporte estructural.

Estas mezclas pueden acomodarse con facilidad a las flexiones del pavimento y le proporcionan un soporte estructural superior, pudiendo reducirse el espesor de la sobre carpeta (se compara con los concretos asfálticos convencionales). El mayor contenido de cementante y mayor espesor de la película reduce los problemas de fisuras y desmoronamiento. Los porcentajes de los vacíos son similares a los del concreto estándar de grado denso.

Con el uso del cementante de asfalto modificado con caucho (AMC) en los concretos de granulometría intermedia (gap graded) se obtiene un material flexible que puede usarse como una sobre carpeta para prolongar la vida de un pavimento existente y/o

para mejorar su nivel de soporte estructural, el confort en el manejo, la resistencia al deslizamiento y para reducir el índice de contaminación ambiental por el ruido de los automóviles. Estas mezclas, además, tienen una gran capacidad para absorber deformaciones y al ofrecer un soporte estructural superior se reduce el espesor de la sobre carpeta requerida en comparación con los concretos asfálticos convencionales. El mayor espesor de la película envolvente y de contenido de cementante reduce los problemas relacionados con el Asurado y el desgaste en cadena. Debido a esto, los porcentajes de vacíos son similares a los del concreto asfáltico convencional de granulometría densa, resultando también que son impermeables.

Pueden ser utilizados para reducir espesores. En la era de la conservación de los recursos naturales y el reciclado, la reducción de espesores a través del asfalto ahulado pueden ahorrar una cantidad importante de agregados para la superficie de la carretera. Ésto significa que menos agregados deben ser extraídos, guardando las reservas, y una menor cantidad de acarreo del banco al lugar de la obra.

Pueden reducir el ruido del tráfico hasta en un 85% en algunos casos. Generalmente, el asfalto con caucho proporciona un 50% de reducción del ruido. La reducción de ruido en carpetas drenantes va de un rango de 3 dB (decibeles) a 5 dB con relación a las mezclas densas, y de 6 a 7 dB con relación a las superficies de concreto hidráulico. El nivel de ruido que se obtiene en una carpeta drenante depende principalmente de la graduación del material pétreo, del espesor, de la porosidad y de la cantidad de asfalto.

El más notable de los beneficios de utilizar asfalto modificado con caucho es la utilización de las llantas de desecho.

Los químicos contenidos en el grano de caucho retardan el envejecimiento y la oxidación del asfalto, previniendo que llegue a ser quebradizo y agrietado. Debido a la flexibilidad del caucho en el asfalto, el asfalto con caucho resiste y reduce el agrietamiento. El agrietamiento permite la penetración del agua y presión que actúa



en las superficies subyacentes que producen hoyos y deterioro en la superficie de rodamiento. Ref. (“Diseño de mezcla asfáltica con asfalto caucho tecnología gap graded para la ciudad de Bogotá” Armando Ramírez Villamizar, Ingrid Lorena Ladino Rubio, Juan Pablo Rosas Ramírez, Bogotá-Colombia 2014).

## **INVESTIGACIÓN SOBRE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIPO GAP GRADED**

### **3.1 MUESTRAS DE LOS MATERIALES**

#### **3.1.1 Materiales Granulares**

El material granular empleado es triturado y procedente de la planta de áridos de San José de Charaja, ubicada en la localidad del mismo nombre. El material granular es de tipo pluvial obtenida del río Camacho y triturada en la chancadora de la Planta de Áridos de Charaja. Es material de tipo NP (No Plástico).

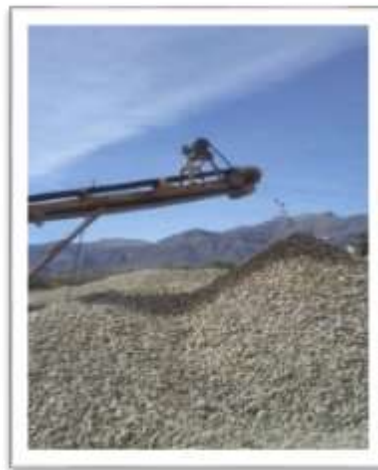
Para esta investigación adquirimos unos 240 Kg. aproximadamente de material entre grava 3/4, grava 3/8 y arena.



**Fig.5 Planta de Áridos Charaja**  
Fuente: Elaboración Propia



**Fig.6 Chancadora de Charaja**  
Fuente: Elaboración Propia



**Fig.7 Grava  $\frac{3}{4}$**   
Fuente: Elaboración Propia



**Fig.8 Arena**  
Fuente: Elaboración Propia



**Fig.9 Grava  $\frac{3}{8}$**   
Fuente: Elaboración Propia



**Fig.10 Embolsado de Materiales**  
Fuente: Elaboración Propia

### 3.1.2 Cemento Asfáltico a ser Modificado

El asfalto se obtuvo del SEDECA, de la planta que se encuentra en Charaja. Este asfalto es de Stratura Asfaltos (Brasil) Betupen. Este es de tipo convencional y es el (85-100). Para el estudio se obtuvo 10 Kg. de asfalto. BETUPEN es producido especialmente para presentar calidad y consistencia propia para el uso en la construcción y manutención de pavimentos asfálticos, pues, además de sus propiedades aglutinantes e impermeabilizantes, posee características de flexibilidad, durabilidad y alta resistencia a la acción de la mayoría de los ácidos, sales y álcalis. BETUPEN es utilizado en servicios en caliente, tales como: hormigón asfáltico, premezclado, arena-asfalto y tratamiento superficial. BETUPEN no puede ser calentado por encima de  $177^{\circ}\text{C}$ , bajo riesgo de oxidación y craqueo térmico del ligante. El calentamiento deberá ser efectuado hasta obtenerse la consistencia adecuada a su aplicación, siendo la temperatura ideal de empleo obtenida por la relación viscosidad/temperatura. No deberá ser aplicado en días de lluvia, en superficies mojadas y en temperaturas ambiente inferior a  $10^{\circ}\text{C}$ .



**Fig.11 Stratura Asfaltos (Brasil) Betupen**  
**Fuente: Elaboración Propia**



**Fig.12 Obtención del Asfalto**  
**Fuente: Elaboración Propia**



**Fig.13 Obtención del Asfalto**  
**Fuente: Elaboración Propia**



**Fig.14 Asfalto de Charaja**  
Fuente: Elaboración Propia

### 3.1.3 Grano de Caucho Reciclado (GCR)

El GCR se obtuvo del raspado de la huella de la llanta de una camioneta de la marca Good year de aro 14 mediante un esmeril. El GCR deberá ser uniforme libre de metal, fibras textiles u otros contaminantes y deberá estar seco. Todo el GCR tendrá un tamaño inferior a  $595\mu$  (Pasante del tamiz N°30).

Para nuestro trabajo se obtuvo 1 Kg. de grano de caucho reciclado de llanta en desuso. Este material se lo obtuvo por medios propios.



**Fig.15 Obtención del Grano de Caucho de Llanta en Desuso**  
Fuente: Elaboración Propia



**Fig.16 Embolsado de los Granos de Caucho**  
Fuente: Elaboración Propia



**Fig.17 Raspaje del Caucho de Llanta en Desuso**

Fuente: Elaboración Propia

### **3.1.4 Principios de la Investigación.-**

En la investigación para cumplir con el objetivo de analizar la incidencia en el comportamiento de mezclas asfálticas utilizando gradación Gap Graded y asfalto modificado con caucho, se estableció como principio de la investigación que la gradación Gap Graded sería constante y la única variable sería el cemento asfáltico en un porcentaje fijo cuya variabilidad sería la incorporación de porcentajes de caucho en un 10%, 14% y 20% del cemento asfáltico óptimo. Se elige estos porcentajes debido a que investigaciones sobre el mismo tipo de mezclas asfálticas establecen que un rango permisible es de 10% a 20%, proyectos ya ejecutados en Brasil establecen que los porcentajes más óptimos son en obra una media de 14%. Se adoptan estos tres porcentajes para la investigación para abarcar el rango permisible, de manera que se evalúen porcentajes extremos y medios, solo se eligen estos tres porcentajes debido al tiempo de duración de la investigación.

## **3.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES**

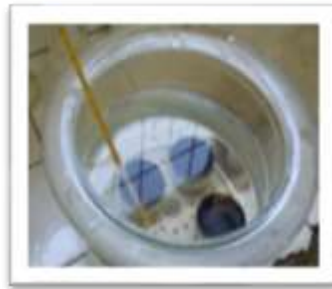
Los materiales componentes de una mezcla asfáltica deben ser caracterizados y deben cumplir con sus especificaciones correspondientes para tener una mezcla asfáltica más eficiente y con mejores resultados. Las normas y especificaciones se las puede ver en el anexo 3.

### **3.2.1 Caracterización del Asfalto**

#### **3.2.1.1 Penetración a 25°C, 100gr, 5seg, punto de inflamación y combustión**

##### **Penetración del asfalto**

Éste método describe un procedimiento para determinar la dureza, mediante penetración.



**Fig.18 Asfalto a 25°C**  
Fuente: Elaboración Propia



**Fig.19 Control de Temperatura**  
Fuente: Elaboración Propia



**Fig.20 Penetración del Asfalto**  
Fuente: Elaboración Propia

### **Punto de inflamación**

Es la temperatura, a la que la aplicación del fuego (llama) causa el vapor de un espécimen para encender.



**Fig.21 Punto de Inflamación**  
Fuente: Elaboración Propia



**Fig.22 Punto de Inflamación**  
Fuente: Elaboración Propia

### **Punto de combustión**

Es la temperatura más baja a la que un espécimen se mantendrá quemándose durante 5 segundos.



**Fig. 23 Punto de Combustión**  
Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla N°1 se muestra el ensayo de penetración del asfalto convencional y los puntos de inflamación y combustión.

