

**CAPÍTULO I**  
**DISEÑO TEÓRICO Y METODOLÓGICO**

# CAPÍTULO I

## DISEÑO TEÓRICO Y METODOLÓGICO

### 1.1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día la contaminación con desechos no biodegradables, la escasez del asfalto debido a la disminución de reservas petrolíferas del mundo y la búsqueda de nuevos materiales que den una alternativa al manejo ambiental y económico de las mezclas asfálticas porosas (drenantes), nace la idea de modificar las mezclas con llantas trituradas, para mejorar sus propiedades mecánicas y dar una respuesta al tráfico.

Es por eso que el empleo de las capas asfálticas con ligantes modificados a partir de polímeros (PVC, polietileno, poliésteres, cauchos naturales) representa una solución ante estos problemas ya que disminuyen la deformabilidad y crean una mayor resistencia a las solicitudes del tránsito. Como también puede tener una doble funcionalidad: mejorar las propiedades mecánicas de las capas asfálticas y disminuir la contaminación ambiental. (Fredy Alberto Reyes Lizcano, PhD, Profesor investigador en pavimentos de la Universidad Javeriana).

Como el objetivo es proponer nuevas mezclas asfálticas porosas mediante el empleo de caucho reciclado de llantas como modificador, lo que el autor propone es determinar el diseño óptimo de una mezcla asfáltica porosa modificada con caucho reciclado de llantas, y ver su efecto de la porosidad en la estabilidad Marshall de la misma, donde se pueda emplear como capa de rodadura y permita controlar el manejo de aguas de escorrentía.

Las mezclas porosas, tanto en concreto poroso como en asfalto, han tenido una gran acogida en países desarrollados por sus principales ventajas de mantener seca la superficie que está en contacto con los neumáticos de los vehículos. Se obtiene una mayor resistencia al deslizamiento bajo la lluvia y se elimina o reduce el fenómeno de hidropilaneamiento.

Este estudio, tiene en cuenta el mejoramiento de una mezcla asfáltica porosa con adición del grano de caucho reciclado, que ayude a optimizar el comportamiento de la capa de rodadura y además ayude a preservar el medio ambiente, dándole otra alternativa de reciclaje a materiales no biodegradables como es el caucho.

## **1.2. JUSTIFICACIÓN**

### **Técnico académica**

La presente investigación pretende dar a conocer la aplicación del Grano de Caucho Reciclado (GCR) de llantas, como un agente modificador en la mezcla asfáltica porosa, que es una gran solución a los problemas de contaminación como son las llantas en desuso, así disminuir el impacto sobre el medio ambiente.

Como también estableciendo otro parámetro para la construcción de estos pavimentos, los cuales nos dan características de alta resistencia, durabilidad y bajo desgaste a las inclemencias del clima y tráfico. También garantizando una mejor vía de circulación, una mayor vida útil, menores gastos en vías y obteniendo un adelanto económico, social y ambiental.

### **Social**

Es necesaria la realización de nuevos diseños de pavimentos flexibles modificados con la cualidad que sean porosos en nuestro departamento de Tarija, donde se le está brindando al conductor una mayor seguridad al conducir y así evitar los accidentes automovilísticos causados por el hidroplaneo durante las lluvias.

Cuando la estructura es porosa se proporciona una mayor adherencia llanta pavimento, tanto en estado seco como húmedo, dando a la población una mayor seguridad y confort.

### **Económica**

Las mezclas modificadas con grano de caucho reciclado, son una gran solución a los problemas de contaminación debido a las llantas desechadas, donde se ve el reflejo en una mejor economía utilizando este tipo de mezclas asfálticas porosas, donde sus características físico-mecánicas son mejoradas y también su bajo costo de mezclado; así mismo es parte de la solución a un problema de contaminación ya existente y sin ninguna solución total que se da.

### **1.3. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA**

#### **Efecto de la porosidad en la estabilidad Marshall con la incorporación de caucho reciclado a las mezclas asfálticas porosas.**

Una carretera pavimentada es una estructura que utilizamos diariamente para transportarnos de un lado a otro con mucha más rapidez, comodidad y seguridad. Al realizar esto nos vemos afectados con la acumulación de las aguas de las precipitaciones de las lluvias, donde las calzadas se convierten en un medio de transporte de estas aguas. Esto ocurre por el área de infiltración que le quitamos al pavimentar una vía, la cual da lugar a que se produzca este fenómeno.

Como también debido a los conflictos ambientales que se van generando en nuestro entorno, frente a la disposición de los residuos como el caucho de llantas, surge la necesidad de crear una idea para aminorar el daño al medio ambiente. Para ello existen varias alternativas de solución, una de ellas es realizar la construcción de una carretera con mezclas asfálticas porosas con adición de caucho reciclado de llantas, para lo cual se necesita estudiar su comportamiento de estabilidad, porosidad y flujo brindando la posibilidad de mejorar las propiedades mecánicas de las capas asfálticas y disminuir la contaminación ambiental.

### **1.4. PROBLEMA**

¿Cómo se podrá realizar un estudio del caucho reciclado de llantas como agente modificador en una mezcla asfáltica porosa, para determinar el efecto de la porosidad en la estabilidad Marshall?

### **1.5. OBJETIVOS**

#### **1.5.1. Objetivo general**

Estudiar el efecto de la porosidad en la estabilidad Marshall, de una mezcla asfáltica porosa modificada con grano de caucho reciclado de llantas, a través de ensayos Marshall, de tal manera que se pueda verificar si el aditivo mejora sus propiedades mecánicas en la mezcla asfáltica porosa.

### **1.5.2. Objetivos específicos**

- ✚ Realizar la caracterización de los agregados pétreos, el cemento asfáltico y el caucho reciclado de llantas.
- ✚ Diseñar y determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico para diferentes porcentajes de caucho reciclado de llantas por el método Marshall.
- ✚ Realizar pruebas de laboratorio para determinar la porosidad, estabilidad y permeabilidad para verificar si la mezcla asfáltica porosa modificada cumple con los criterios establecidos por la normativa de INVIAS.
- ✚ Realizar una comparación del efecto que genera la porosidad en la estabilidad de la mezcla asfáltica porosa convencional, al momento de modificarla con grano de caucho reciclado de llantas.

## **1.6. HIPÓTESIS**

Al incorporar el grano de caucho reciclado de llantas en una mezcla asfáltica porosa, se podrá establecer una mayor porosidad para transportar los fluidos, con el cual se analizará el efecto causado a la estabilidad Marshall.

### **1.6.1. Identificación de variables**

#### **Variables independientes**

$X_1$  = Porcentaje de caucho.

#### **Variables dependientes**

$Y_1$  = Porosidad.

$Y_2$  = Estabilidad.

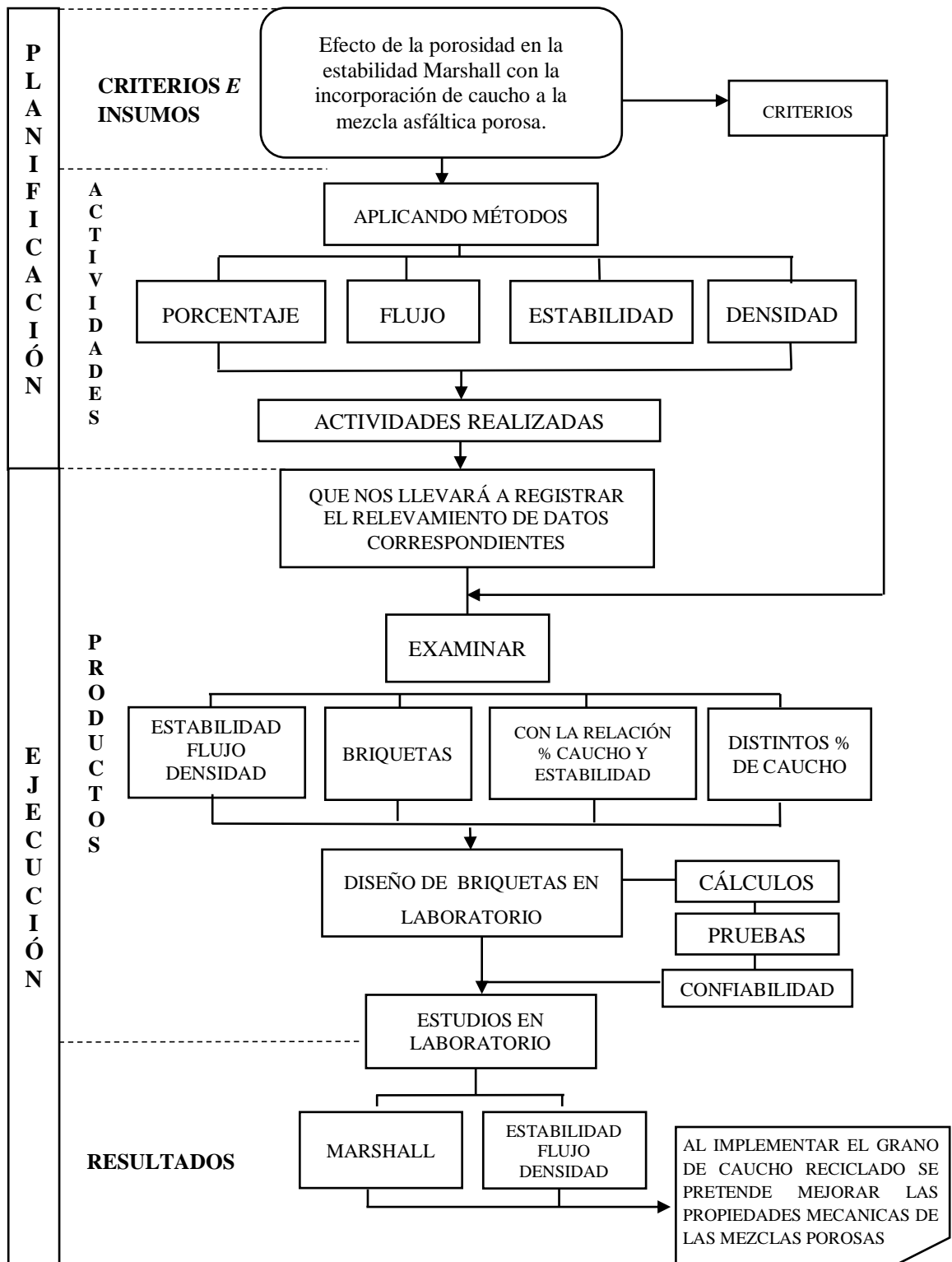
## **1.7. TIPO DE INVESTIGACIÓN**

El tipo de investigación, corresponde a la “Investigación Explicativa”.

Este tipo de investigación se centra en explicar los sucesos de un fenómeno y en qué condiciones se manifiesta durante la investigación, el cual nos indica que la investigación se enfocará en cómo afecta la adición de caucho de llanta triturada a las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica porosa, tomando en cuenta sus propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica porosa convencional.

## 1.8. PROCEDIMIENTO SEGÚN PERSPECTIVA

Esquema1.1. Procedimiento según perspectiva



Fuente: Elaboración propia

## **1.9. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN**

La presente investigación se realizará en el Departamento de Tarija, para lo cual se utilizará áridos propios de la región, donde se verá el efecto de la implementación del grano de caucho reciclado de llantas en la mezcla asfáltica porosa.

En el primer capítulo se desarrollará todo lo que se pretende hacer en la investigación como los objetivos que se tienen para la elaboración del proyecto, el objetivo final al cual se pretende llegar como también la justificación que se dará en la investigación para que tenga validez.

El segundo capítulo está enfocado en la información necesaria para la realización de la investigación, como conceptos necesarios para estudiar sus propiedades mecánicas y la normativa que se aplicará para este tipo de mezclas asfálticas porosas.

En el tercer capítulo se comenzará con la selección del material de la cantera de Charajas, como también se realizará la caracterización de los agregados pétreos a través de 23 ensayos; también se realizará la caracterización del cemento asfáltico 85 – 100, con 9 ensayos y el grano de caucho reciclado con 2 ensayos, para obtener su caracterización correspondiente.

En el cuarto capítulo se comenzará con la parte práctica, dando así inicio a la etapa del cálculo de diseño de la mezcla asfáltica porosa convencional con un total de 54 briquetas, para encontrar su contenido óptimo de cemento asfáltico, el cual se lo estudiará con los ensayos de cántabro y estabilidad Marshall; posteriormente se realizará el diseño de una mezcla asfáltica porosa modificada con grano de caucho reciclado con la cual se realizarán 108 briquetas, para encontrar su contenido óptimo de cemento asfáltico para cada porcentaje de grano de caucho reciclado, el cual se lo estudiará con los ensayos de estabilidad Marshall.

Una vez se encuentre el porcentaje óptimo de cemento asfáltico y del grano de caucho reciclado se procederá a realizar el diseño de la mezcla asfáltica porosa modificada con un total de 36 briquetas, para realizar el análisis estadístico y evaluar sus propiedades mecánicas para dar cumplimiento a los objetivos de la investigación.

También se realizará el análisis de precios unitarios tanto de la mezcla asfáltica porosa convencional como de la mezcla modificada para realizar la comparación económica de la misma.

En el quinto capítulo se dará a conocer las conclusiones y recomendaciones de la investigación.

El tiempo de realización de la investigación está limitado aproximadamente a 3 meses, para lo cual se hará uso de los laboratorios de la UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO, para la caracterización de los materiales que se emplearán y la realización del diseño de la mezcla.



**CAPÍTULO II**  
**FUNDAMENTO TEÓRICO**

## CAPÍTULO II

### FUNDAMENTO TEÓRICO

#### 2.1. MARCO TEÓRICO

##### 2.1.1. Pavimento flexible

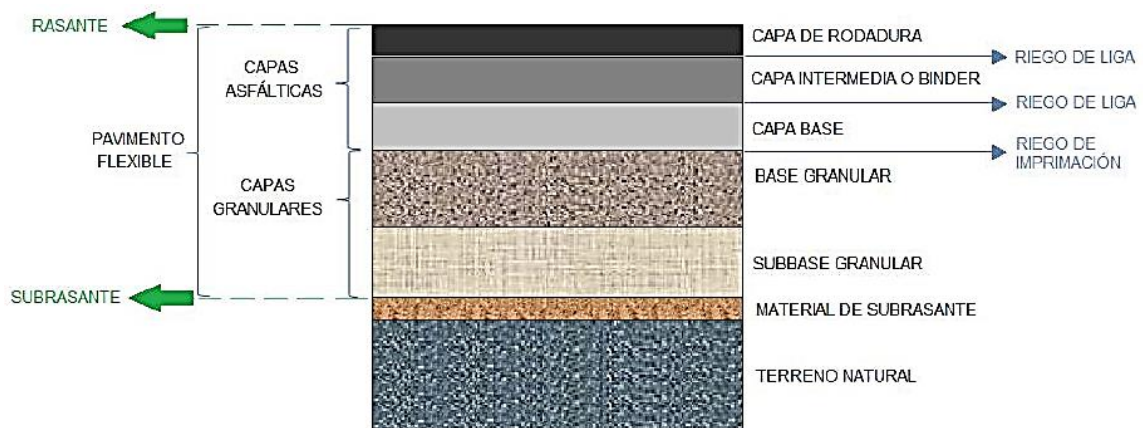
Este tipo de pavimentos está formado por una carpeta bituminosa apoyada generalmente sobre dos capas no rígidas, la base y la subbase. No obstante puede prescindirse de cualquier de estas capas dependiendo de las necesidades particulares de cada obra.

Esta serie de capas permiten transmitir las cargas de tránsito hasta el terreno natural sin que este se deforme.

El pavimento flexible no solo está formado por la capa de rodado sino por todas las que conforman la estructura.

En la siguiente figura se muestra la estructura de un pavimento flexible:

**Figura 2. 1.** Estructura de un pavimento flexible



**Fuente:** Confección y seguimiento de tramos de prueba de mezclas asfálticas con incorporación de polvo de caucho nacional de neumáticos fuera de uso (NFU) mediante vía seca. Nicole Michelle Navarro Dupré

## **2.1.2. Estructuras de un pavimento flexible**

### **2.1.2.1. Capa de base asfáltica**

Se ubica inmediatamente sobre la base granular imprimada, pudiendo ir sobre ella la capa intermedia o la capa de rodado. Debe absorber gran parte de las tensiones y resistir la repetición de flexiones o esfuerzos sin agrietarse por fatiga.

### **2.1.2.2. Capa asfáltica intermedia o binder**

Se ubica sobre la base asfáltica o directamente sobre la base granular. Se utiliza como capa complementaria estructural para mejorar la resistencia de un pavimento.

### **2.1.2.3. Capa de rodadura o carpeta**

Capa visible de la estructura, que debe proporcionar una superficie cómoda y segura para la conducción de vehículos, y que resista la abrasión y desintegración por acción directa de las cargas de tránsito y el ambiente. Tiene que cumplir también una función impermeabilizante, para impedir el ingreso de agua a las capas inferiores.

### **2.1.2.4. Base granular**

(CBR entre 80 % a 120 %). Tiene una función resistente, absorbe la mayor parte de los esfuerzos verticales, debe ser resistente a la deformación bajo las acciones del tránsito, por lo que en ocasiones debe estabilizarse con asfaltos o cemento.

### **2.1.2.5. Subbase granular**

(CBR entre 30 % a 60 %). Proporciona una capa de apoyo a la base, transmite los esfuerzos verticales a la capa subrasante granular, puede constituir una capa drenante y en ocasiones se omite.

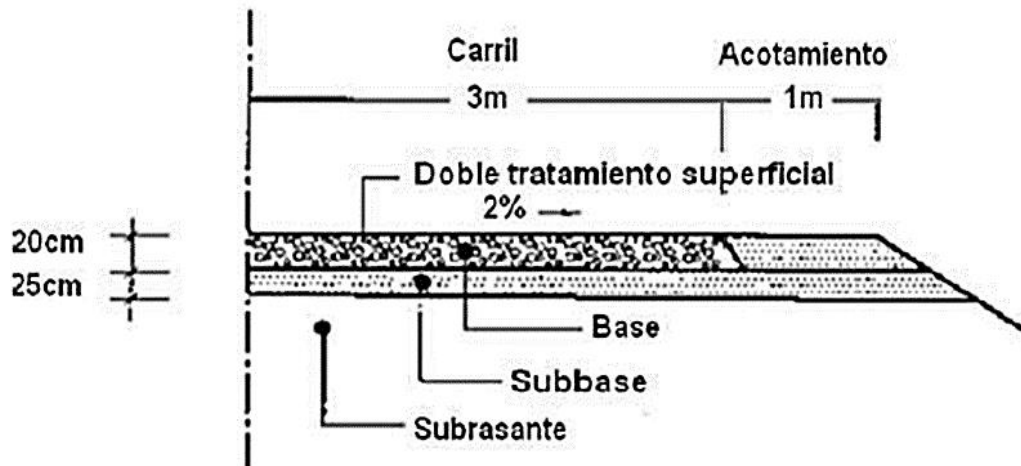
### **2.1.2.6. Subrasante granular**

Es la capa de apoyo de la estructura del pavimento y sus características son indispensables para su diseño. Sus atributos principales deben ser capacidad de soporte y resistencia a la deformación.

### 2.1.2.7. Secciones típicas de pavimentos flexibles

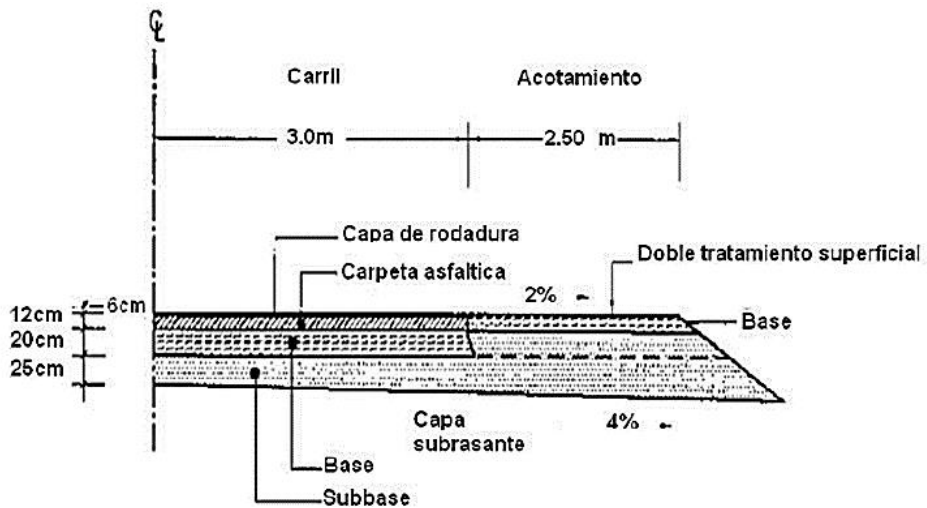
Para pavimentos flexibles se tiene las siguientes secciones típicas detalladas en la Figura 2.2, Figura 2.3 y Figuras 2.4.

**Figura 2. 2.** Estructura de pavimento para tráfico ligero



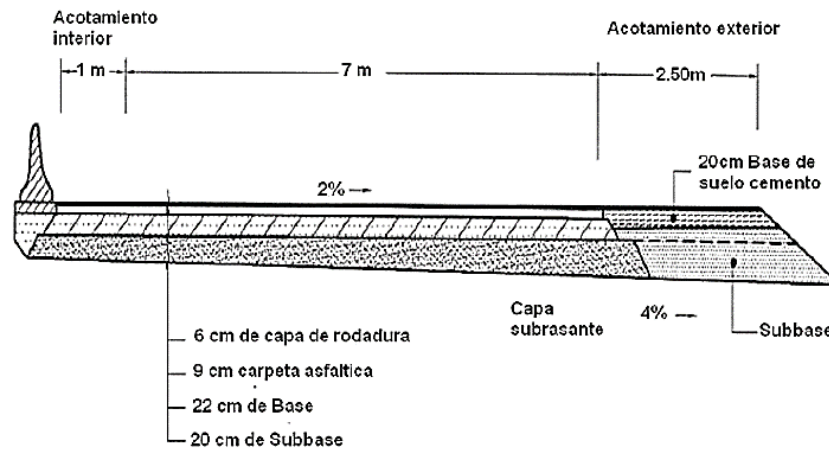
Fuente: Asfaltos modificados, Ángel Sánchez Gonzales

**Figura 2. 3.** Estructura de pavimento para tráfico medio



Fuente: Asfaltos modificados, Ángel Sánchez Gonzales

**Figura 2. 4.** Estructura de pavimento para tráfico pesado



**Fuente:** Asfaltos modificados, Ángel Sánchez Gonzales

### 2.1.3. Mezclas porosas o drenantes

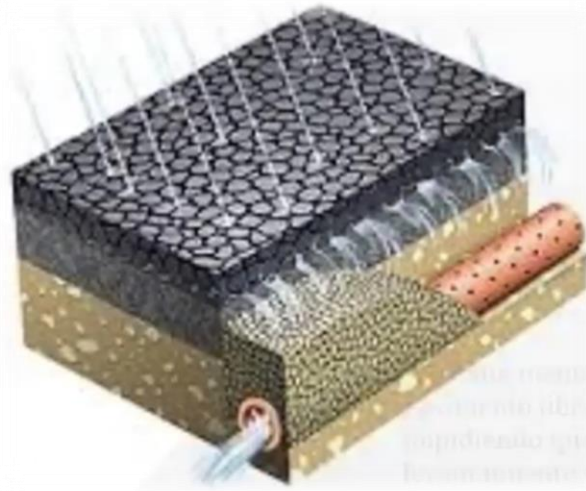
Las mezclas asfálticas drenantes son aquellas mezclas asfálticas cuyo porcentaje de vacíos es lo suficientemente alto para permitir que a través de ellas se filtre el agua con rapidez y pueda ser evacuada hacia las bermas, cunetas u otros elementos de drenaje, evitando así su permanencia en la superficie de la vía (capa de rodadura), incluso bajo precipitaciones intensas y prolongadas.

Para que una mezcla pueda considerarse como drenante debe tener un contenido inicial de vacíos del 16 %, el cual permite una permeabilidad adecuada en este tipo de mezclas. Para que la capacidad de drenaje se mantenga durante un periodo de tiempo razonable, lo aconsejable es partir de una mayor relación de vacíos de la mezcla con el fin de aumentar la permeabilidad.

Las mezclas drenantes pueden construirse tanto en caliente como en frío, empleando como ligantes los betunes puros o las emulsiones asfálticas, modificadas o no. De hecho, las mezclas en frío fabricadas tradicionalmente en España, con un contenido nulo o casi nulo de arena, son drenantes en sentido estricto con porcentajes de vacíos presentes en la mezcla asfáltica del orden del 25 %. Sin embargo, la técnica de las mezclas drenantes ha adquirido un auge espectacular en los últimos años debido al avance de sistemas de diseño e instalación en obra como mezcla bituminosa en caliente.

La presencia de vacíos en una mezcla asfáltica luego de ser compactada es indispensable para que no se produzcan deformaciones plásticas debido al paso de las cargas de tránsito y de las variaciones térmicas. Si el porcentaje de vacíos es inferior al 6 %, las mezclas se denominan mezclas densas o cerradas, y en el caso que este porcentaje de vacíos sea superior al 12 % se las conoce como mezclas abiertas; las mezclas en las cuales este porcentaje es mayor al 18 %, se hablan en este caso de mezclas drenantes o porosas.