Tabla N°1 Ensayo de Penetración, Inflamación y Combustión del Asfalto

ENSAYOS		DESCRIPCIÓN			
PENETRACIÓN		60 - 70	85 - 100	120 - 150	
PUNTO DE INFLAMACIÓN		> de 232 °C	> de 232 °C	> de 218 °C	
1.- Temperatura indicada por Especificación para el punto de inflamación :					<b>&gt; 232 °C</b>
2.- La <i>Inflamación</i> se produjo a :		<b>270 °C</b>			
3.- La <i>Combustión</i> se produjo a :		<b>300 °C</b>			
<b>PENETRACIÓN</b>					
<b>CONDICIONES :</b>		Temperatura = 25 °C	Carga = 100 Grs.	Tiempo = 5 Seg.	
<b>MUESTRA N°</b>	<b>ENSAYO N°</b>	<b>E - 1</b>	<b>E - 2</b>	<b>E - 3</b>	<b>PROMEDIO</b>
	Lectura Inicial	0,0	0,0	0,0	0,0
	Lectura Final	89,0	87,0	90,0	88,7
	Penetración	89,0	87,0	90,0	88,7
					<b>PENETRACIÓN</b>
					<b>88,7</b>
Promedio Total ( mm )					<b>85 - 100</b>



(Para la guía y ensayos de penetración, punto de inflamación y combustión con caucho ver anexo 1). A continuación se muestran los resultados obtenidos de éstos ensayos, con 0%, 10%, 14% y 20% de caucho en el cemento asfáltico.

Tabla N°2 Resultados de Penetración, Inflamación y Combustión del Asfalto

Propiedad	Norma de referencia	Especificación		REPORTE DE CONTROL			
		A.S.T.M.D-6114-97		Porcentaje de caucho en el C.A.			
		min	max	s/modificar	10%	14%	20%
Penetración @25°C. 100gr. 5seg. (mm/10)	ASTM D-5	50	100	87,7	80	75	70
Punto de inflamación	ASTM D-93	232,2	—	270	275	277	280
Punto de combustión	ASTM D-94	232,2	—	300	310	315	317

### 3.2.1.2 Punto de ablandamiento

Es la menor temperatura a la que una muestra, suspendida en un anillo horizontal de dimensiones especificadas, es forzada a caer 25 mm por el peso de una bola de acero especificada, cuando la muestra se calienta en un baño de agua. (Para la guía del ensayo ver anexo 1).



**Fig.24 Asfalto en Anillos**  
Fuente: Elaboración Propia



**Fig.25 Asfalto a 5°C**  
Fuente: Elaboración Propia



**Fig.26 Control de Temperatura**  
Fuente: Elaboración Propia





**Fig.27** Proceso del Punto de Ablandamiento  
Fuente: Elaboración Propia



**Fig.28** Proceso del Punto de Ablandamiento  
Fuente: Elaboración Propia



**Fig.29** Punto de Ablandamiento  
Fuente: Elaboración Propia

A continuación se muestran los resultados obtenidos del punto de ablandamiento para el asfalto sin modificar y modificado con 10%, 14% y 20% de caucho en el asfalto.

<b>Porcentaje de caucho en el Cemento Asfáltico (C.A.)</b>	<b>Temperatura °C Promedio</b>
0 (Convencional)	43
10	51
14	54
20	57

**Cuadro 3** Resultados Obtenidos del Punto de Ablandamiento  
Fuente: Elaboración Propia

### 3.2.1.3 Viscosidad Saybolt Furol

Es el tiempo corregido de derrame en segundos de 60 ml de muestra que fluye a través de un orificio Furol calibrado bajo las condiciones específicas. El valor de viscosidad se expresa en Saybolt Furol Segundos, SFS abreviado, a una temperatura especificada. La temperatura es de 135°C.

(Para la guía del ensayo de viscosidad ver en anexo 1)



**Fig.30 Control de Temperatura**  
**Fuente: Elaboración Propia**

Las viscosidades obtenidas en el equipo para nuestro estudio fueron:

Viscosidad para un asfalto sin modificar = 151 SFS (Saybolt Furol Segundos)

Viscosidad para un asfalto modificado con 10% caucho en el C.A. = 217 SFS

Viscosidad para un asfalto modificado con 14% caucho en el C.A. = 226 SFS

Viscosidad para un asfalto modificado con 20% caucho en el C.A. = 240 SFS

#### **3.2.1.4 Peso específico del asfalto**

Este método cubre la determinación de la gravedad específica de materiales bituminosos por uso de un picnómetro. (Para la guía y ensayos para asfaltos modificados con caucho ver en anexo 1).



**Fig.31 Medición del Peso del Picnómetro**  
Fuente: Elaboración Propia



**Fig.32 Peso del Picnómetro + Asfalto**  
Fuente: Elaboración Propia

En la tabla siguiente se puede observar el ensayo de peso específico del asfalto:

Tabla N°3 Ensayo de Peso Específico del Asfalto

DATOS INICIALES		MUESTRAS		
		E - 01	E - 02	E - 03
PICNÓMETRO N°		1	2	
TEMPERATURA		25	25	
FACTOR TEMPERATURA A 25°C		-	-	
N°	PESOS	MUESTRAS		
		01	02	03
W1	PESO PICNÓMETRO VACIO	32,20	36,00	
W2	PESO PICNÓMETRO + C. A.	49,69	53,20	
W3	PESO PICNÓMETRO + C. A. + AGUA	57,95	59,46	
W4	PESO PICNÓMETRO + AGUA	57,86	59,34	
	GRAVEDAD ESPECÍFICA	1,005	1,007	
	PROMEDIO		<b>1,006</b>	
<b>K</b> = Corrección por temperatura.				
	P.E. =	$\frac{W2 - W1}{W4 + (W2 - W1) - W3}$		* K

A continuación se muestran los resultados obtenidos de los ensayos del peso específico del asfalto modificado con diferentes porcentajes de caucho:

Peso específico del asfalto modificado con 10% de caucho en el C.A. = 1,008 gr/cm<sup>3</sup>

Peso específico del asfalto modificado con 14% de caucho en el C.A.= 1,01 gr/cm<sup>3</sup>

Peso específico del asfalto modificado con 20% de caucho en el C.A. = 1,02 gr/cm<sup>3</sup>

### 3.2.2 Caracterización del Material Granular

Las normas y especificaciones se las pueden ver en anexos 3

#### 3.2.2.1 Granulometría

No es más que obtener la distribución porcentual de los tamaños de partículas que conforman un suelo. Ésto se realiza con ayuda de un juego de mallas, que tienen un tamaño graduado establecido. (Ver guía de ensayo en anexo 2)

#### Composición Granulométrica de los agregados

##### Resultados de las granulometrías (%Pasan)

Tamiz N°	Grava de 3/4	Grava de 3/8	Arena
1	100	100	100
3/4	90,1	100	100
1/2	35	100	100
3/8	6,2	88,9	100
N°4	1,4	20,3	99
N°8	1,2	6	81,1
N°30	1,1	4,3	43,3
N°50	1,1	3,9	32,1

P/N°200	0,7	1,7	15,8
---------	-----	-----	------

**Cuadro 4 Resultado de las Granulometrías**  
**Fuente: Elaboración Propia**

Éstos valores promedio son el resultado de varias granulometrías (ver anexo 2).



**Fig.33 Cuarteo Mecánico de los Agregados**  
**Fuente: Elaboración Propia**

**Fig.34 Cuarteo Mecánico de los Agregados**  
**Fuente: Elaboración Propia**



**Fig.35 Secado de los Materiales**  
**Fuente: Elaboración Propia**



**Fig.36 Materiales a Temperatura Ambiente**  
**Fuente: Elaboración Propia**



**Fig.37 Pesado de los Materiales**  
Fuente: Elaboración Propia



**Fig.38 Serie de Tamices Empleados para la Granulometría**  
Fuente: Elaboración Propia



**Fig.39 Lavado de Material Fino**  
Fuente: Elaboración Propia



**Fig.40 Secado de Material Fino**  
Fuente: Elaboración Propia



**Fig.41 Tamizado Manual de los Agregados Finos**  
**Fuente: Elaboración Propia**



### 3.2.2.2 Peso específico del agregado grueso y fino

La gravedad específica del agregado es necesaria para determinar el contenido de vacíos de las mezclas asfálticas compactadas. Por definición, la gravedad específica de un agregado es la relación del peso por unidad de volumen de un material respecto del mismo volumen de agua. (Para la guía de este ensayo ver anexo 2).



**Fig.42 Peso del Picnómetro**  
Fuente: Elaboración Propia



**Fig.43 Sacando las Burbujas**  
Fuente: Elaboración Propia



**Fig.44 Picnómetro + Muestra Seca**  
Fuente: Elaboración Propia



**Fig.45 Muestra Saturada de Agua**  
Fuente: Elaboración Propia



**Fig.46 Pesando las Muestras**  
Fuente: Elaboración Propia





**Fig.47** Peso de la Muestra en Agua  
Fuente: Elaboración Propia



**Fig.48** Cesto  
Fuente: Elaboración Propia

En la tabla siguiente se determina el peso específico de los agregados fino y grueso correspondientes a este ensayo:

Tabla N°4 Determinación del Peso Específico del Agregado Fino y Grueso

DETERMINACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO					
AASHTO T - 84					
Descripción	Unidad	Arena	Arena	PROMEDIO	
Peso Frasco Seco Vacío (u)	grs.	239,7	206		
Peso Frasco +Muestra(f)	grs.	386,1	354,6		
Peso Muestra Saturada de Superficie Seca(x=f-u)	grs.	238,1	237,7		
Peso Muestra Seca (a)	grs.	231,5	230,6		
Peso Agua (t)	grs.	572,8	578,5		
Peso Muestra +Agua (b)	grs.	719,2	727,1		
Peso Espec. del Agreg. Seco ( $a/((x+t)-b)$ )	grs./cm <sup>3</sup>	2,525	2,588	2,556	
P. E. A. Saturado Sup. Seco ( $x/((x+t)-b)$ )	grs./cm <sup>3</sup>	2,597	2,668	2,632	
Peso Específico Aparente ( $a/(a+t)-b$ )	grs./cm <sup>3</sup>	2,720	2,812	<b>2,766</b>	
% de Absorción ( $(x-a)/a$ )*100	%	<b>2,851</b>	<b>3,079</b>	<b>2,965</b>	
DETERMINACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO					
AASHTO T-85					
Descripción	Unidad	Grava 3/4	Grava 3/8	PROMEDIO	
Peso Muestra Saturada de Superf. Seca (e)	grs.	2412	4167		
Peso Material Seco (f)	grs.	2382	4128		
Peso Muestra + Cesto suspendido en Agua	grs.	1497	2584		
Peso del Cesto suspendido en Agua	grs.	0	0		
Peso Muestra suspendida Agua (g)	grs.	1497	2584		
Peso Específico del Agregado Seco ( $f / (e-g)$ )	grs./cm <sup>3</sup>	2,603	2,608		
P.E.A. Saturado de Superficie Seca ( $e/(e-g)$ )	grs./cm <sup>3</sup>	2,636	2,632	Grava 3/4	Grava3/8
Peso Específico Aparente ( $f/ (f-g)$ )	grs./cm <sup>3</sup>	2,692	2,674	2,692	2,674
% de Absorción ( $(e-f)/f$ )*100	%	<b>1,259</b>	<b>0,945</b>	<b>1,259</b>	<b>0,945</b>