**Figura 2. 5.** Mezcla asfáltica porosa



**Fuente:** Mezclas drenantes, <https://youtu.be/CctBWYW1ZXY>

Existe una pequeña diferencia de porcentajes de vacíos aceptado para considerar en las mezclas asfálticas porosas en los países que se ha estudiado este tipo de mezclas. En la Tabla 2.1, se nombran algunas de ellas:

**Tabla 2. 1.** Contenido de vacíos aceptado en algunos países

Porcentaje de vacíos (%)		
País	Mínimo	Máximo
España	16	25
Chile	18	25
Colombia	20	25

**Fuente:** Ingeniería de pavimentos para carreteras” Alfonso Montejo Fonseca (2002)

### 2.1.3.1. Especificación granulométrica para mezclas porosas

El conjunto de agregado grueso, agregado fino y llenante mineral se debe ajustar a la franja granulométrica dada en la normativa de INVIAS, artículo 453 – 13.

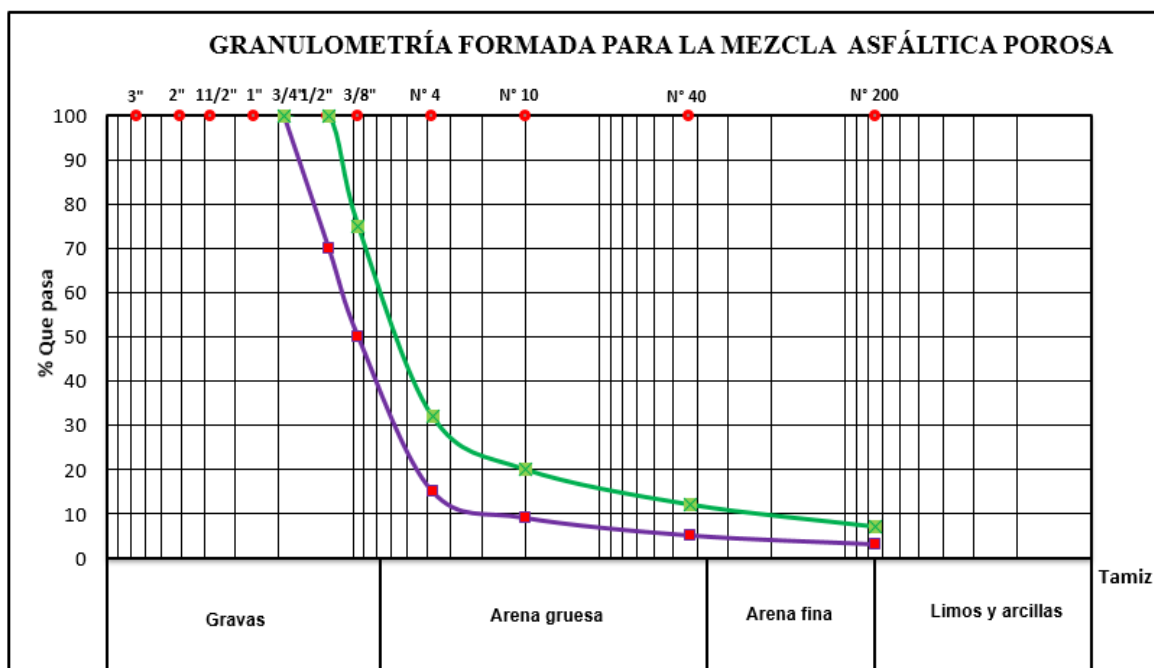
**Tabla 2. 2.** Franja granulométrica para mezcla porosa o drenante

Tipo de mezcla	Tamiz (mm/ U.S. Estándar)						
	19.00	12.50	9.50	4.75	2.00	0.425	0.075
	3/4"	1/2"	3/8"	N° 4	N° 10	N° 40	N° 200
% Pasa							
Única	100	70 – 100	50 – 75	15 – 32	9 – 20	5 – 12	3 – 7
Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo (±)	4 %			3 %			1 %

**Fuente:** INVIAS - Capítulo 4, pavimentos asfálticos Mezcla drenante, Artículo 453 – 13

Para prevenir segregaciones y garantizar los niveles de compactación y resistencia exigidos por la presente especificación, el material que produzca el constructor deberá dar lugar a una curva granulométrica sensiblemente paralela a los límites de la franja, sin saltos bruscos de la parte superior de un tamiz a la inferior del tamiz adyacente y viceversa.

**Figura 2. 6.** Franja granulométrica para mezclas porosas o drenantes



**Fuente:** Elaboración propia

Al lograr que la curva granulométrica se ajuste a este rango se obtiene mezclas con mayor porosidad.

El espesor de la capa de rodadura de las mezclas asfálticas drenantes depende del tamaño máximo del agregado; para agregados con tamaños de 12.50 mm se emplea capas de 4 cm de espesor y para agregados con tamaño máximo de 20 mm, se emplean capas de 5 o 6 cm de espesor.

### **2.1.3.2. Ventajas y desventajas de las mezclas porosas**

#### **Ventajas**

#### **Reducción del agua proyectada por el paso de vehículos**

Estas mezclas, al permitir mantener la superficie del pavimento libre de agua cuando está lloviendo, impiden que se produzca el levantamiento (“splash”) y pulverización (“spray”) del agua al paso de los vehículos mejorando notablemente la visibilidad del usuario.

**Figura 2. 7.** Proyecciones de agua



**Fuente:** Diseño de mezcla drenante con asfalto modificado disponible en el salvador

#### **Eliminación del hidropneumático**

Uno de los mayores riesgos cuando se conduce con lluvia es el hidropneumático, esto es, la capa de agua que se forma entre el neumático y el pavimento que rompe el contacto entre ambos, el neumático “flota en el agua” de modo que el conductor pierde el control de su vehículo, la evacuación rápida del agua de la superficie del camino a través de la mezcla drenante impide que se produzca este fenómeno.



**Figura 2. 8.** Hidroplaneo



Fuente: Meristation.as.com

### **Resistencia al deslizamiento con pavimento mojado**

Aun cuando no exista el hidroplaneo, la lluvia puede reducir considerablemente la resistencia al deslizamiento de la superficie del camino.

Los asfaltos porosos pueden contrarrestar este efecto permitiendo, debido a la macrotextura, que exista rozamiento entre el neumático y la superficie de rodadura, de modo que el vehículo realice los movimientos que desea el conductor logrando así una mayor seguridad (menores distancias de frenado).

**Figura 2. 9.** Macrotextura de pavimento



Fuente: Diseño de mezcla drenante con asfalto modificado disponible en El Salvador

### **Menor deslumbramiento por los faros de los vehículos**

Los conductores que circulan en dirección contraria durante la noche, se ven enfrentados al deslumbramiento debido a la reflexión de la luz, en los pavimentos mojados

tradicionales (superficie lisa); en cambio, los pavimentos de textura rugosa dispersan la luz y por lo tanto reducen el problema de deslumbramiento permitiendo al conductor ver mejor la señalización horizontal.

### **Pavimentos de rodadura cómoda y silenciosa**

Las mezclas drenantes tienen la capacidad de absorber los ruidos provocados principalmente por el contacto que se produce entre el neumático y el pavimento cuando el vehículo está en movimiento.

Los huecos interconectados permiten el paso de aire, atenuando los efectos sonoros. Tanto el conductor, como el entorno, se ven favorecidos por esta reducción.

### **Desventajas**

#### **Posible disminución de la vida útil**

Al haber más huecos, las partículas se encuentran mayormente expuestas (en comparación con las mezclas densas) a la intemperización, lo que puede envejecer más rápidamente el asfalto provocando una pérdida en las propiedades adhesivas de este y por ende entre las partículas de la mezcla; sin embargo, utilizando asfaltos especiales (asfaltos modificados) el problema se minimiza en su mayor parte.

#### **Pérdida de porosidad en el tiempo**

Los huecos se van colmatando con el paso del tiempo por la acumulación de polvo y otros agentes contaminantes como arena, materia orgánica etc., lo que hace que el mantenimiento de las propiedades drenantes del pavimento exija una adecuada conservación del mismo mediante la inspección periódica varias veces durante los primeros meses después de su construcción, y posteriormente como mínimo una vez al año ya que de esto depende la vida útil del mismo, que con un correcto mantenimiento, según autores como Shackel, puede llegar a los 20 años.

### **2.1.4. Características de los materiales a utilizar**

#### **2.1.4.1. Características principales de los agregados pétreos para pavimentos**

Un agregado pétreo es un material mineral duro e inerte, usado en forma de partículas gradadas o fragmentos, como parte de un pavimento flexible.

Los agregados se usan tanto en las capas de base granular como para la elaboración de la mezcla asfáltica. El agregado constituye entre el 90 y 95 % en peso y entre el 75 y 85 % en volumen en la mayoría de las estructuras de pavimento. Esto hace que la calidad del agregado usado sea un factor determinante en el comportamiento del pavimento.

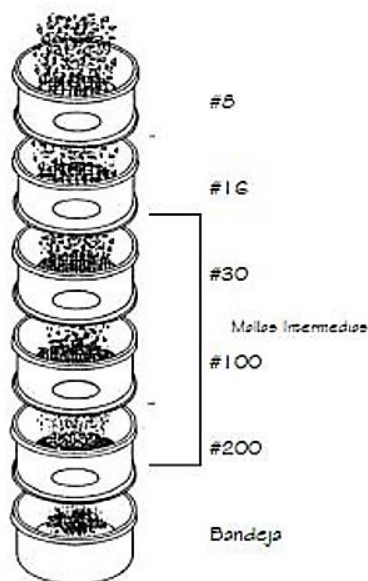
Los agregados pueden ser naturales o procesados. De acuerdo con su tamaño, se dividen en gravas, arenas y relleno mineral (llenante mineral o filler). Los materiales pueden ser producidos en canteras abiertas o tomados de la ribera de los ríos (cantera de río). En este último caso son agregados pétreos aluviales.

Los agregados procesados son aquellos que han sido triturados y tamizados antes de ser usados. La roca se tritura para volver angular la forma de la partícula y para mejorar la distribución (gradación) de los tamaños de las partículas.

### Granulometría

Distribución porcentual en masa de los distintos tamaños de partículas que constituyen un árido. Todas las especificaciones de mezcla asfáltica requieren que las partículas de agregado estén dentro de un cierto margen de tamaños y que cada tamaño de partículas, esté presente en ciertas proporciones mediante el cribado de los agregados.

**Figura 2. 10.** Gradación de los agregados



**Fuente:** Aplicación del método Marshall y granulometría superpave

### **Tamaño máximo absoluto (Da)**

Corresponde a la abertura del menor tamiz de la serie establecida, que deja pasar el 100 % de la masa del árido.

### **Tamaño máximo nominal (Dn)**

Corresponde a la abertura del tamiz inmediatamente menor al tamaño máximo absoluto, cuando por dicho tamiz pasa el 90 % o más de la masa del árido. Cuando pasa menos del 90 % el tamaño máximo nominal se considera igual al tamaño máximo absoluto.

### **Llenante mineral**

Podrá provenir de los procesos de trituración y clasificación de los agregados pétreos o podrá ser de aporte como producto comercial, generalmente cal hidratada o cemento hidráulico. El filler como aporte en la mezcla asfáltica, no debe exceder del dos por ciento (2 %) de la masa de la mezcla.

#### **2.1.4.2. El asfalto**

Los asfaltos son una mezcla compleja de hidrocarburos de peso molecular elevado, que se presentan en forma de cuerpo viscoso más o menos elástico, no cristalino y de color negro. Este material se puede encontrar en la naturaleza de yacimientos naturales o puede ser obtenido como subproducto de la destilación de determinados crudos de petróleo.

El asfalto usado en pavimentación, generalmente llamado cemento asfáltico, es un material viscoso (espeso) y pegajoso, el cual posee unas características muy específicas que lo hacen ideal para los trabajos de pavimentación, principalmente la cohesión y la adhesión con materiales granulares.

El asfalto tiene una consistencia sólida, al calentarlo se ablanda y se vuelve líquido, lo que le permite recubrir los agregados durante el proceso de fabricación de la mezcla asfáltica en caliente. El cemento asfáltico es un excelente material impermeabilizante y no es afectado por los ácidos, los álcalis (bases) o las sales. Esto significa que un pavimento de concreto asfáltico construido adecuadamente es impermeable y resistente a muchos tipos de daño químico.

El asfalto cambia su comportamiento dependiendo de la temperatura y el tiempo de aplicación de la carga. Es más duro a bajas temperaturas y más blando a altas, por esto, se debe seleccionar el tipo de asfalto más conveniente dependiendo del clima del sitio de colocación.

Las propiedades físicas del asfalto, de mayor importancia para el diseño, construcción, y mantenimiento de carreteras son: adhesión, cohesión, susceptibilidad a la temperatura y durabilidad.

### **Adhesión y cohesión**

Adhesión es la capacidad del asfalto para adherirse al agregado, en la mezcla de pavimentación.

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

El ligante bituminoso debe ser capaz de envolver a los áridos, dar cohesión a la mezcla y resistir la acción de desmenuamiento del agua, tal efecto produce una separación del ligante con el árido disminuyendo así la cohesión de la mezcla.

**Figura 2. 11.** Adhesión y cohesión



**Fuente:** Diseño de mezcla asfáltica semicaliente drenante en el salvador

### 2.1.4.3. Caucho

#### Polímero de llanta triturada

Al momento de hacer la mezcla asfáltica con el agente modificador que es la llanta triturada este polímero mejora la flexibilidad y resistencia a la tensión de la mezcla, reduciendo la aparición de grietas por fatiga a cambios de temperatura, se utiliza para mezclas asfálticas de granulometría abierta y tratamientos superficiales.

Los cauchos naturales y los sintéticos como SBS y SBR, son la materia prima que compone las llantas que a su vez también hacen parte de estas, los aditivos que componen estas llantas trituradas son aceites, negro de humo, resinas fenólicas, sulfuro y ácidos grasos; el mezclado de la llanta triturada se lo puede incorporar por vía húmeda, como también por vía seca.

La producción de caucho en pedazos o en polvo es para incrementar el aprovechamiento, e incentivar la incorporación de este polímero a la pavimentación de carreteras. Este agregado puede duplicar la vida útil por sus propiedades de elasticidad ante las variaciones de temperatura, reduce el ruido de los vehículos que transitan en la vía y disminuye el almacenamiento de llantas usadas.

Para el desarrollo de esta investigación, se utilizó el grano de caucho, como el que se muestra en la Imagen 2.1.

**Imagen 2. 1.** Grano de caucho reciclado de llantas



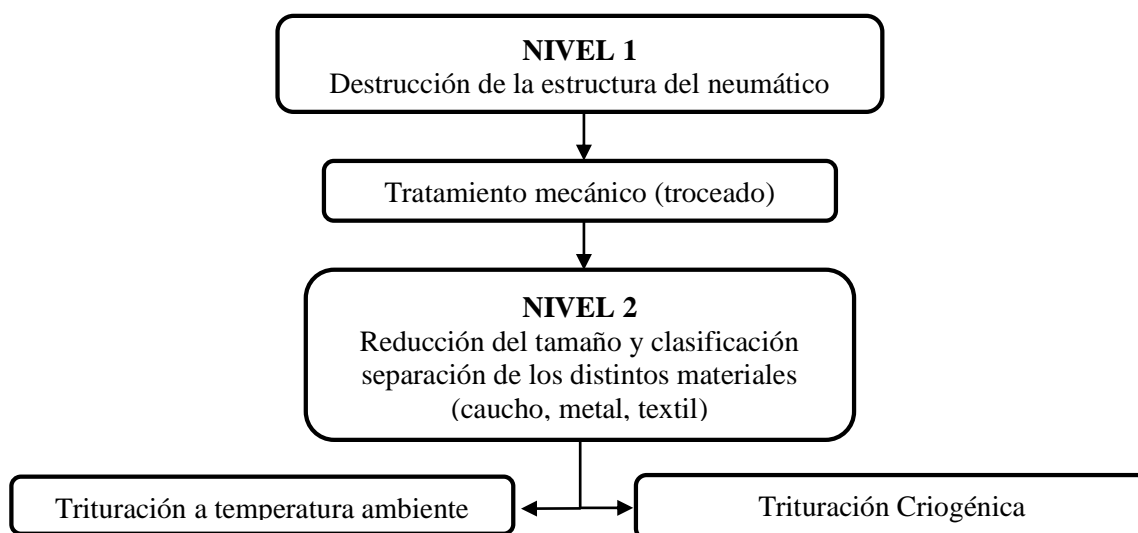
**Fuente:** Elaboración propia

### 2.1.5. Proceso metodológico para la fabricación del polvo de caucho reciclado en masa

La utilización en mezclas asfálticas en caliente, precisa que el caucho reciclado esté en forma de polvo, un material constituido por partículas finas de caucho natural y sintético vulcanizado, de tamaños inferiores a 2.3 mm, obtenido triturando los neumáticos fuera de uso hasta el tamaño deseado y separando los metales, tejidos (fibras textiles) y otras impurezas que puedan incorporar.

Las técnicas más utilizadas son la trituración mecánica a temperatura ambiente y la trituración criogénica a baja temperatura; se realizan en plantas de reciclaje de neumáticos desechados, especialmente diseñadas para este propósito.

**Esquema 2. 1.** Etapas para la obtención del polvo de caucho



**Fuente:** Confección y seguimiento de tramos de prueba de mezclas asfálticas con incorporación de polvo de caucho nacional de neumáticos fuera de uso (NFU) mediante vía seca. Nicole

Michelle Navarro Dupré

#### 2.1.5.1. Tratamiento mecánico previo (troceado)

Sea cual sea el método escogido para obtener polvo de caucho, previamente los neumáticos enteros deben pasar por un proceso de trituración mecánica para la disminución de su tamaño a trozos irregulares relativamente grandes de tamaños menores a 300 mm.

**Figura 2. 12.** Trituración mecánica por acción de cuchillas



**Fuente:** Confección y seguimiento de tramos de prueba de mezclas asfálticas con incorporación de polvo de caucho nacional de neumáticos fuera de uso (NFU) mediante vía seca. Nicole Michelle Navarro Dupré

En general, el troceado del neumático se realiza a temperatura ambiente a través de trituradoras formadas por dos o más ejes paralelos de cuchillas rotatorias, que giran a distintas velocidades para favorecer la incorporación del neumático. Las cuchillas de gran espesor, tienen en sus bordes unos salientes en forma de garfio que ayudan a la incorporación del neumático. La separación de los ejes define el tamaño de los trozos conseguidos, pudiendo realimentar los más gruesos para obtener tamaños inferiores.

#### **2.1.5.2. Trituración ambiental**

La trituración ambiental es un proceso netamente mecánico, donde los trozos de neumático son triturados a temperatura ambiente en sucesivas etapas, que dan como resultado partículas de caucho de distintos tamaños.

En líneas generales, las tecnologías de reducción de tamaño consisten en procesos de granulado, molienda y eventualmente pulverización, mediante una serie de granuladores y/o molinos dispuestos en cascada que van desintegrando los trozos de caucho para obtener partículas de caucho hasta el orden de los micrones.

Con el fin de dejar las partículas de caucho libres de material textil y metálico, presentes en altos contenidos, los fragmentos de acero son extraídos mediante electroimanes y las fibras textiles son separadas mediante corrientes de aire y equipos de aspiración.

La granulometría y el tamaño del producto son controlados mediante una serie de tamices ubicados dentro de la máquina, los cuales pueden ser cambiados para variar el producto



final. En general, las partículas de caucho obtenidas se denominan granos, si su tamaño está comprendido entre 1 mm y 10 mm, y polvo, si su tamaño es inferior a 2.3 mm. Finalmente, el caucho en sus distintas granulometrías, se clasifica de acuerdo al uso que se le va a dar.

**Figura 2. 13.** Polvo de caucho de tamaño menor a 2 mm (izq.) y 1 mm (der.)



**Fuente:** Confección y seguimiento de tramos de prueba de mezclas asfálticas con incorporación de polvo de caucho nacional de neumáticos fuera de uso (NFU) mediante vía seca. Nicole

Michelle Navarro Dupré

### **2.1.5.3. Trituración criogénica**

El proceso de trituración criogénica requiere el enfriamiento previo de los trozos de neumático a través del uso de nitrógeno líquido u otros métodos para congelarlos. A temperaturas por debajo de los 200 °C bajo cero, el caucho pierde su elasticidad característica, volviéndose frágil y fácil de desintegrar. Luego para reducir su tamaño y convertirlos en elementos más finos, los trozos congelados pasan por un molino de impacto.

Finalmente el material obtenido se seca, se separa de la fibra textil (por aspiración) y el metal (mediante imanes) y se clasifica según tamaño.

La forma de trituración de los NFU, determina la forma, textura y granulometría de las partículas de caucho y el contenido remanente de contaminantes metálico y textil, las cuales definen las propiedades del polvo de caucho obtenido y por lo tanto influyen en su reacción con el cemento asfáltico. En relación a este aspecto, cabe destacar que para las partículas con gran área superficial, como las conseguidas a través de la trituración ambiental, que tienen forma y textura irregular, la reacción con el ligante se produce en

forma rápida, a diferencia de lo que ocurre con las partículas con baja área superficial obtenidas por la trituración criogénica, dado que al tener forma ovalada y superficies planas, disminuye el nivel de reacción con el asfalto.

Implementar una máquina de reciclaje de neumáticos para hacer polvo o grano de caucho reciclado nos sale alrededor de unos 44,873.40 – 88,366.08 Bolivianos, este precio depende de la calidad de la maquinaria.

### 2.1.6. Técnicas de incorporación en mezclas asfálticas

La incorporación de polvo de caucho proveniente de NFU a una mezcla asfáltica, se puede hacer de dos maneras, denominadas vía húmeda y vía seca. Ambos procedimientos se diferencian, además de la forma de ejecución, en el contenido de polvo de caucho que se utiliza para preparar la mezcla asfáltica. La denominación de los productos resultantes de ambos procesos de incorporación, se muestra en la siguiente tabla.

**Tabla 2. 3.** Terminología asociada al uso de polvo de caucho en mezclas asfálticas

Proceso	Producto	Incorporación de polvo de caucho (%)
Vía húmeda	Asfalto modificado con polvo de caucho o Asfalto-Caucho	5.0 – 26.0 respecto al peso del cemento asfáltico.
Vía seca	Mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho	0.5 – 1.0 respecto al peso del árido o 0.5 – 2.0 respecto al peso del árido, siendo el 2 % un valor no recomendado.

**Fuente:** Confección y seguimiento de tramos de prueba de mezclas asfálticas con incorporación de polvo de caucho nacional de neumáticos fuera de uso (NFU) mediante vía seca. Nicole Michelle Navarro Dupré

### 2.1.7. Métodos de adición de Grano de Caucho Reciclado (GCR) en las mezclas asfálticas

El caucho proveniente de los neumáticos fuera de uso puede ser incorporado mediante dos procesos distintos: vía húmeda y vía seca.

#### 2.1.7.1. Proceso por vía húmeda

Consiste en el mezclado previo del polvo de caucho con el cemento asfáltico en un estanque con agitación a alta temperatura, para su posterior empleo como ligante en la

mezcla asfáltica en caliente. En esta forma, el polvo de caucho actúa como un polímero modificador del cemento asfáltico y el producto obtenido, denominado comúnmente asfalto-caucho, es usado de la misma manera que un cemento asfáltico modificado convencional.

La fabricación de asfalto-caucho consiste en la mezcla de los granos de caucho, usualmente de tamaño máximo 2 mm, con el cemento asfáltico en un estanque con agitación. Generalmente, el porcentaje de adición de caucho es entre 5 - 26 % con respecto al peso del ligante.

Para promover la unión del asfalto y el caucho, es necesario establecer una temperatura y un tiempo de reacción dentro del estanque. Usualmente, la mezcla es formulada a temperaturas entre 180 - 210 °C por 1 a 4 horas.

El procedimiento de fabricación por vía húmeda, puede ser realizado de dos maneras:

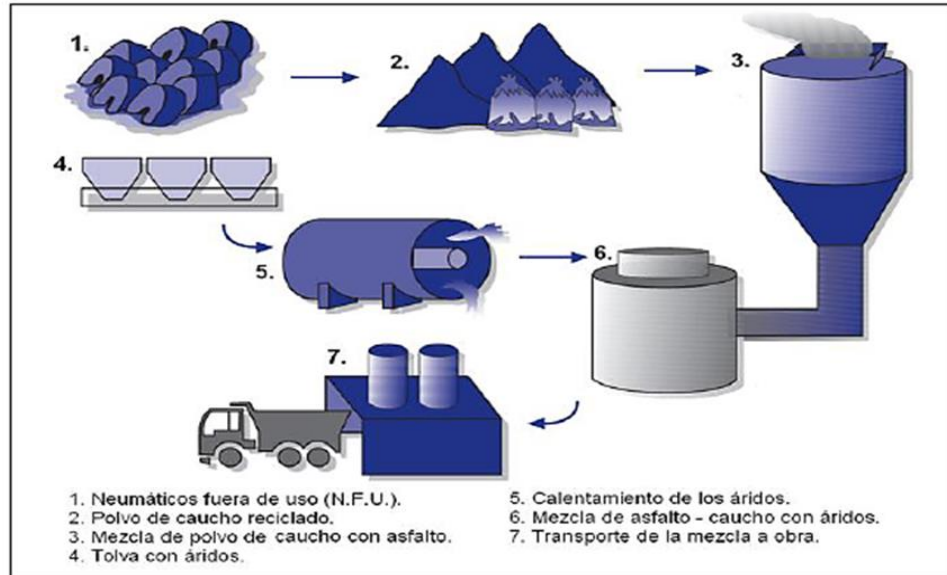
En el primer caso, denominado proceso en refinería, el asfalto-caucho se elabora en la planta productora de asfalto (Asfaltera), desde donde es transportado a la planta asfáltica para ser combinado con los áridos y producir la mezcla asfáltica.