### 3.2.2.3 Caras fracturadas

Esta norma describe el procedimiento para determinar el porcentaje, en masa o por conteo de una muestra de agregado grueso compuesta por partículas fracturadas que cumplen con los requisitos específicos. (Para la guía del ensayo ver anexo 2)



**Fig.49 Muestra para Analizar**  
Fuente: Elaboración Propia



**Fig.50 Separando las Caras Fracturadas**  
Fuente: Elaboración Propia

En la siguiente tabla se determina el porcentaje de caras fracturadas de los agregados:

Tabla N°5 Determinación del Porcentaje de Caras Fracturadas

TAMAÑO DEL AGREGADO		A (g)	B (g)	C (B/A)*100	D (%)	E (C*D)
PASA TAMIZ	RETENIDO EN TAMIZ					
3/4	1/2	1200	1148	95,7	19,24	1840,6
1/2	3/8	300	288	96,0	14	1344,0
<b>TOTAL</b>			1436	191,7	<b>33,2</b>	<b>3184,6</b>

**PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS= (TOTAL E)/(TOTAL D)= 95,8 %**

A = Peso de la muestra

B = Peso del material con caras fracturadas

C = Porcentaje de caras fracturadas

D = Porcentaje retenido de gradación original

E = Promedio de caras fracturadas

### 3.2.2.4 Equivalente de arena

Este ensayo nos sirve para conocer la relación de material arcilloso o fino en una fracción del agregado. (Para la guía del ensayo ver anexo 2). A continuación se determina el equivalente de arena en la siguiente tabla:

Tabla N°6 Determinación del Equivalente de Arena

<b>DETERMINACIONES</b>		<b>MUESTRA N° 1</b>
Lectura en el Tope de Arena	A	7,3
Lectura en el Tope de Arcilla	B	12,4
Equivalente de Arena	$A * 100 / B$	<b>58,9</b>
<b>DETERMINACIONES</b>		<b>MUESTRA N° 2</b>
Lectura en el Tope de Arena	A	7,4
Lectura en el Tope de Arcilla	B	12,4
Equivalente de Arena	$A * 100 / B$	<b>59,7</b>
<b>DETERMINACIONES</b>		<b>MUESTRA N° 3</b>
Lectura en el Tope de Arena	A	7,5
Lectura en el Tope de Arcilla	B	12,4
Equivalente de Arena	$A * 100 / B$	<b>60,5</b>
<b>RESUMEN</b>		
Muestra N° 1	58,9	
Muestra N° 2	59,7	
Muestra N° 3	60,5	
<b>EQUIVALENTE DE ARENA</b>	<b>59,7</b>	



**Fig.51 Utilizando el Pisón**  
Fuente: Elaboración Propia

**Fig.52 Mezclando la Muestra**  
Fuente: Elaboración Propia

### 3.2.2.5 Ensayo de desgaste de Los Ángeles

Este ensayo nos sirve para determinar el porcentaje de desgaste de los agregados de tamaños menores a 37.5 mm (1 ½”), por medio de la Máquina de Los Ángeles.

(Para la guía del ensayo ver anexo 2)

METODO		A	B	C	D
DIAMETRO		CANTIDAD DE MATERIAL A EMPLEAR (gr)			
PASA	RETENIDO				
1 1/2"	1"	1250±25			
1"	3/4"	1250±25			
3/4"	1/2"	1250±10	2500±10		
1/2"	3/8"	1250±10	2500±10		
3/8"	1/4"			2500±10	
1/4"	Nº4			2500±10	
Nº4	Nº8				5000±10
<b>PESO TOTAL</b>		<b>5000±10</b>	<b>5000±10</b>	<b>5000±10</b>	<b>5000±10</b>
NUMERO DE ESFERAS		12	11	8	6
NºDE REVOLUCIONES		500	500	500	500
TIEMPO DE ROTACION		30	15	15	15

**Cuadro 5 Especificaciones**  
Fuente: Elaboración Propia

TAMIZ	PESO RETENIDO
1"	0
3/4"	0
1/2"	2500,1
3/8"	2500,3
1/4"	2500,2
N°4	2500,6
N°8	5000,4

$$\% \text{ DESGASTE} = (P_{\text{INICIAL}} - P_{\text{FINAL}}) / P_{\text{FINAL}} * 100$$

MATERIAL	PESO INICIAL	PESO FINAL	% DE DESGASTE	ESPECIFICACION
A	5000,4	0	0	35% MAX
B	5000,4	4202,76	18,978957	35% MAX
C	5000,8	4012,73	24,623386	35% MAX
D	5000,4	3904,83	28,056791	35% MAX

**Cuadro 6 Resultados**

**Fuente: Elaboración Propia**



**Fig.53 Desgaste de Los Ángeles**

**Fuente: Elaboración Propia**



**Fig.54 Desgaste de Los Ángeles**  
Fuente: Elaboración Propia



**Fig.55 Control a 100 Vueltas**  
Fuente: Propia



**Fig.56 Peso Final después de 300 Vueltas**  
Fuente: Propia

### **3.3 DOSIFICACIÓN PARA LA GRADACIÓN TIPO GAP GRADED**

Para obtener la mezcla tipo gap graded, se juntaron tres tipos de material granular: 3/4, 3/8 y arena.

#### **3.3.1 Dosificación de los agregados**

El siguiente cuadro nos permite ver la distribución granulométrica en forma individual de cada agregado.

<b>Tamiz</b>	<b>Grava de</b>	<b>Grava de</b>	<b>Arena</b>
<b>Nº</b>	<b>3/4</b>	<b>3/8</b>	

1	100	100	100
3/4	90,1	100	100
1/2	35	100	100
3/8	6,2	88,9	100
N°4	1,4	20,3	99
N°8	1,2	6	81,1
N°30	1,1	4,3	43,3
N°50	1,1	3,9	32,1
P/N°200	0,7	1,7	15,8

**Cuadro 7 Granulometrías Promediadas**  
Fuente: Elaboración Propia

\*Valores promedio de varias granulometrías (ver anexos 2)

A continuación se muestra los rangos en cada tamiz en los que debe entrar nuestra muestra para considerarse tipo gap graded.

#### **Graduación Particular Gap Graded**

Tamiz N°	Tamaño Máximo Nominal $\frac{3}{4}$ pulgada
	Porcentaje que pasa
1	100
3/4	90 - 100
1/2	65 - 85
3/8	50 - 70
N°4	30 - 45
N°8	16 - 28
N°30	6 - 16

N°50	4 - 12
P/N°200	2 - 6

Cuadro 8 Graduación Gap Graded

Fuente: Aplicación de mezcla asfáltica tipo gap graded en vías de la ciudad de Bogotá DC-Colombia, Fabio Méndez, Javier Ulloa, Leonel Hernández

### 3.3.1.1 Composición granulométrica de la curva de proyección de los agregados.-

Después de analizar el cuadro de la composición granulométrica de los agregados y cumpliendo las exigencias de las especificaciones técnicas, la composición porcentual en peso de los agregados, resultado de varias tentativas alcanza los siguientes valores, en base a agregados:

#### APORTE PORCENTUAL DE AGREGADOS EN PESO

MATERIAL	CANTIDAD (%)
Grava 3/4	35
Grava 3/8	35
Arena	30
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>

Cuadro 9 Porcentaje de Cada Material

Fuente: Elaboración Propia

(Ver el tanteo en anexo 3)

Con los porcentajes obtenidos por tanteos, realizamos una mezcla y obtenemos una curva que debe encontrarse dentro de los rangos establecidos para ser tipo gap graded.

(Ver la grafica de la curva y de los rangos en anexo 3)

A continuación, se verifica que se encuentra dentro de los rangos establecidos

#### CURVA PROYECTADA

Tamiz N°	Curva Proyectada	Gradación Particular Gap Graded
		Porcentaje que Pasa



1	<b>100</b>	100
3/4	<b>96,54</b>	90 - 100
1/2	<b>77,3</b>	65 - 85
3/8	<b>63,3</b>	50 - 70
N°4	<b>37,3</b>	30 - 45
N°8	<b>26,9</b>	16 - 28
N°30	<b>14,9</b>	6 - 16
N°50	<b>11,4</b>	4 - 12
P/N°200	<b>5,6</b>	2 - 6

**Cuadro 10 Curva dentro del Rango de la Graduación Gap Graded**  
Fuente: Elaboración Propia

Como se encuentra dentro de los rangos establecidos, se trata de una mezcla tipo gap graded.

### 3.3.1.2 Pesos específicos de los agregados

Para la determinación de la mezcla de los agregados ésta fue fraccionada en dos partes:

A = 2.683 gr./cc Fracción retenida en el tamiz No 4.

B = 2.766 gr./cc Fracción que pasa el tamiz No 4.

El peso específico de la fracción retenida en el tamiz N° 4 (A) fue tomada con el promedio de la aparente y la real. Para la fracción pasante en el tamiz N° 4 (B) es el promedio de las densidades obtenidas de la determinación del peso específico.