En el segundo caso, denominado “en terreno”, la modificación del asfalto se realiza en la misma planta asfáltica, para luego ser incorporado a los áridos en el proceso de mezclado.

En general, la mezcla de asfalto con polvo de caucho es muy viscosa, lo que dificulta su manipulación de manera estable (sin segregaciones). Para que el asfalto-caucho mantenga su consistencia uniforme, la mezcla debe estar en continua agitación y a alta temperatura, especialmente al ser almacenado y transportado. Esto también permite que se pueda descargar (trasegar) y bombear sin dificultades.

En la siguiente figura, se muestra la fabricación de las mezclas asfálticas mejoradas con caucho a través del proceso húmedo:

**Figura 2. 14.** Proceso por vía húmedo



**Fuente:** Confección y seguimiento de tramos de prueba de mezclas asfálticas con incorporación de polvo de caucho nacional de neumáticos fuera de uso (NFU) mediante vía seca

Una vez terminado el mezclado del asfalto-caucho con los agregados pétreos, el concreto asfáltico obtenido se transporta al sitio de pavimentación y se coloca por medio de una finisher tradicional. Para la compactación, generalmente se utiliza un rodillo liso doble tambor.

El ligante asfáltico modificado con granos de caucho mediante el proceso húmedo también puede ser utilizado como riego. El más común es el llamado SAM (Stress Absorbing Membrane) que evita la reflexión de grietas. Cuando el riego SAM es puesto entre capas es llamado SAMI (Stress Absorbing Membrane Interlayer), este riego de liga es recomendado cuando la mezcla asfalto-caucho se coloca sobre pavimento antiguo de hormigón.

### **Modificación del cemento asfáltico (Digestión)**

Cuando el polvo de caucho se incorpora a un asfalto a elevada temperatura, las partículas de caucho se reblandecen, absorben los componentes más ligeros del asfalto (aceites aromáticos) y se hinchan. Con el hinchamiento disminuye la distancia entre partículas y el ligante se hace más viscoso. Este fenómeno de hinchamiento se suele denominar digestión o maduración. El proceso de digestión, no es del tipo químico, pues las partículas

de caucho no se funden con el asfalto. El proceso se asimila a lo que sucede con una esponja seca y dura al sumergirla en agua, pues a medida que la esponja absorbe el agua, se hincha y ablanda.

En el caso de la vía húmeda, el principal parámetro usado para controlar el proceso de digestión es la viscosidad, que aumenta una vez que se agrega el polvo de caucho al asfalto, es por esta razón que debe ser chequeada a diferentes intervalos de tiempo durante la reacción. Una vez que el asfalto-caucho logra la viscosidad requerida para el proceso de mezclado (trabajabilidad), se incorpora a los áridos en el mezclador de la planta asfáltica. Las características del producto resultante de la mezcla de asfalto y polvo de caucho (grado de modificación del ligante), dependen de las características de ambos componentes; principalmente del tamaño, textura y proporción de las partículas de caucho y el tipo de cemento asfáltico, además de la temperatura y el tiempo de reacción de la mezcla y el grado de agitación mecánica durante este proceso. Las temperaturas elevadas, los largos tiempos de digestión y las partículas más pequeñas de caucho producen interacciones más rápidas.

La viscosidad de la mezcla es el principal parámetro usado para supervisar la reacción, es por esto que debe ser chequeada a diferentes intervalos de tiempo durante el mezclado y el tiempo de reacción, hasta obtener la viscosidad requerida.

#### **2.1.7.2. Proceso por vía seca**

El procedimiento de fabricación de la mezcla asfáltica modificada por vía seca consiste en introducir el polvo de caucho directamente en el mezclador de la planta asfáltica, como un componente más de la mezcla, sin embargo, se requiere mezclar primero éste con el árido para lograr su total reparto y aumentar así su temperatura, antes de añadir el cemento asfáltico.

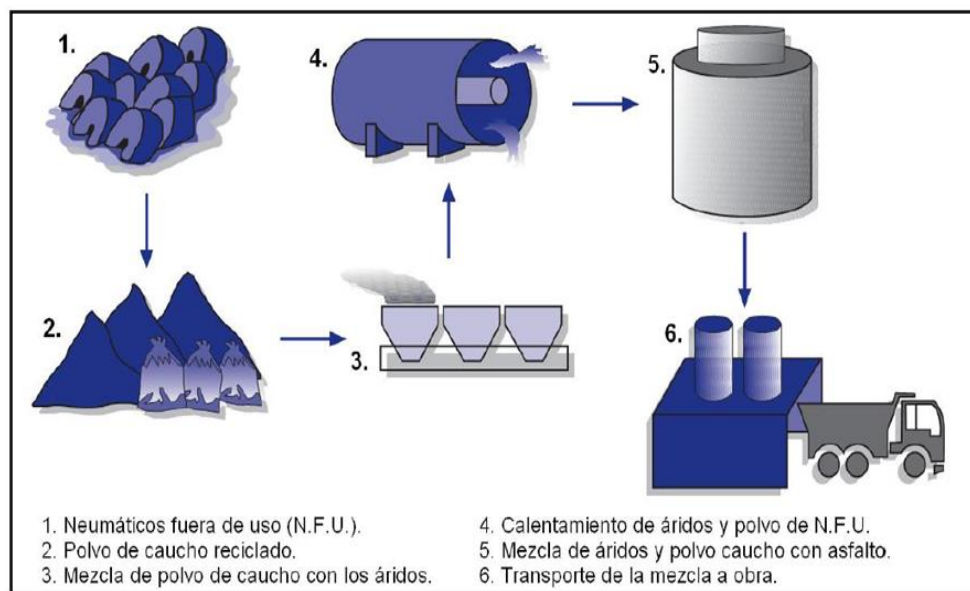
En este proceso, el polvo de caucho actúa en parte como árido, pero sus partículas más finas interactúan con el cemento asfáltico modificando sus propiedades y consiguiendo así mejorar el comportamiento de la mezcla asfáltica. Por eso, luego de mezclar el ligante con los agregados más el caucho, se le debe dar el tiempo a esta mezcla para que suceda el proceso de digestión. Este tiempo en obra, la mayoría de las veces está garantizado con el tiempo que demora el camión entre la planta asfáltica al lugar de colocación del concreto

asfáltico en terreno. En laboratorio, la digestión puede simularse manteniendo la mezcla en horno, a una temperatura en un rango 150 a 170 °C y un tiempo de una a dos horas, previamente a la compactación de la probeta. Durante la digestión, no se producen reacciones importantes entre el caucho y cemento asfáltico debido al corto tiempo de mezclado, donde éste no es suficiente para que se produzca una reacción similar al proceso húmedo, por lo tanto, se asume que el efecto de la reacción caucho-ligante en el proceso seco es menor y, asimismo, tiene un efecto limitado en el comportamiento de la mezcla.

Sin el tiempo de digestión, no podría obtenerse la interacción entre el ligante y el caucho, provocando que éste funcione como un árido elástico de granulometría muy concentrada, lo que por un lado produce la apertura de huecos y por otro, impide la compactación por su componente elástico. Este tiempo de curado de la mezcla es fundamental, ya que en caso de no realizarlo correctamente, no solo no se provoca la modificación del ligante, sino que se obtiene una mezcla de peores propiedades que una tradicional. Sin digestión, se producen riesgos por deterioros prematuros de la mezcla asfáltica en terreno.

En la siguiente figura, se muestra la fabricación de las mezclas asfálticas mejoradas con caucho a través del proceso seco:

**Figura 2. 15.** Proceso por vía seca



**Fuente:** Confección y seguimiento de tramos de prueba de mezclas asfálticas con incorporación de polvo de caucho nacional de neumáticos fuera de uso (NFU) mediante vía seca

A diferencia del proceso húmedo, este método no requiere de un equipo especial de mezclado, solo un sistema de alimentación que proporcione la cantidad adecuada de caucho y que sea suministrada en el momento indicado para que se mezcle con los agregados cuando estos alcancen cierta temperatura y antes que el ligante sea adicionado.

### **Modificación de la mezcla asfáltica por vía seca**

En el método por vía seca, el polvo de caucho incorporado funciona como un sistema de dos componentes dentro de la mezcla asfáltica, en el que las partículas más finas (principalmente las que pasan por el tamiz 0.5mm) interactúan con el asfalto a elevada temperatura y modifican su reología mediante un proceso similar al de vía húmeda, y por otro lado, las partículas más gruesas, como su área específica es reducida y el periodo de interacción con el asfalto es limitado, la digestión con el ligante se desarrolla solo superficialmente, ya que no hay tiempo suficiente para que la digestión se desarrolle en toda su masa. De esta manera, las partículas gruesas de caucho se comportan como un árido elastomérico dentro del esqueleto pétreo y se crea una interface asfalto-caucho que cohesiona ambos materiales.

De igual manera que en el proceso por vía húmeda, la calidad de la mezcla asfáltica resultante depende del proceso de digestión que prolifera desde la superficie de la partícula de caucho hacia su interior, que será más rápida y efectiva mientras más fino sea el polvo de caucho, menor su proporción dentro de la mezcla asfáltica, y cuanto más elevada sea la temperatura de la mezcla y el tiempo que se mantenga ésta caliente durante el proceso de fabricación y puesta en obra.

Por ello es preciso, durante el diseño de la mezcla asfáltica modificada por vía seca, estimar cuáles serán la temperatura y el tiempo de digestión mínimos para alcanzar el grado de digestión suficiente. Esto se puede hacer a través de ensayos en Laboratorio (limitando la resistencia al efecto del agua). El tiempo de curado de la mezcla es fundamental, ya que en caso de no realizarlo correctamente, no solo no se provoca la modificación del ligante, sino que se obtiene una mezcla de peores propiedades que una tradicional (se incrementan significativamente el contenido de vacíos de aire y el contenido de vacíos en los agregados).

Los granos de caucho son mezclados con los áridos, anteriormente calentados. El cemento asfáltico es el mismo que se usa para mezclas convencionales; sin embargo, las temperaturas de mezclado son más altas, por lo general entre 160° y 190° C, al igual que las de compactación, que están entre 150° y 160° C.

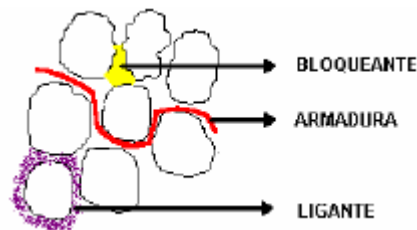
Para que el caucho se incorpore a la mezcla asfáltica porosa, la metodología que se utilizará en la investigación será de vía seca, debido a que el proyecto se enfoca al mejoramiento de la mezcla asfáltica como un todo y no al cemento asfáltico en particular.

### **2.1.8. Proceso químico - mecánico de la mezcla asfáltica porosa al incorporar el caucho reciclado**

Adicionar polímeros como el caucho a la mezcla asfáltica porosa, se hace con el fin de proporcionar elasticidad, aumentar la resistencia, es decir mejorar sus propiedades mecánicas que den resultados satisfactorios desde el punto de vista económico y de servicio.

La adición de polímeros al asfalto puede crear tres efectos, los cuales dependen de la naturaleza química, de la talla y de las características físicas del material.

**Figura 2. 16.** Efecto del aditivo



**Fuente:** Mejora de una mezcla asfáltica drenante con adición de caucho e icopor, Karina Liset Rodríguez Gallego

Efecto sobre el ligante: La disolución verdadera o la dispersión del estado fundido del material plástico en la mezcla, hace aumentar la viscosidad del ligante.

Efecto de la estructura: Los granos de caucho crean granulares uniones.

Efecto bloqueante: Las granos de caucho pueden llenar los vacíos del esqueleto granular a la hora de compactar.

Estos tres efectos, solos o en conjunto producen los siguientes resultados:



Susceptibilidad térmica que es uno de los inconvenientes importantes en los materiales bituminosos, donde este aspecto lo mejora.

La compactación aumenta.

La resistencia de la capa aumenta.

El consumo de energía por la fabricación de la mezcla bituminosa disminuye.

Las características físicas de los asfaltos modificados mejoran substancialmente la resistencia y flexibilidad de los pavimentos para que estos sean más resistentes al ahuellamiento y agrietamiento por fatiga y por temperatura.

### **Ventajas técnicas al adicionar el caucho**

La adición de polvo de caucho a un asfalto (vía húmeda) o a una mezcla asfáltica (vía seca) tiene dos efectos principales:

El polvo de caucho actúa como espesante, aumentando la viscosidad del ligante. En las mezclas asfálticas esto permite envolver los áridos con películas más gruesas de asfalto sin que se produzcan escurrimientos o exudaciones.

La adición de polvo de caucho modifica la reología de los asfaltos, de manera que aumentan su elasticidad y resiliencia a temperaturas elevadas y disminuye la susceptibilidad térmica.

El efecto conjunto de estas modificaciones permite conseguir las siguientes ventajas técnicas en las mezclas asfálticas, con la consecuente reducción de costos de mantenimiento y de interrupción del tráfico por reparaciones en el pavimento:

Mayor resistencia a la deformación plástica acumulada (ahuellamiento) que las mezclas que utilizan cemento asfáltico tradicional, por su elevada viscosidad y resiliencia (ligante más elástico y viscoso a las temperaturas altas de servicio).

Menor susceptibilidad térmica que las mezclas asfálticas fabricadas con cemento asfáltico tradicional.

Mayor resistencia al agrietamiento, tanto por fatiga como por reflexión de grietas de las capas inferiores, que las mezclas fabricadas con cemento asfáltico tradicional, debido a los mayores contenidos de ligante que permiten estas técnicas.

Mayor resistencia al envejecimiento y a la oxidación que las mezclas convencionales, por el potencial de utilizar mayores dotaciones de ligante y por la presencia de los antioxidantes del caucho de neumáticos.

Otra ventaja adicional, desde la óptica de la seguridad vial, es que mantienen durante más tiempo el contraste con las marcas viales debido a que permiten introducir más asfalto y dura más el color negro de la superficie.

En la modificación de las mezclas asfálticas con polvo de caucho por vía seca se pueden conseguir ventajas semejantes, aunque en menor grado, que con los asfaltos modificados con polvo de caucho por vía húmeda. No obstante, las mezclas fabricadas por vía seca necesitan procedimientos específicos de fabricación y condiciones controladas de ejecución, por lo que precisan empresas adiestradas y de un control de calidad riguroso. Su interés radica en las siguientes ventajas adicionales:

Se obtienen mezclas asfálticas más baratas que con los asfaltos modificados por vía húmeda.

La tecnología se hace accesible a las empresas fabricantes de mezclas asfálticas y no solo a las que fabrican asfaltos modificados. No requiere de un equipo especial de mezclado, solo un sistema de alimentación que proporcione la cantidad adecuada de caucho y que sea suministrada en el momento indicado (como un filler de aportación), antes que el ligante sea adicionado.

### **Ventajas ambientales**

Las principales ventajas ambientales que se derivan del empleo de polvo de neumático en los materiales asfálticos por vía húmeda o vía seca son las siguientes:

Se reciclan y reduce el volumen de neumáticos fuera de uso depositados en vertederos y en lugares desconocidos o no autorizados. El empleo de residuos permite a su vez ahorros en recursos naturales.

Su empleo en mezclas asfálticas permite reducir el nivel sonoro de rodadura. Las reducciones observadas son del orden de 3 a 4 dB respecto a las mezclas asfálticas convencionales. Las mezclas asfálticas fabricadas con polvo de caucho pueden reciclarse en el futuro, cuando se agote su capacidad de servicio.

### **2.1.9. Especificaciones generales para el diseño de las mezclas asfálticas porosas**

Las mezclas drenantes se diseñarán a partir de probetas cilíndricas tipo Marshall, confeccionadas como se describe en la norma de ensayo INV E - 760. Las temperaturas de mezcla y compactación dependerán de las características del ligante bituminoso que se emplee y se definirán en cada caso particular durante la etapa de diseño.

La temperatura de elaboración de la mezcla deberá ser tal, que se obtenga una adecuada envuelta del agregado, sin que se produzcan escurrimientos del ligante.

El contenido óptimo de material bituminoso en la mezcla se deberá elegir de manera que se cumplan los siguientes criterios:

Los vacíos con aire de la mezcla compactada, medidos como se indica en la norma de ensayo INV E-736, no deberán ser inferiores a veinte por ciento (20 %), ni mayores de veinticinco por ciento (25 %).

Para asegurar que los vacíos con aire están debidamente interconectados, se realizará una prueba de permeabilidad. La capacidad de drenaje se mide colocando cien mililitros (100 ml) de agua en un molde conteniendo la probeta pre humedecida. El tiempo que tarde el agua en atravesar la muestra no deberá exceder de quince segundos (15 seg).

Las pérdidas por desgaste a veinticinco grados Celsius (25 °C), determinadas de acuerdo con el procedimiento descrito en la norma INV E-760, no deberán ser superiores a veinticinco por ciento (25 %).

La dosificación del material bituminoso no podrá ser inferior a cuatro y medio por ciento (4.50 %), respecto de la masa seca de los agregados, incluido el llenante mineral.

Se deberá comprobar, además, la adhesividad entre el agregado y el ligante, caracterizando la mezcla en presencia de agua. Al efecto, la pérdida por abrasión en el ensayo Cántabro, según la norma de ensayo INV E-760, tras ser sometidas las probetas a un proceso de inmersión en agua durante veinticuatro horas (24 hr) a sesenta grados Celsius (60 °C), no podrá exceder de cuarenta por ciento (40 %). Si se supera este valor, se deberá mejorar la adhesividad mediante un aditivo mejorador de adherencia apropiado.

La determinación de la estabilidad y flujo de las briquetas de la mezcla asfáltica porosa, se realiza por medio del uso de la prensa Marshall, la cual debe seguir los siguientes criterios para el diseño:

**Tabla 2. 4.** Criterios específicos para el ensayo Marshall

Característica	Norma ensayo INV	Mezclas densas, semidensas y gruesas			Mezcla de alto módulo
		Categoría de tránsito			
		NT1	NT2	NT3	
Compactación (golpes/cara)	E – 748 (E – 800)	50	75	75	75
Estabilidad mínima kg (N)		500 (5000)	750 (7500)	900 (9000)	1500 (15000)
Flujo (mm) (Nota 2)		2.00 a 4.00	2.00 a 4.00 (3.00 a 6.00)	2.00 a 3.50 (3.00 a 5.30)	2.00 a 3.00
Relación estabilidad / flujo (kN/mm)		2.00 a 4.00	3.00 a 5.00 (4.50 a 7.50)	3.00 a 6.00 (4.50 a 9.00)	-

Nota 2: Para mezclas elaboradas con asfaltos modificados con polímeros, se podrá aceptar un valor de flujo mayor (hasta 5.00 mm) .En cualquier caso, se deberá cumplir el requisito establecido en la respectiva columna de la tabla para la relación estabilidad/flujo.

**Fuente:** INVIAS – Capítulo 4, Pavimentos asfálticos, Art. 450

### **Estabilidad**

Es la capacidad para resistir la deformación bajo las cargas del tránsito. Un pavimento inestable presenta ahuellamientos, corrugaciones y otras señas que indican cambios en la mezcla.

### **Flujo**

Es el movimiento total o deformación, en unidades de mm (1/100) que ocurre en el espécimen entre estar sin carga y el punto máximo de carga durante la prueba de estabilidad.

### **Densidad**

Está definida como su peso unitario, es decir, el peso de un volumen específico de mezcla compactada. La densidad es una característica importante para obtener un rendimiento duradero. Si la densidad es baja la cantidad de vacíos son mayores.

## Porosidad

Es la habilidad que tienen las mezclas asfálticas drenantes para transportar los fluidos.

### 2.1.10. Especificaciones generales para la caracterización de los materiales

#### 2.1.10.1. Caracterización del cemento asfáltico

Los ensayos más utilizados sobre el cemento asfáltico tipo son:

Ensayo de penetración.

Ensayo de punto de ablandamiento (Método de anillo y bola).

Viscosidad.

Punto de ignición y de llama mediante la copa abierta de Cleveland.

Ensayo de ductilidad.

Peso específico.

Los cuales deben seguir las siguientes especificaciones:

**Tabla 2. 5.** Especificaciones para el cemento asfáltico

Característica	Norma ensayo INV	Grado de penetración					
		40 – 50		60 – 70		80 – 100	
		Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
<b>Asfalto original</b>							
Penetración (25 °C, 100 gr5 5 seg), 0.10 mm	E – 706	40	50	60	70	80	100
Punto de ablandamiento , °C	E – 712	52	58	48	54	45	52
Índice de penetración	E – 724	- 1.20	+ 0.60	- 1.20	+ 0.60	- 1.20	+ 0.60
Viscosidad absoluta (60 °C), P	E – 716 o E – 717	200	-	150	-	100	-
		0	-	0	-	0	-
Ductilidad (25 °C, 5 cm/min), cm	E – 702	80	-	100	-	100	-
Solubilidad en tricloroetileno, %	E – 713	99	-	99	-	99	-
Contenido de agua, %	E – 704	-	0.20	-	0.20	-	0.20
Punto de inflamación mediante copa abierta de Cleveland, °C	E – 709	240	-	230	-	230	-
Contenido de parafinas, %	E – 718	-	3	-	3	-	3

**Fuente:** INVIAS – Capítulo 4, Pavimentos asfálticos, Art. 410

### 2.1.10.2. Caracterización de los agregados pétreos

**Tabla 2. 6.** Especificaciones para los agregados pétreos

Característica	Norma de ensayo INV	Nivel de tránsito
		NT2 Y NT3
<b>Dureza, agregado grueso (O)</b>		
Desgaste en la máquina de los ángeles, máximo (%) - 500 revoluciones - 100 revoluciones	E – 218	25 5
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%)	E – 238	20
Resistencia mecánica por el método del 10 % de finos - Valor en seco, mínimo (kN) - Relación húmedo/seco, mínimo (%)	E – 224	110 75
Coefficiente de pulimiento acelerado, mínimo	E – 232	0.50
<b>Durabilidad (O)</b>		
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfato de sodio, máximo (%)	E – 220	18
<b>Limpieza, agregado grueso (F)</b>		
Impurezas en agregado grueso, máximo (%)	E – 237	0.50
<b>Limpieza, gradación combinada (F)</b>		
Índice de plasticidad, máximo (%)	E – 125 y E – 126	N.P
Equivalente de arena, mínimo (%) (Nota1)	E – 133	50
Valor de azul de metileno, máximo (Nota 2)	E – 235	10
<b>Geometría de las partículas, agregado grueso (O)</b>		
Partículas planas y alargadas, relación 5:1, máximo (%)	E – 240	10
Caras fracturadas, mínimo (%): dos caras	E – 227	100
<b>Adhesividad (O)</b>		
Agregado grueso: Cubrimiento de los agregados con materiales asfálticos en presencia del agua hirviendo, mínimo (%)	E – 757	Reportar
Agregado fino: adhesividad de los ligantes bituminosos a los agregados finos (método Riedel-Weber), índice mínimo	E – 774	Reportar

**Fuente:** INVIAS - Capítulo 4, pavimentos asfálticos Mezcla drenante, Artículo 453 – 13

Los ensayos más utilizados sobre el cemento asfáltico tipo son:

Granulometría del agregado grueso y fino.

Índice de alargamiento de agregados.

Índice de aplanamiento de agregados.

Porcentaje de caras fracturadas en los agregados.

Abrasión de agregados grueso máquina de los ángeles.

Peso específico del agregado fino.

Peso específico del agregado grueso.

Equivalente de arena.

Los cuales deben seguir las especificaciones de la Tabla 2.6.

## **2.2. MARCO REFERENCIAL**

**Fredy Alberto Reyes Lizcano, PhD, profesor investigador en pavimentos, Director especialización en geotecnia vial y pavimentos Universidad Javeriana. (Mejoramiento de las mezclas drenantes utilizando como ligante el asfalto-caucho)**

En general las mezclas asfálticas porosas con la incorporación de polímeros (elastómeros) en las capas asfálticas han permitido mejorar sus propiedades mecánicas y han traído resultados satisfactorios desde el punto de vista económico. Es por eso que el empleo de las capas asfálticas con ligantes modificados a partir de polímeros (PVC, polietileno, poliésteres, cauchos naturales) representa una solución ante estos problemas ya que disminuyen la deformabilidad y crean una mayor resistencia a las solicitudes del tránsito.

**Karina Liset Rodríguez Gallego: (Mejora de una mezcla asfáltica drenante con adición de caucho e icopor)**

Esta técnica consiste en la adición de polímeros a las mezclas asfálticas convencionales con el fin de mejorar sus características mecánicas, es decir, su resistencia a las deformaciones por factores climatológicos y del tránsito, busca reducir las deformaciones permanentes (ahuellamiento) de las mezclas que componen las capas de rodadura, aumentando la rigidez, además disminuir el fisuramiento por efecto térmico y por fatiga, aumentando su elasticidad.

**German Juyar Mora, Gabriel Perez Cely: (Comparación de mezclas asfálticas drenantes fabricadas con asfalto modificado y sin modificar)**

Las mezclas asfálticas porosas son aquellas mezclas asfálticas cuyo porcentaje de vacíos es lo suficientemente alto para permitir que a través de ellas se filtre el agua con rapidez y pueda ser evacuada hacia las bermas, cunetas u otros elementos de drenaje, evitando así

su permanencia en la superficie de la vía (capa de rodadura), incluso bajo precipitaciones intensas y prolongadas.