La densidad relativa de la mezcla fue calculada en función de la expresión:

$$\text{Densidad Relativa} = 100 / \left( \frac{\%A}{\text{Dens.A}} + \frac{\%B}{\text{Dens.B}} \right)$$

La densidad relativa de la mezcla con los porcentajes de la granulometría de diseño es:

$$\text{Densidad Relativa} = 100 / \left( \frac{70}{2,683} + \frac{30}{2,766} \right) = 2,707$$

### 3.3.2 Dosificación del Asfalto

Se debe establecer un contenido mínimo de cemento asfáltico para que a través de él podamos establecer una serie de porcentajes que servirán para obtener el contenido óptimo de cemento asfáltico.

#### 3.3.2.1 Contenido mínimo de cemento asfáltico

El contenido mínimo calculado es de 4,5% de cemento asfáltico (C.A), (ver anexo 3)

% C.A.
4,0
4,5
5,0
5,5
6,0
6,5

**Cuadro 11 Porcentajes de C.A. Asumidos a partir del % C.A. Mínimo**  
Fuente: Elaboración Propia

#### 3.3.2.2 Dosificación para la fabricación de las briquetas

Las briquetas tendrán un peso total de 1200 g., incluido el asfalto. Teniendo en cuenta los porcentajes de asfalto que estos deben tener, se procede a calcular el peso del agregado que debe tener cada tamiz hasta completar los 1200 g. junto con el asfalto. Para hallar el óptimo del asfalto se elaboran 18 briquetas.

<b>Dosificación del asfalto para las briquetas</b>									
		%asfalto	asfalto	Peso total	asfalto (g)	Peso agregado			
		4	0,04	1200	48	1152			
		4,5	0,045	1200	54	1146			
		5	0,05	1200	60	1140			
		5,5	0,055	1200	66	1134			
		6	0,06	1200	72	1128			
		6,5	0,065	1200	78	1122			
<b>Dosificación de los agregados para las briquetas</b>									
tamiz		%Pasa	retenido	4%	4,50%	5%	5,50%	6%	6,50%
1	3/4	100	3,46	<b>39,86</b>	<b>39,65</b>	<b>39,44</b>	<b>39,24</b>	<b>39,03</b>	<b>38,82</b>
3/4	1/2	96,54	19,24	<b>221,64</b>	<b>220,49</b>	<b>219,34</b>	<b>218,18</b>	<b>217,03</b>	<b>215,87</b>
1/2	3/8	77,3	14	<b>161,28</b>	<b>160,44</b>	<b>159,60</b>	<b>158,76</b>	<b>157,92</b>	<b>157,08</b>
3/8	N°4	63,3	26	<b>299,52</b>	<b>297,96</b>	<b>296,40</b>	<b>294,84</b>	<b>293,28</b>	<b>291,72</b>
N°4	N°8	37,3	10,4	<b>119,81</b>	<b>119,18</b>	<b>118,56</b>	<b>117,94</b>	<b>117,31</b>	<b>116,69</b>
N°8	N°30	26,9	12	<b>138,24</b>	<b>137,52</b>	<b>136,80</b>	<b>136,08</b>	<b>135,36</b>	<b>134,64</b>
N°30	N°50	14,9	3,5	<b>40,32</b>	<b>40,11</b>	<b>39,90</b>	<b>39,69</b>	<b>39,48</b>	<b>39,27</b>
N°50	N°200	11,4	5,8	<b>66,82</b>	<b>66,47</b>	<b>66,12</b>	<b>65,77</b>	<b>65,42</b>	<b>65,08</b>
N°200	fondo	5,6	5,6	<b>64,51</b>	<b>64,18</b>	<b>63,84</b>	<b>63,50</b>	<b>63,17</b>	<b>62,83</b>
			suma	<b>1152,00</b>	<b>1146,00</b>	<b>1140,00</b>	<b>1134,00</b>	<b>1128,00</b>	<b>1122,00</b>

Cuadro 12 Dosificaciones de las Briquetas

Fuente: Elaboración Propia

**Cantidad de material**

Tamiz		Retenido (g)	Briquetas	Cantidad (g)
1	3/4	236,04	3	708,1
3/4	1/2	1312,55	3	3937,7
1/2	3/8	955,08	3	2865,2
3/8	N°4	1773,72	3	5321,2
N°4	N°8	709,49	3	2128,5
N°8	N°30	818,64	3	2455,9
N°30	N°50	238,77	3	716,3
N°50	N°200	395,68	3	1187,0
N°200	fondo	382,03	3	1146,1
		6822,00	3	20466

Cuadro 13 Cantidad de Material Granular Necesario

Fuente: Elaboración Propia

La cantidad necesaria de material granular para la elaboración de las 18 briquetas es de 20466 gr.

**3.3.2.3 Valores característicos de la mezcla asfáltica**

Efectuado lo anteriormente descrito en función de las granulometrías de cada uno de los agregados, establecida la curva granulométrica, la faja de trabajo y los pesos

específicos se realizó el ensayo de DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE MÉTODO MARSHALL. (Ver anexo 2)



**Fig.57 Dosificación de los Agregados**  
Fuente: Elaboración Propia



**Fig.58 Calentando el Asfalto y los Moldes**  
Fuente: Elaboración Propia



**Fig.59 Calentado de los Agregado**  
Fuente: Elaboración Propia



**Fig.61 Preparación de la Mezcla**  
Fuente: Elaboración Propia



**Fig.63 Control de Temperatura**  
Fuente: Elaboración Propia



**Fig.65 Desmoldando las Briquetas**  
Fuente: Elaboración Propia

**Fig.60 Diseño de la Mezcla Asfáltica**  
Fuente: Elaboración Propia



**Fig.62 Preparación de la Mezcla**  
Fuente: Elaboración Propia



**Fig.64 Preparando el Martillo**  
Fuente: Elaboración Propia



**Fig.66 Briquetas**  
Fuente: Elaboración Propia

### 3.3.2.4 DISEÑO MARSHALL DE LA MEZCLA PATRÓN

La cantidad de cemento asfáltico requerida se determina con el procedimiento Marshall, mediante la elaboración de probetas con distintos contenidos de ligante, con el cual se obtienen los parámetros Marshall que permiten determinar el porcentaje óptimo de ligante en la mezcla.



**Fig.67 Igualando Bordes**  
Fuente: Elaboración Propia

**Fig.68 Midiendo la Altura con el Vernier**  
Fuente: Elaboración Propia



**Fig.69 Peso al Aire**  
Fuente: Elaboración Propia



**Fig.70 Balanza para Peso Sumergido**  
Fuente: Elaboración Propia



**Fig.71 Sumergido de Briquetas 40min**  
Fuente: Elaboración Propia

**Fig.72 Peso Sumergido**  
Fuente: Elaboración Propia



**Fig. 73 Secado Superficial**  
Fuente: Elaboración Propia



**Fig.74 Peso Saturado Superficialmente Seco**  
Fuente: Elaboración Propia



**Fig.75 Sumergido a 60°C**  
Fuente: Elaboración Propia





**Fig.76 Lectura Dial de la Estabilidad y Fluencia**  
Fuente: Elaboración Propia

Para realizar la planilla se realizan diferentes cálculos, de los cuales tenemos las siguientes fórmulas:

$$\text{Densidad real (DR)} = \frac{\text{Peso Seco briqueta}}{\text{Sat.Sup.Seco-Sumergado en agua}}$$

$$\text{Densidad máxima Teórica (DMT)} = 100 / \left( \frac{CA}{\text{Peso Esp CA}} + \frac{100-CA}{\text{Peso Esp total Ag}} \right)$$

CA = Cemento Asfáltico

Peso Esp. total Ag = Peso específico total de los agregados

Peso Esp. CA = Peso específico del cemento asfáltico

$$\% \text{ Vacíos (\%V)} = \frac{DMT-PD}{DMT} * 100$$

PD = Promedio de densidades de un mismo porcentaje de cemento asfáltico

$$\text{Vacíos agregados mineral (VAM)} = \frac{\%V + (\%CA * PD)}{\text{Peso esp CA}}$$

$$\text{Relación Bitumen Vacíos (RBV)} = \frac{VAM - \%VA}{VAM} * 100$$

(Ver planilla Marshall en el anexo 3)



### Resumen de valores Marshall con diferentes contenidos de asfalto

LIG. %	VACÍOS % VTM	R.B.V. %	DENS. REAL (gr/cm <sup>3</sup> )	ESTABIL. (Lbf.)	AGREG. MINERAL %VAM	FLUENCIA 1/100"
4,0	6,2	60,3	2,378	2.505,0	15,7	7,4
4,5	5,5	65,8	2,377	2.299,0	16,2	7,7
5,0	3,6	77,0	2,407	2.666,0	15,5	10,5
5,5	4,1	76,2	2,376	1.883,0	17,1	15,8
6,0	2,8	83,8	2,390	1.981,0	17,0	16,4
6,5	2,5	86,2	2,379	1.871,0	17,8	15,9

**Cuadro 14 Resultados del Marshall**  
Fuente: Elaboración Propia

Con estos valores, se procede a graficar las siguientes relaciones:

- % Vacíos mezcla vs % Asfalto
- % Relación Bitumen Vacíos (RBV) vs % Asfalto
- Densidad vs % Asfalto
- Estabilidad vs % Asfalto
- Fluencia vs % Asfalto
- % Vacíos agregado mineral (VAM) vs % Asfalto

(Ver las gráficas en anexo 3)

#### 3.3.2.5 Determinación del óptimo contenido de asfalto

(Ver el método en anexo 3)

Se empleó el método NAPA, para determinar el óptimo contenido de asfalto de los gráficos:

1. Se determinó el contenido de asfalto correspondiente a la medida especificada del contenido de vacíos (4%). Dándonos un valor de 5,1% de asfalto que es nuestro valor óptimo del contenido de asfalto.
2. Se determinó las siguientes propiedades en el óptimo contenido de asfalto de los gráficos:

PORCENTAJE ÓPTIMO DE ASFALTO		
PARAMETRO MARSHALL	ADOPTADO	ASFALTO(%)
DENSIDAD REAL (gr./cm <sup>3</sup> )	2,391	5,1
VACIOS MEZCLA (%)	4,0	5,1
RELACION BITUMEN / VACÍOS (%)	74,8	5,1
ESTABILIDAD ( Lbs)	2300	5,1
FLUENCIA (0,01")	11,2	5,1
ASFALTO (%)		5,1

**Cuadro 15 Resultados con el Óptimo de Asfalto**  
Fuente: Elaboración Propia

A continuación, observamos que todos los resultados están dentro del rango de las especificaciones establecidas, por lo tanto el % asfalto obtenido es satisfactorio.