En cuanto a las investigaciones realizadas, para que una mezcla asfáltica pueda ser considerada como drenante, esta debe tener un contenido inicial de vacíos del 16 %, el cual permite una permeabilidad adecuada en este tipo de mezclas.

Para que la capacidad de drenaje se mantenga durante un periodo de tiempo razonable, lo aconsejable es partir de una mayor relación de vacíos de la mezcla con el fin de aumentar la permeabilidad.

### 2.3. MARCO NORMATIVO

Todos los ensayos requeridos en la investigación se realizarán de acuerdo a la normatividad Colombiana del Instituto Nacional de Vías INVIAS (2013), como se muestra en la Tabla 2.6.

**Tabla 2. 7.** Normas aplicadas para la caracterización del agregado, cemento asfáltico y mezclas asfálticas

Ensayo	Descripción
Caracterización del agregado	Índice de alargamiento de agregados
	Índice de aplanamiento de agregados
	Porcentaje de caras fracturadas en los agregados
	Abrasión de agregados grueso máquina de los ángeles
	Peso específico del agregado fino
	Peso específico del agregado grueso
	Equivalente de arena
Caracterización del cemento asfáltico	Penetración
	Punto de inflamación
	Punto de ablandamiento
	Ductilidad
	Peso específico
Mezclas asfálticas	Porcentaje de vacíos de aire en mezclas asfálticas compactadas densas y abiertas INV E – 736.
	Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall INV E – 748.
	Gravedad específica bulk (Densidad) INV E – 736.

**Fuente:** Elaboración Propia



## **2.4. ANÁLISIS Y TENDENCIA**

La presente investigación muestra un marco conceptual donde se indica los conceptos de pavimento flexible, mezclas porosas, ventajas y desventajas, métodos de adición del grano de caucho reciclado, características de los materiales como los conceptos sobre los agregados, cemento asfáltico y caucho que son materiales a utilizar para las mezclas asfálticas porosas. También las especificaciones para el diseño de las mezclas asfálticas porosas, especificaciones para la caracterización de los materiales; tanto para el cemento asfáltico como para el agregado pétreo; posteriormente se indica un marco referencial donde se toma en cuenta para profundizar la investigación y un marco normativo en el que se basará la investigación para la realización de los ensayos característicos en laboratorio.

Como se puede observar, toda la teoría estudiada tiene la tendencia de estudiar las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica porosa incorporando un porcentaje de grano de caucho reciclado. También en la presente investigación se considerará la realización de un estudio del efecto de la porosidad en la estabilidad Marshall con la incorporación del grano de caucho reciclado de llanta a la mezcla asfáltica porosa.

Como se sabe los cauchos son desechos no biodegradables que tienen un gran impacto ambiental si no son bien tratados y reutilizados, por ello nace la idea de implementar a la mezcla asfáltica porosa un porcentaje de caucho óptimo para así obtener nuevas propiedades mecánicas en las mezclas asfálticas porosas.

**CAPÍTULO III**  
**RELEVAMIENTO DE INFORMACIÓN**

## **CAPÍTULO III**

### **RELEVAMIENTO DE INFORMACIÓN**

#### **3.1. INTRODUCCIÓN**

Para el desarrollo de esta investigación, se inició con la ubicación de fuentes de materiales a utilizar, tomando los criterios correspondientes para su utilización. Posteriormente se realizó la caracterización de los materiales que se emplearán para la construcción de mezclas asfálticas porosas como son los agregados, el filler, el cemento asfalto y el grano de caucho reciclado de llanta.

Con la caracterización de los materiales a utilizar, se mostrará si cumplen o no con las especificaciones, para su posterior utilización en la construcción de las mezclas asfálticas porosas convencionales y con la adición del grano de caucho reciclado.

#### **3.2. UBICACIÓN DE LA FUENTE DE LOS MATERIALES A UTILIZARSE**

##### **3.2.1. Ubicación y coordenadas del agregado pétreo**

Los agregados pétreos a utilizarse en la presente investigación, fueron provenientes de la planta chancadora Charajas.

##### **Ubicación, de la planta chancadora de Charajas**

La planta chancadora de Charajas está ubicada en el kilómetro 45 de la provincia de Uriondo, del Departamento de Tarija.

De la planta chancadora Charajas, se tomó los siguientes materiales:

Grava 3/4", Gravilla 3/8"

Arena triturada.

##### **Ubicación y coordenadas UTM**

Sus coordenadas correspondientes son:

<b>UTM (WGS 84)</b>	<b>Lat – Long (dms)</b>
316999.88 E	Latitud: 21°46'55''S
7590259.29 N	Longitud: 64°46'12'' W

### **Imagen 3. 1. Ubicación, planta chancadora de Charajas**



**Legenda:** Se puede ver la planta chancadora, como así también su ubicación

**Fuente:** Elaboración propia

#### **3.2.2. Ubicación del cemento asfáltico**

##### **Ubicación**

El cemento asfáltico a utilizarse en la presente investigación es de la marca STRATURA 85-100 cuyo distribuidor es la empresa Brasil, el cual se obtuvo por la Posta Municipal de la ciudad de Tarija.

### **3.3. POBLACIÓN Y MUESTRA**

#### **3.3.1. Población**

La población objetivo del presente proyecto está representado por los ensayos en laboratorio que tengan que ver con mezclas asfálticas porosas.

#### **3.3.2. Muestra.**

Para la muestra se considera a los ensayos que se van a realizar en laboratorio y al elemento que brindará la información para la investigación, en sus diferentes etapas.

### 3.3.3. Tamaño de muestra.

Para utilizar el método se escogió un nivel de confianza del 95 % y un margen de error del 5 %. El nivel de confianza de la tabla de estadística de la distribución normal define una variable estándar o tipificada (z) de 1.96.

Estadísticamente hablando, la probabilidad de que ocurra éxito en un evento comparte en igual magnitud a la posibilidad de que ocurra un fracaso en el mismo, es por ello que se utilizará el valor del 50 % para cada una de ellas.

**Donde:**

**z**= Variable estándar o tipificada = 1.96

**P**= Posibilidad de éxito = 50 %

**Q**= Posibilidad de fracaso = 50 %

**e**= Margen de error = 5 %

**N<sub>i</sub>**= Tamaño de la población = 252

**n**=Tamaño de la muestra = ?

Utilizando la expresión para la población finita (muestra estratificada), se tiene el tamaño de la muestra:

$$n = \frac{\sum_{i=1}^n N_i * p * q}{\sum_{i=1}^n N_i \left(\frac{e}{Z}\right)^2 + \frac{\sum_{i=1}^n N_i * p * q}{\sum_{i=1}^n N_i}} = \frac{252.00 * 0.50 * 0.50}{252.00 * \left(\frac{0.05}{1.96}\right)^2 + \frac{252.00 * 0.50 * 0.50}{252.00}}$$

$$n = \frac{252.00 * 0.50 * 0.50}{252.00 * \left(\frac{0.05}{1.96}\right)^2 + \frac{252.00 * 0.50 * 0.50}{252.00}}$$

**n = 152 ensayos**

**Tabla 3. 1.** Planilla de muestreo

N°	Etapa	Ensayo	Ni	p	q	Nipq	fi	ni	Asumido
1	Caracterización de los agregados	Granulometría de la Grava	10	0.50	0.50	2.50	0.04	6.03	6
2		Granulometría de la arena	5	0.50	0.50	1.25	0.02	3.02	3
3		Granulometría filler	2	0.50	0.50	0.50	0.01	1.21	1
4		Índice de alargamiento de agregados	2	0.50	0.50	0.50	0.01	1.21	1
5		Índice de aplanamiento de agregados	2	0.50	0.50	0.50	0.01	1.21	1
6		Porcentaje de caras fracturadas en los agregados	2	0.50	0.50	0.50	0.01	1.21	1
7		Abrasión de agregados grueso máquina de los ángeles	2	0.50	0.50	0.50	0.01	1.21	1
8		Peso específico agregado fino	5	0.50	0.50	1.25	0.02	3.02	3
9		Peso específico agregado grueso	5	0.50	0.50	1.25	0.02	3.02	3
10		Equivalente de arena	5	0.50	0.50	1.25	0.02	3.02	3
11	Caracterización del cemento asfáltico	Penetración	5	0.50	0.50	1.25	0.02	3.02	3
12		Punto de inflamación	2	0.50	0.50	0.50	0.01	1.21	1
13		Punto de ablandamiento	2	0.50	0.50	0.50	0.01	1.21	1
14		Ductilidad	2	0.50	0.50	0.50	0.01	1.21	1
15		Peso específico	5	0.50	0.50	1.25	0.02	3.02	3
16	Pruebas y resultados	Porcentaje de vacíos	49	0.50	0.50	12.25	0.19	29.56	30
17		Permeabilidad	49	0.50	0.50	12.25	0.19	29.56	30
18		Estabilidad	49	0.50	0.50	12.25	0.19	29.56	30
19		Flujo	49	0.50	0.50	12.25	0.19	29.56	30
<b>Sumatorias</b>			<b>252</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>63.00</b>	<b>1.00</b>	<b>152.00</b>	<b>152</b>

Fuente: Elaboración propia

### 3.4. CRITERIOS DE SELECCIÓN, USO Y APLICACIÓN

#### 3.4.1. Criterios de selección de agregados pétreos

El criterio para ubicar los agregados pétreos, se decidió utilizar bancos de materiales que son empleados para el diseño de mezclas asfálticas en Tarija, agregados que se decidió utilizar de la planta chancadora de Charajas, ya que este material pétreo es utilizado por

el servicio departamental de caminos, donde ha demostrado tener muy buenas características y condiciones para el diseño de las mezclas asfálticas.

Los agregados pétreos se usan ampliamente en la construcción civil, como ser en bases, sub-bases, relleno de carreteras y para las mezclas asfálticas en carpetas asfálticas.

#### **3.4.2. Criterios de selección del cemento asfáltico**

El cemento asfáltico utilizado en esta investigación es el STRATURA-BRASIL 85-100, siendo un cemento asfáltico que se utiliza en la ciudad de Tarija para la pavimentación, empleado por la Alcaldía de la ciudad de Tarija.

#### **3.4.3. Criterios de selección del grano de caucho reciclado**

En la selección del grano de caucho reciclado de llanta, para mejorar a las mezclas asfálticas porosas, se tomó en cuenta el criterio de un estudio ya realizado titulado “Mejora de una mezcla asfáltica drenante con adición de caucho e icopor” (Karina Liset Rodriguez Gallego), que indicaba el uso del grano de caucho para mejorar sus características de la mezcla porosa.

#### **3.4.4. Criterios de la variación de porcentaje del grano de caucho reciclado**

Según el estudio realizado titulado “Mejora de una mezcla asfáltica drenante con adición de caucho e icopor”, (Karina Liset Rodriguez Gallego), recomienda según recopilación de información que los rangos de incorporación de caucho, son valores comúnmente trabajados que oscilan entre 0.50 % y 2.00 %. Siendo este valor del 2.00 % un rango bastante alto y poco recomendable.

Tomando en cuenta este criterio se trabajó con porcentajes de caucho del 0.50 %, 0.75 %, 1.00 %, 1.50 %, 2.00 % y 2.50 %, tomando el ultimo valor para ver su comportamiento.

### **3.5. CRITERIOS PARA EL NÚMERO DE ENSAYOS**

#### **3.5.1. Criterio para el número de ensayos para el agregado pétreo**

Para la presente investigación se realizarán diferentes ensayos y el número de los mismos a ejecutarse se detallan en la Tabla 3.2.