### Características de la Mezcla asfáltica gap graded

DESCRIPCIÓN	Unidad	Valor	Especificaciones	
			Min.	Max.
Peso Específico C.A.	[grs./cm <sup>3</sup> ]	1,006		
Densidad Máxima Teórica	[grs./cm <sup>3</sup> ]	2,493		
Densidad Real	[grs./cm <sup>3</sup> ]	2,391		
% de Vacíos Mezcla Total	[%]	4,0	3	5
V.A.M. (Vacíos Agregados Mineral)	[%]	16,2	14	
R.B.V. (Relación Betumen Vacíos)	[%]	74,8	65	75
Estabilidad Marshall	[Libras]	2300,0	1800	
Flujo	1/100 plg	11,2	8	14
Asfalto 85 - 100	[%]	5,1	4,8	5,4

**Cuadro 16 Verificación de las Especificaciones**  
Fuente: Elaboración Propia

Material	%	Unidad
Grava de 3/4"	33,22	En Peso
Grava de 3/8"	33,22	En Peso
Arena Triturada	28,47	En Peso
Asfalto 85 - 100	5,10	En Peso
TOTAL	100,0	En Peso

**Cuadro 17 Relación Materiales/Asfalto**  
Fuente: Elaboración Propia

Una vez obtenido el % óptimo del asfalto (5,1) se procede a realizar el diseño de briquetas con distintos porcentajes de GCR (granos de caucho reciclados).

### 3.3.3 Dosificación del Caucho

Para la fabricación de las briquetas, tomamos los siguientes porcentajes:

<b>Tipos de ligante asfáltico</b>	<b>Porcentaje de caucho del total de C.A.</b>	<b>Valor adoptado</b>
Betunes mejorados con caucho (BC)	(8-12)	10
Betunes modificados con caucho (BMC)	(>12 y <15)	14
betunes modificados de alta viscosidad con caucho (BMAVC)	(15-22)	20

**Cuadro 18 Adopción del % de Caucho**  
Fuente: Elaboración Propia

### 3.3.4 Caracterización del Asfalto-Caucho

Se debe realizar la caracterización del asfalto-caucho así como se realizó para el asfalto, pero con sus especificaciones correspondientes.

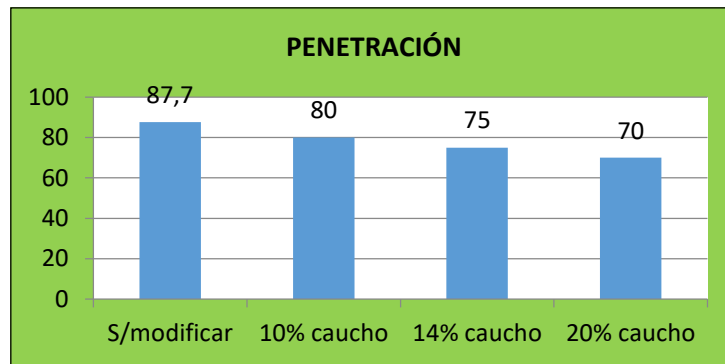
(Para ver los ensayos de esta caracterización, ver en anexo 1)

A continuación se presentan los resultados de esta caracterización:

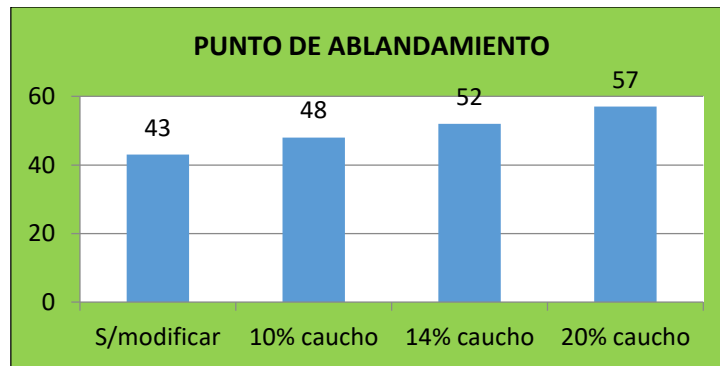
<b>Propiedad</b>	<b>Norma de referencia</b>	<b>Especificación</b>		<b>REPORTE DE CONTROL</b>			
		A.S.T.M.D-6114-97		Porcentaje de caucho en el C.A.			
		<b>min</b>	<b>max</b>	<b>s/modificar</b>	<b>10%</b>	<b>14%</b>	<b>20%</b>
Penetración @25°C.100gr. 5seg. (mm/10)	ASTM D-5	50	100	87,7	80	75	70
Punto de ablandamiento	ASTM D-36	51,7	—	43	48	52	57
Peso específico	INV E-707	—	—	1,006	1,008	1,01	1,02
Punto de inflamación	ASTM D-93	232,2	—	270	275	277	280
Punto de combustión	ASTM D-94	232,2	—	300	310	315	317

**Cuadro 19 Resultados de la Caracterización del Asfalto-Caucho**  
Fuente: Elaboración Propia

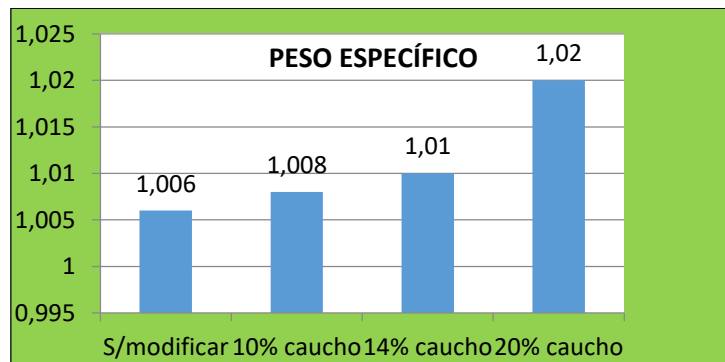
### Gráficas de comparaciones



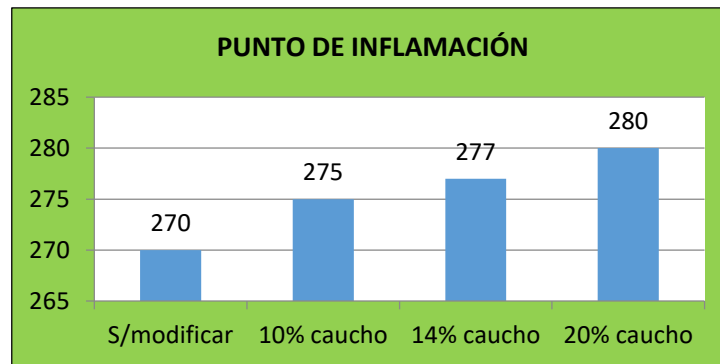
**Gráfica N°1 Resultados del Ensayo de Penetración**  
Fuente: Elaboración Propia



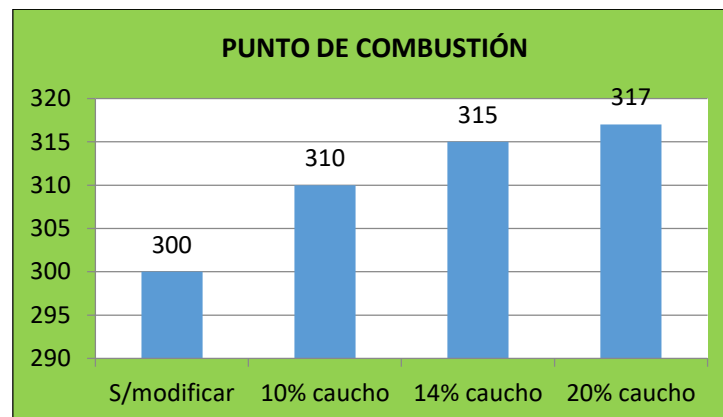
**Gráfica N°2 Resultados del Ensayo de Punto de Ablandamiento del Asfalto**  
Fuente: Elaboración Propia



**Gráfica N°3 Resultados del Ensayo de Peso Específico del Asfalto**  
Fuente: Elaboración Propia



**Gráfica N°4 Resultados del Ensayo de Punto de Inflamación del Asfalto**  
Fuente: Elaboración Propia



**Gráfica N°5 Resultados del Ensayo de Punto de Combustión del Asfalto**  
Fuente: Elaboración Propia

Una vez caracterizado los materiales que componen la mezcla asfáltica tipo gap graded modificada con caucho, se procede a la elaboración de las briquetas. Se elaboraran 30 briquetas para cada porcentaje de caucho, un total de 120 briquetas.

### 3.3.5 Dosificación del Agregado para las Mezclas Asfálticas Modificadas con Caucho

Con el óptimo de asfalto encontrado y con el peso total de la briketa, determinamos la cantidad de asfalto y agregado que tendrá cada briketa.

% Asfalto	Asfalto	Peso total	Asfalto (g)	Peso Agregado
5,1	0,051	1200	61,2	1138,8

Continuamos con el cálculo del retenido acumulado para facilitar la dosificación.

tamiz		%Pasa	retenido	Ret. Acum.
1	3/4	100	3,46	<b>39,4</b>
3/4	1/2	96,54	19,24	<b>219,1</b>
1/2	3/8	77,3	14	<b>159,4</b>
3/8	N°4	63,3	26	<b>296,1</b>
N°4	N°8	37,3	10,4	<b>118,4</b>
N°8	N°30	26,9	12	<b>136,7</b>
N°30	N°50	14,9	3,5	<b>39,9</b>
N°50	N°200	11,4	5,8	<b>66,1</b>
N°200	fondo	5,6	5,6	<b>63,8</b>
			<b>suma</b>	<b>1138,80</b>

**Cuadro 20 Dosificación de los Agregados para las Mezclas Asfálticas Modificadas con Caucho**  
Fuente: Elaboración Propia

La cantidad necesaria de agregados para las 120 briquetas será de: 120  
x 1138.8 g.= 136656 g.

### 3.3.6 Dosificación del Caucho para las Briquetas

El óptimo de asfalto es de 5,1% que equivale a 61,2 g de asfalto correspondiente a un total de mezcla asfáltica de 1200 g que compone una briketa. El porcentaje de caucho adicionado es parte de ese 61,2 g de asfalto.

%Caucho	Caucho	Óptimo C.A.(g)	Caucho (g)	N° Briquetas	Total Caucho(g)
10	0,1	61,2	6,12	30	183,6
14	0,14	61,2	8,568	30	257,04
20	0,2	61,2	12,24	30	367,2
				Suma	807,84

**Cuadro 21 Dosificación del Caucho para las Briquetas**  
Fuente: Elaboración Propia

Teniendo las dosificaciones correspondientes para la elaboración de las briquetas para la mezcla asfáltica modificada con caucho, se procede a la elaboración de éstas, de la misma manera en que se logró la obtención del contenido óptimo de asfalto. A continuación se presenta los resultados obtenidos:

### 3.3.7 Resumen de los Resultados

	Unidad	Porcentaje de caucho				Especificaciones	
		S/modif	10%	14%	20%	Min.	Max.
Peso Específico C.A.	(gr/cm3)	1,006	1,008	1,010	1,020		
Densidad Máxima Teórica	(gr/cm3)	2,492	2,493	2,494	2,497		
Densidad Real	(gr/cm3)	2,390	2,360	2,370	2,380		
% de Vacíos mezcla Total	%	4,13	5,52	4,81	4,60	3	5
V.A.M (Vacíos agregado mineral)	%	16,24	17,44	16,79	16,51	15	
R.B.V (Relación Bitumen Vacíos)	%	74,57	68,35	71,38	72,12	65	75
Estabilidad Marshall	Libras	2220,0	2180,0	2059,0	1733,0	1800	
Flujo	1/100plg	13,12	12,93	10,83	13,06	8	14
Asfalto 85-100	%	5,10	4,59	4,39	4,08	4,8	5,4

Cuadro 22 Resultados Marshall (ver anexo C)

Fuente: Elaboración Propia

Para los resultados de las densidades reales se realizó un análisis estadístico (Ver anexo 3). Para la formula de trabajo definitiva se realiza el ensayo de desgaste en el cántabro con 4 briquetas con 0%, 10%, 14% y 20% de caucho en el C.A.

### 3.3.8 Ensayo de Desgaste en el Cántabro

Cemento asfáltico	100 vueltas			200 vueltas			300 vueltas			Desgaste tota
	Peso inicial	Peso final	Desgaste	Peso inicial	Peso final	Desgaste	Peso inicial	Peso final	Desgaste	
C.A. sin modificar	1178,2	1159,1	1,65	1159,1	1147,4	1,02	1147,4	1124,3	2,05	4,72
10% de caucho de %C.A.	1178,5	1122	5,04	1122	1104,9	1,55	1104,9	1089,1	1,45	8,03
14% de caucho de %C.A.	1191,2	1184,8	0,54	1184,8	1177,1	0,65	1177,1	1169,5	0,65	1,84
20% de caucho de %C.A.	1184,6	1177,6	0,59	1177,6	1170,5	0,61	1170,5	1161,4	0,78	1,98

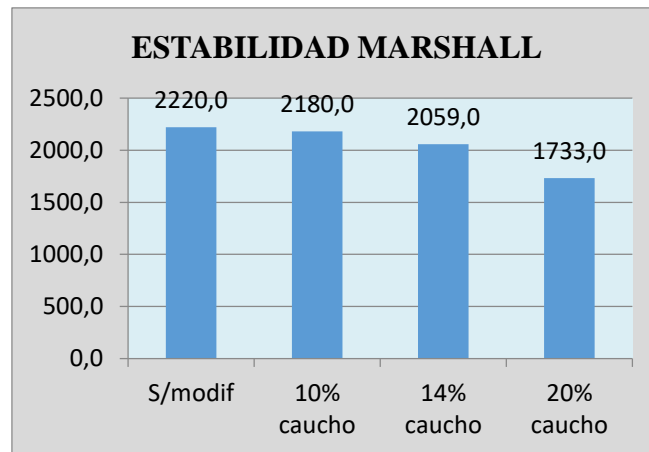
Cuadro 23 Resultado de Desgaste

Fuente: Elaboración Propia

Fig.77 Briquetas Desgastadas  
Fuente: Elaboración PropiaFig.78 Peso Final de la Briqueta  
Fuente: Elaboración Propia

## 3.4 EVALUACIÓN DE PROPIEDADES EN MEZCLAS TIPO GAP GRADED

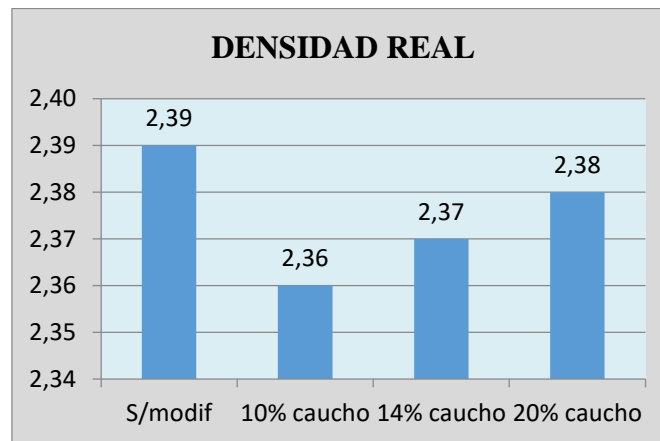
### 3.4.1 Estabilidad



**Gráfica N°6 Estabilidad Marshall**  
Fuente: Elaboración Propia

Se observa que la estabilidad para el 20% de caucho no está dentro del rango de las especificaciones establecidas para la estabilidad, que requiere de un mínimo de 1800 Lbs. También vemos un descenso de la estabilidad conforme se añade más caucho.

### 3.4.2 Densidad

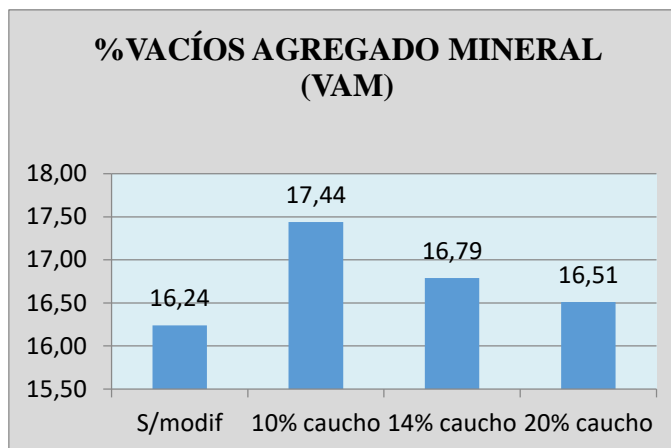


**Gráfica N°7 Densidad Real**  
Fuente: Elaboración Propia

Se observa un descenso de la densidad en la mezcla con 10% de caucho y de ahí un ascenso de la densidad que aumenta conforme se aumenta caucho.

### 3.4.3 Vacíos de Agregado Mineral (VAM)



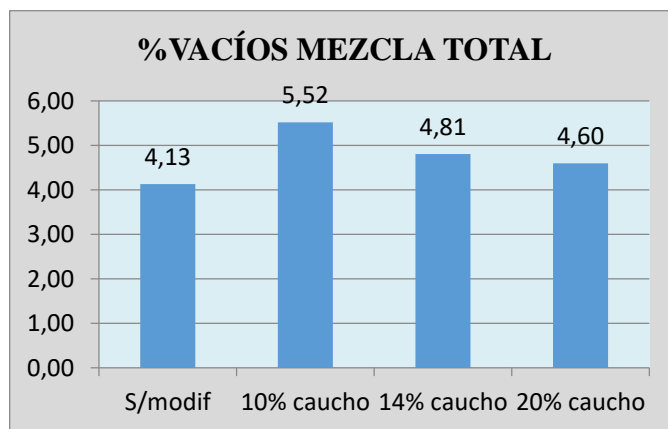


**Gráfica N°8 % Vacíos Agregado Mineral (VAM)**  
Fuente: Elaboración Propia

Se observa un ascenso del VAM en la mezcla asfáltica con 10% caucho y de ahí un descenso del VAM. Todos cumplen la especificación de  $VAM > 14\%$ .

Si el VAM es grande la mezcla presentará problemas de estabilidad y será antieconómica

#### 3.4.4 Vacíos con aire

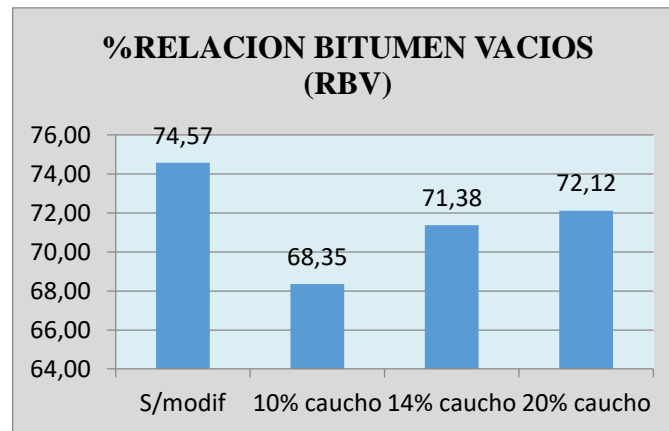


**Gráfica N°9 % Vacíos Mezcla Total**  
Fuente: Elaboración Propia

Se observa un ascenso de vacíos hasta el 10% y luego decrecen. En este porcentaje se sale del rango de especificaciones de (3-5) para el total de vacíos, por tanto se lo descarta.

Se necesita menos asfalto mientras menos vacíos tengan.

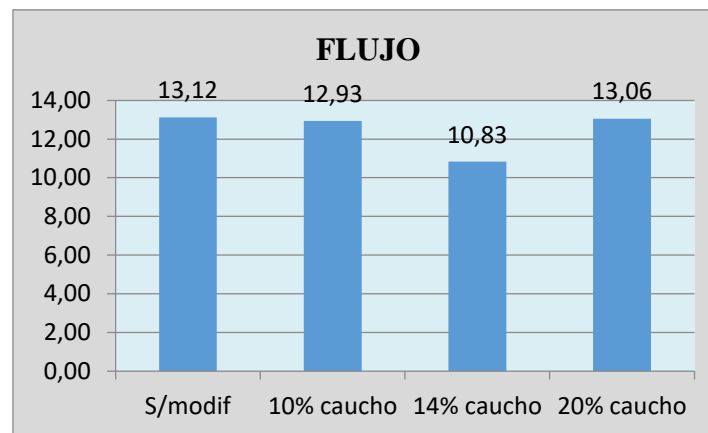
#### 3.4.5 Relación Bitumen Vacios (RBV)



**Gráfica N°10 %Relación Bitumen Vacíos (RBV)**  
Fuente: Elaboración Propia

Se observa un descenso de RBV en el 10% y de ahí un ascenso hasta casi igualar con el convencional. Todos los valores obtenidos están dentro de los rangos de las especificaciones establecidas que están entre (65-75%) de RBV.

### 3.4.6 Fluencia



**Gráfica N°11 Flujo**  
Fuente: Elaboración Propia

Valores altos de los flujos indican una mezcla plástica, valores bajos de flujo indican de una mezcla con vacíos llenos de aire mayores a lo normal. Se observa que todos los valores son satisfactorios y están dentro de las especificaciones establecidas entre (8-14).

## 3.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

De acuerdo a lo propuesto en los objetivos planteados en el proyecto iremos realizando un análisis de si se han cumplido con lo planteado.

Se obtuvo el grano de caucho reciclado de llantas en desuso mediante el raspaje de éste, mediante un esmeril, éste fue tamizado con el tamiz N°30. Se verificó que no tuviera algún otro material.

Se realizó la caracterización físico-química del asfalto convencional, como así también para el asfalto modificado con diferentes porcentajes de caucho (10%, 14% y 20% del % C.A.) respectivamente.

Penetración @25°C.100gr. 5seg. (mm/10)	ASTM D-5	50	100	87,7	72	65	60
Punto de ablandamiento	ASTM D-36	51,7	—	43	51	54	57
Viscosidad Saybolt- furol a 135°C, s		—	—	151	217	226	240
Peso específico	INV E-707	—	—	1,006	1,008	1,01	1,02
Punto de inflamacion	ASTM D-93	232,2	—	270	275	277	280

**Cuadro 24 Caracterización del Asfalto-Caucho**  
Fuente: Elaboración Propia

Propiedad	Norma de referencia	Especificación		
		A.S.T.M D-6114-97		
		min	max	Valor
Granulometría	ASTM D422	—	—	cumple
Peso específico agregado grueso	ASTM C-127	—	—	cumple
Peso específico agregado fino	ASTM C-128	—	—	cumple
Caras fracturadas	ASTM D-2419	75	—	95,8
Equivalente de Arena	ASTM D-5821	40	—	59,7
Desgaste de los Ángeles	ASTM C-131	—	35	Cumple

**Cuadro 25 Caracterización de los Agregados**  
Fuente: Elaboración Propia

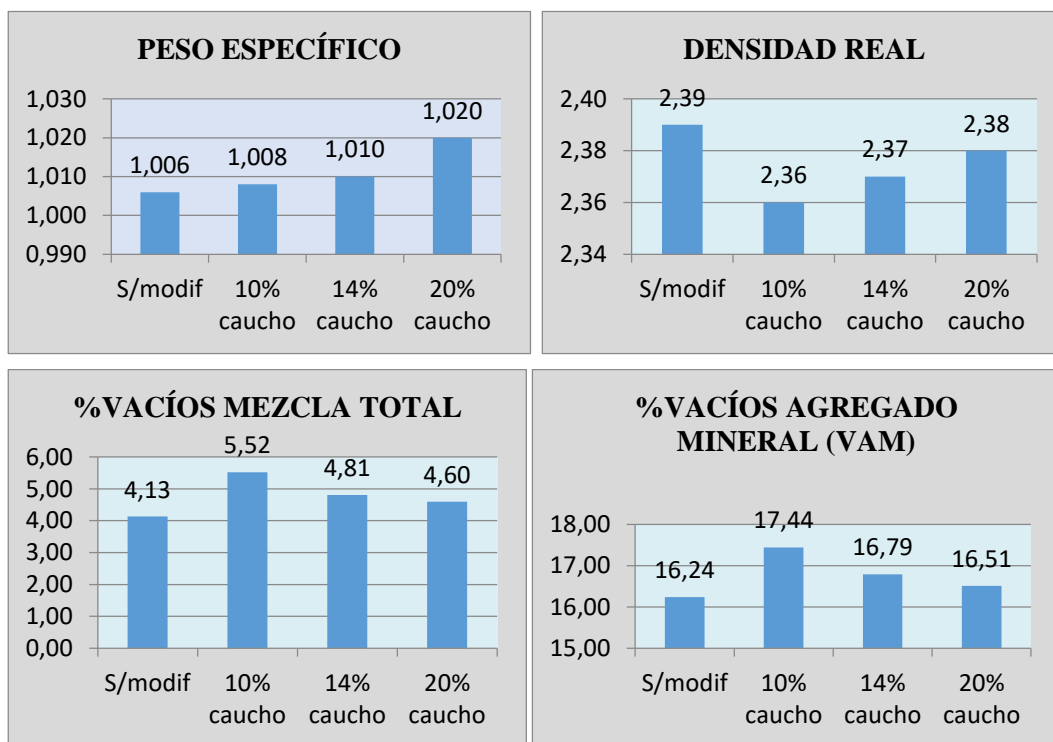
Se obtuvo el óptimo del asfalto por el método NAPA, de las gráficas de los resultados que están en el anexo 3. También se elaboró el diseño de una mezcla asfáltica modificada con caucho, a diferentes porcentajes.

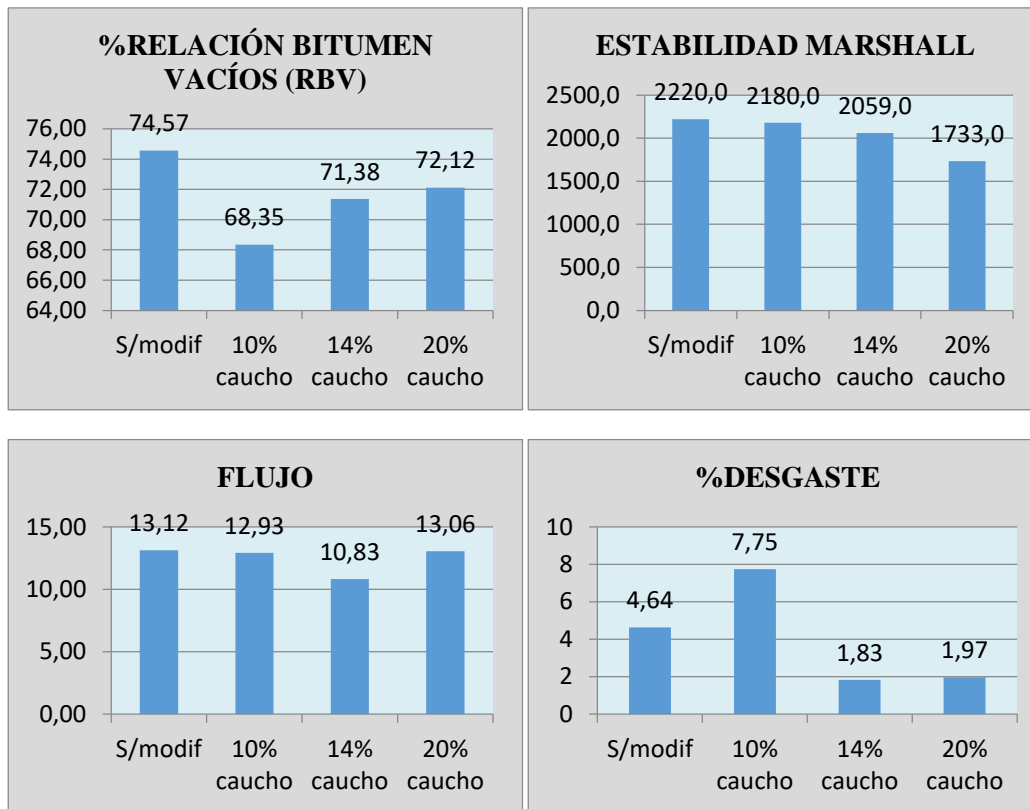
	Unidad	Briquetas				Especificaciones	
		S/modif	10% caucho	14% caucho	20% caucho	Min.	Max.
Peso Especifico C.A.	(gr/cm3)	1,006	1,008	1,010	1,020		
Densidad Maxima Teorica	(gr/cm3)	2,492	2,493	2,494	2,497		
Densidad Real	(gr/cm3)	2,39	2,36	2,37	2,380		
% de Vacios mezcla Total	%	4,13	5,52	4,81	4,60	3	5
V.A.M (Vacios agregado mineral)	%	16,24	17,44	16,79	16,51	15	
R.B.V (Relacion Bitumen Vacios)	%	74,57	68,35	71,38	72,12	65	75
Estabilidad Marshall	Libras	2220,0	2180,0	2059,0	1733,0	1800	
Flujo	1/100plg	13,12	12,93	10,83	13,06	8	14
Asfalto 85-100	%	5,10	4,59	4,39	4,08	4,8	5,4
Desgaste	%	4,72	8,03	1,84	1,98		

Cuadro 26 Resultados Finales

Fuente: Elaboración Propia

## Gráficas de comparación de los resultados

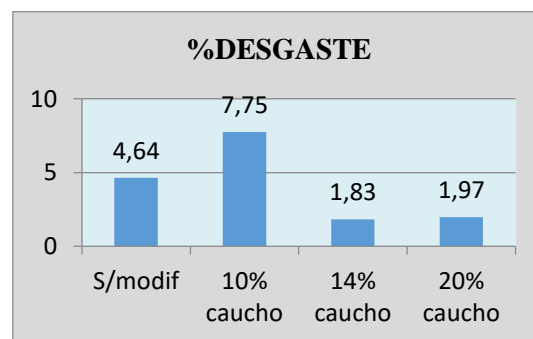




Gráfica N°12 Gráficas de Comparaciones  
Fuente: Elaboración Propia

### 3.6 VALORACIÓN PARA SU APLICACIÓN

En la actualidad en nuestro medio se vienen usando aditivos poliméricos, los cuales por ser excesivamente caros, son restringidos. En el presente proyecto se planteó la posibilidad de utilizar GCR, como aditivo polimérico para mejorar las propiedades de las mezclas asfálticas gap graded a bajo costo, ya que se usarían llantas en desuso para ser adicionadas a la mezcla, para mejorar sus propiedades, físico – mecánicas.



Gráfica N°13 %Desgaste  
Fuente: Elaboración Propia

Se puede comprobar en el resultado obtenido en la prueba de desgaste en el cántabro de Los Ángeles que el desgaste producido en la mezcla asfáltica tipo gap graded con el 10% de caucho tuvo una mayor deformación. El menor porcentaje de desgaste se presentó en la mezcla tipo gap graded que contiene el 14% de caucho en el ligante asfáltico. Además de cumplir con todas las especificaciones características para su utilización como capa de rodadura. Se puede afirmar que da mejores resultados con mezclas asfálticas gap graded que contienen el 14% de caucho en el ligante asfáltico.

	Unidad	Mezcla asfáltica gap graded	Especificaciones	
		14% caucho	Min.	Max.
Peso Específico C.A.	(gr/cm <sup>3</sup> )	1,010		
Densidad Maxima Teorica	(gr/cm <sup>3</sup> )	2,494		
Densidad Real	(gr/cm <sup>3</sup> )	2,37		
% de Vacíos mezcla Total	%	4,81	3	5
V.A.M (Vacíos agregado mineral)	%	16,79	15	
R.B.V (Relacion Bitumen Vacíos)	%	71,38	65	75
Estabilidad Marshall	Libras	2059,0	1800	
Flujo	1/100plg	10,83	8	14
Desgaste	%	1,84		

**Cuadro N°27 Resultados finales**  
**Fuente: Elaboración Propia**

### **3.7 FACTIBILIDAD DEL USO DE GAP GRADED Y ASFALTO MODIFICADO CON CAUCHO**

Por el estado de conocimiento que se tiene sobre lo realizado en investigación y en obra sobre la utilización del Gap Graded y el asfalto modificado con caucho, se puede afirmar con absoluto convencimiento técnico que es posible formar este tipo de mezclas si se dispone de los materiales adecuados tanto en agregados como en el asfalto modificado con caucho.

Sin embargo, cuando se analiza la factibilidad de su uso y particularizando para nuestro país debemos efectuar un análisis sobre los materiales que componen la mezcla Gap Graded y el asfalto modificado con polímeros; al respecto, establecemos lo siguiente:

- a) En la práctica se utilizan agregados naturales y triturados siendo estos últimos con mayor frecuencia y garantía en mezclas asfálticas; éstas se producen en plantas específicas donde se tiene todo el proceso de trituración y selección.
- b) Para generar granulometría Gap Graded a nivel de producción para obras sólo depende de una calibración de la planta de trituración y selección de manera que se tenga de salida los tamaños necesarios para obtener una gradación Gap Graded; por tanto, ésto es factible en nuestro medio.

En cuanto a la modificación del cemento asfáltico tomando como polímero el caucho (material disgregado de los neumáticos), al respecto se tienen en varios países la producción a gran escala de caucho para utilización en la modificación de asfaltos, uno de los países con mayor desarrollo tecnológico en esta área es Brasil, sin embargo en nuestro país y en particular en el departamento de Tarija no existe en este momento producción de caucho para modificar asfaltos. Si consideramos esta situación actual no sería factible para una utilización en obra. Pero consideramos que el aporte de la investigación a demostrar los resultados con la utilización del caucho como modificador del asfalto en laboratorio, permitirá alguna iniciativa privada de empresarios para instalar plantas de tratamiento de caucho con fines de producir caucho modificador de asfalto.

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **4.1 CONCLUSIONES**

-El material granular se preparó en el laboratorio de SEDECA con la granulometría exacta para que entre en las especificaciones Gap Graded, este tipo de gradación no

corresponde a las empleadas por esta institución. Este material fue obtenido de la planta de áridos ubicada en San José de Charaja.

-En países vecinos como Brasil, existen plantas de producción de modificador de caucho para asfalto, en nuestro país no existe ninguna fábrica para este tipo de modificador de asfalto, los granos de caucho fueron obtenidos manualmente mediante el raspado de una llanta con un esmeril para un posterior tamizado en la malla N°30.

-El modificador caucho se utilizó para la investigación en diferentes porcentajes de 10%, 14% y 20% del óptimo del cemento asfáltico que se obtuvo con el método Marshall. Se elige estos porcentajes debido a que investigaciones sobre el mismo tipo de mezclas asfálticas establecen que un rango permisible es de 10% a 20%. Proyectos ya ejecutados en Brasil establecen que los porcentajes óptimos son en obra una media de 14%. Se adoptan estos tres porcentajes para la investigación, para abarcar el rango permisible, de manera que se evalúen porcentajes extremos y medios.

-Los resultados del asfalto modificado con caucho en las propiedades de caracterización del asfalto modificado nos presento los siguientes resultados:

- En lo que respecta a la penetración el comportamiento del asfalto modificado cuanto mayor es el porcentaje de caucho menor es el valor de penetración por lo que su condición es más dura, esto no afecta significativamente a la mezcla asfáltica ya que estos porcentajes están dentro del porcentaje optimo del cemento asfaltico y este es apenas un 5,1% de la mezcla asfáltica total.
- El punto de ablandamiento se incrementa en valores no significativos, conforme se aumenta el porcentaje de caucho en el asfalto.
- El peso específico modificado con caucho prácticamente no cambia ni se modifica sustancialmente.
- Lo sobresaliente en el asfalto modificado con caucho es el incremento del la viscosidad Saybolt Furol, eso confirma que las propiedades de las mezclas con asfalto modificado tienen una condición más visco elástica.



-En lo que respecta al agregado Gap Graded todas las especificaciones cumplen satisfactoriamente.

-Las temperaturas óptimas para la mezcla y compactación de las mezclas asfálticas Gap Graded se las obtuvo de la curva de viscosidad-temperatura. Los rangos de las temperaturas óptimas aumentaron según se añadía más caucho al óptimo del asfalto.

-La prueba de cántabro que utilizamos para evaluar la mezcla asfáltica Gap Graded modificada con caucho, presento los siguientes resultados:

- La presencia del modificador de caucho en las mezclas con granulometría Gap Graded genera un menor desgaste y una mayor consistencia en los porcentajes de 14% y 20% de caucho, a diferencia del porcentaje de 10% que no cumplió con una de las especificaciones para poder ser empleada como capa de rodadura.

Por lo anotado anteriormente, se cumplió con el objetivo del proyecto, que consistía en aplicar una graduación específica (GAP GRADED) en una mezcla asfáltica modificada con caucho con materiales locales; se logró contar con un ligante más viscoso para reducir las deformaciones permanentes.

Con respecto a la modificación de mezclas asfálticas modificadas con caucho reciclado, la literatura es ambigua (“Estado del conocimiento del estudio sobre mezclas asfálticas modificadas en Colombia” Infraestructura vial, Vol. 10 (#19), 10-20. 2008).

#### **4.2 RECOMENDACIONES**

-Se recomienda hacer un análisis más detallado de los componentes del grano de caucho, ya que podría variar su composición según el tipo de llanta o marca del mismo.

- Realizar más ensayos de caracterización tanto en el asfalto como en los agregados para tener una mayor referencia en cuanto al material que se utilizará.
- Realizar más estudios con diferentes porcentajes de asfalto para tener mayor precisión en la obtención de resultados más eficientes.
- Realizar más pruebas a las mezclas asfálticas modificadas con caucho tipo gap graded para comprobar las mejoras obtenidas.
- Las universidades deben alentar estudios referidos a este tipo de mezcla asfáltica ya que vivimos en zonas de altas y bajas temperaturas, donde normalmente el pavimento se deteriora rápidamente, ocasionando grandes pérdidas de todo tipo.
- En nuestro país, la implantación de plantas recicladoras está retrasada, lo que implica que, desde un punto de vista económico, conseguir el caucho sea muy caro, dado que solo se consigue importándolo, se debe instar a los organismos gubernamentales a favorecer dicha implantación, apoyando a las empresas interesadas de todas las formas posibles, incluyendo la instauración de normativa en relación a los proyectos de carreteras que obliguen al uso y empleo del caucho proveniente de neumáticos desechados en la fabricación de mezclas asfálticas, siguiendo la línea de otros países, lo que causará el descenso de los precios finales del caucho reciclado, haciéndolo competitivo para su empleo en la construcción de carreteras.
- Se debe apoyar esta clase de estudios, ya que siempre se necesitará emplear algún tipo de polímero según la situación requiera.
- Se recomienda dotar de más equipos los laboratorios, ya que no todos los ensayos se pudieron realizar en un mismo sitio.
- Es muy importante establecer una cultura en la cual se vaya propagando el uso de diferentes tipos de materiales con los cuales se pueda beneficiar al desarrollo de nuestro país con nuevas tendencias de construcción y diversos enfoques hacia una nueva cultura del reciclaje.