**Tabla 3. 2.** Ensayos a realizar en los agregados pétreos y el filler

<b>Ensayos</b>	<b>N° de ensayos a realizar</b>
Granulometría	10
Índice de aplanamiento y alargamiento	1
Porcentaje de caras fracturadas	1
Abrasión de agregados gruesos máquina de los ángeles	1
Peso específico del agregado fino	3
Peso específico del agregado grueso	3
Equivalente de arena	2
Peso específico del filler	1

**Fuente:** Elaboración propia

Dichos ensayos se desglosan a continuación:

**Granulometría.-** Se realizará 3 ensayos para la grava 3/4", 3/8", arena y uno para el filler.

**Índice de aplanamiento y alargamiento.-** Se realizará 1 ensayo para el agregado de 3/4" y 3/8".

**Porcentaje de caras fracturadas.-** Se realizará 1 ensayo para el agregado de 3/4" y 3/8".

**Abrasión de agregados gruesos, máquina de los ángeles.-** Se realizará 1 ensayo para el agregado de 3/4" y 3/8".

**Peso específico del agregado fino.-** Se realizará 3 ensayos para el agregado fino y se sacará su promedio.

**Peso específico del agregado grueso.-** Se realizará 3 ensayos para el agregado grueso y se sacará su promedio.

**Equivalente de arena.-** Se realizará 3 ensayos para el agregado fino y se sacará su promedio.

**Peso específico del filler.-** Se realizó 1 ensayo para el filler.

### **3.5.2. Criterios para el número de ensayos para el cemento asfáltico**

Para la presente investigación se realizarán diferentes ensayos y el número de los mismos a ejecutarse, los cuales se desglosan a continuación:



**Penetración.-** Se realizará 3 ensayos para el cemento asfáltico 85-100 y se sacará su promedio.

**Punto de inflamación.-** Se realizará 1 ensayo para el cemento asfáltico 85-100.

**Punto de ablandamiento.-** Se realizará 2 ensayos para el cemento asfáltico 85-100 y se sacará su promedio.

**Ductilidad.-** Se realizará 3 ensayos para el cemento asfáltico 85-100 y se sacara su promedio.

**Peso específico.-** Se realizara 3 ensayos para el cemento asfáltico 85-100 y se sacará su promedio.

**Tabla 3. 3.** Ensayos a realizar en el cemento asfáltico

<b>Ensayos</b>	<b>N° de ensayos a realizar</b>
Penetración	3
Punto de inflamación	1
Punto de ablandamiento	2
Ductilidad	3
Peso específico	3

**Fuente:** Elaboración propia

### **3.6. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO Y EL FILLER**

El análisis de resultados de los ensayos realizados que se nombran a continuación se pueden observar en la Tabla 3.29. Información complementaria, ver anexo 1.

#### **3.6.1. Granulometría de los agregados grueso y fino**

Se realizaron 3 análisis granulométricos por tamizado para cada uno de los agregados, tanto para la grava, gravilla, arena y uno para el filler. Tomando la normativa de INV E - 213 – 13.

**Imagen 3. 2.** Ensayo de granulometría del agregado grueso y fino



**Leyenda:** Tamizado de los agregados y pesos de las muestras retenidas

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 3. 4.** Datos de las granulometrías de la grava de 3/4"

<b>Grava 3/4"</b>				
<b>Masa total = 5000 gr</b>				
<b>N° ensayo</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Tamices</b>	<b>Tamaño (mm)</b>	<b>Peso ret.</b>	<b>Peso ret.</b>	<b>Peso ret.</b>
1"	25.40	0.00	0.00	0.00
3/4"	19.00	0.00	0.00	0.00
1/2"	12.50	3342.56	3229.60	3243.00
3/8"	9.500	1156.30	1186.60	1261.60
N° 4	4.75	496.75	565.80	488.20
N° 8	2.36	3.41	6.00	0.60
N° 10	2.00	0.00	0.10	0.20
N° 16	1.18	0.00	0.20	0.20
N° 40	0.43	0.00	0.60	0.60
N° 100	0.15	0.10	3.80	1.20
N° 200	0.08	0.20	4.00	2.00
Base	-	0.50	3.00	2.00
<b>Suma</b>		<b>4999.82</b>	<b>4999.70</b>	<b>4999.60</b>

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 3. 5.** Datos de las granulometrías de la grava de 3/8"

<b>Gravilla 3/8"</b>				
<b>Masa total = 5000 gr</b>				
<b>N° ensayo</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Tamices</b>	<b>Tamaño (mm)</b>	<b>Peso ret.</b>	<b>Peso ret.</b>	<b>Peso ret.</b>
1"	25.40	0.00	0.00	0.00
3/4"	19.00	0.00	0.00	0.00
1/2"	12.50	4.61	18.80	12.80
3/8"	9.50	240.72	64.20	122.00
N° 4	4.75	4016.54	3735.00	3709.40
N° 8	2.36	691.20	1078.20	975.00
N° 10	2.00	7.38	20.40	18.80
N° 16	1.18	8.30	31.40	33.00
N° 40	0.43	5.73	25.00	59.60
N° 100	0.15	11.07	16.60	51.00
N° 200	0.08	12.09	7.20	14.00
Base	-	1.64	3.20	3.60
<b>Suma</b>		<b>4999.28</b>	<b>5000.00</b>	<b>4999.20</b>

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 3. 6.** Datos de las granulometrías de arena

<b>Arena</b>				
<b>Masa total = 5000 gr</b>				
<b>N° ensayo</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Tamices</b>	<b>Tamaño (mm)</b>	<b>Peso ret.</b>	<b>Peso ret.</b>	<b>Peso ret.</b>
1"	25.40	0.00	0.00	0.00
3/4"	19.00	0.00	0.00	0.00
1/2"	12.50	0.00	0.00	0.00
3/8"	9.50	0.00	0.00	0.00
N° 4	4.75	83.60	84.00	87.50
N° 8	2.36	1025.40	1022.50	1172.50
N° 10	2.00	290.40	278.50	295.00
N° 16	1.18	860.00	858.00	885.00
N° 40	0.43	1620.00	1632.00	1499.00
N° 100	0.15	890.80	968.50	895.00
N° 200	0.08	222.50	148.00	153.50
Base	-	7.00	8.00	12.00
<b>Suma</b>		<b>4999.70</b>	<b>4999.50</b>	<b>4999.50</b>

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 3. 7.** Datos de la granulometría del filler

Filler		
Masa total = 100 gr		
N° ensayo		1
Tamices		Peso ret.
(pulg)	(mm)	
N° 10	2.00	0.00
N° 16	1.18	0.00
N° 40	0.43	0.00
N° 100	0.15	0.20
N° 200	0.08	25.10
Base	-	74.00
<b>Suma</b>		<b>99.30</b>

Fuente: Elaboración propia

**Proceso de cálculo:**

$$\% \text{ Que pasa} = 100 - \left( \left( \frac{\text{Peso ret.}}{\text{Peso Total Seco}} \right) * 100 \right)$$

$$\% \text{ Que pasa} = 100 - \left( \left( \frac{3342.56}{5000} \right) * 100 \right) = 33.15 (\%)$$

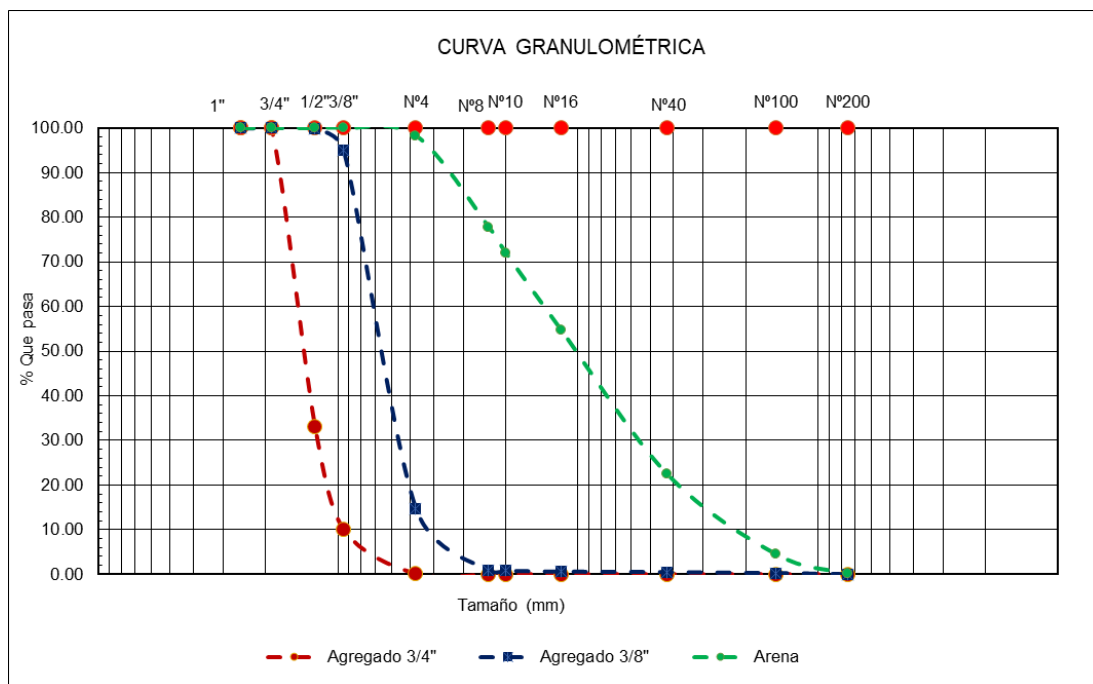
Para los demás cálculos se repite sucesivamente el cálculo.

**Tabla 3. 8.** Resultado de la granulometría - ensayo N° 1

Análisis granulométrico (1)				
Masa total = 5000 gr				
Tamices		Grava		Finos
(pulg)	(mm)	3/4"	3/8"	Arena
		% Pasa	% Pasa	% Pasa
1"	25.40	100.00	100.00	100.00
3/4"	19.00	100.00	100.00	100.00
1/2"	12.50	33.15	99.91	100.00
3/8"	9.50	10.02	95.09	100.00
N° 4	4.75	0.09	14.76	98.33
N° 8	2.36	0.02	0.94	77.82
N° 10	2.00	0.02	0.79	72.01
N° 16	1.18	0.02	0.63	54.81
N° 40	0.43	0.02	0.51	22.41
N° 100	0.15	0.02	0.29	4.60
N° 200	0.08	0.01	0.05	0.15
Base	-	0.00	0.01	0.01

Fuente: Elaboración propia

**Gráfica 3. 1.** Curva granulométrica - ensayo N° 1



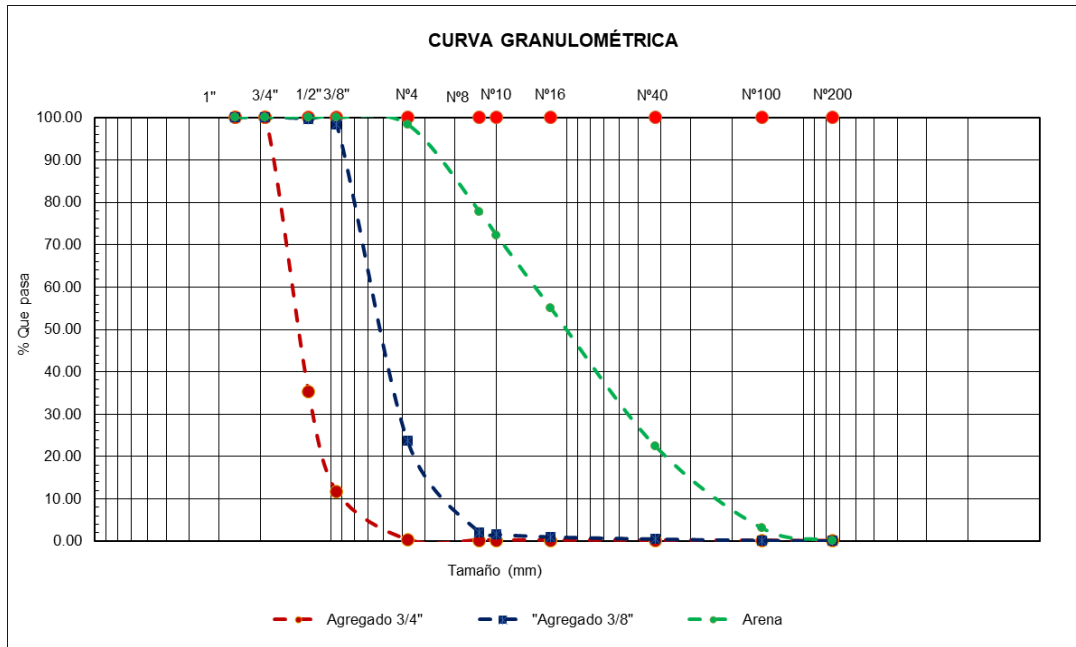
**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 3. 9.** Resultado de la granulometría - ensayo N° 2

<b>Análisis granulométrico (2)</b>				
<b>Masa total = 5000 gr</b>				
<b>Tamices</b>		<b>Grava</b>		<b>Finos</b>
		<b>3/4\"</b>	<b>3/8\"</b>	<b>Arena</b>
<b>(pulg)</b>	<b>(mm)</b>	<b>% Pasa</b>	<b>% Pasa</b>	<b>% Pasa</b>
1"	25.40	100.00	100.00	100.00
3/4"	19.00	100.00	100.00	100.00
1/2"	12.50	35.41	99.62	100.00
3/8"	9.50	11.68	98.34	100.00
N° 4	4.75	0.36	23.64	98.32
N° 8	2.36	0.24	2.08	77.87
N° 10	2.00	0.24	1.67	72.30
N° 16	1.18	0.23	1.04	55.14
N° 40	0.43	0.22	0.54	22.50
N° 100	0.15	0.15	0.21	3.13
N° 200	0.08	0.07	0.06	0.17
Base	-	0.01	0.00	0.01

**Fuente:** Elaboración propia

**Gráfica 3. 2.** Curva granulométrica - ensayo N° 2



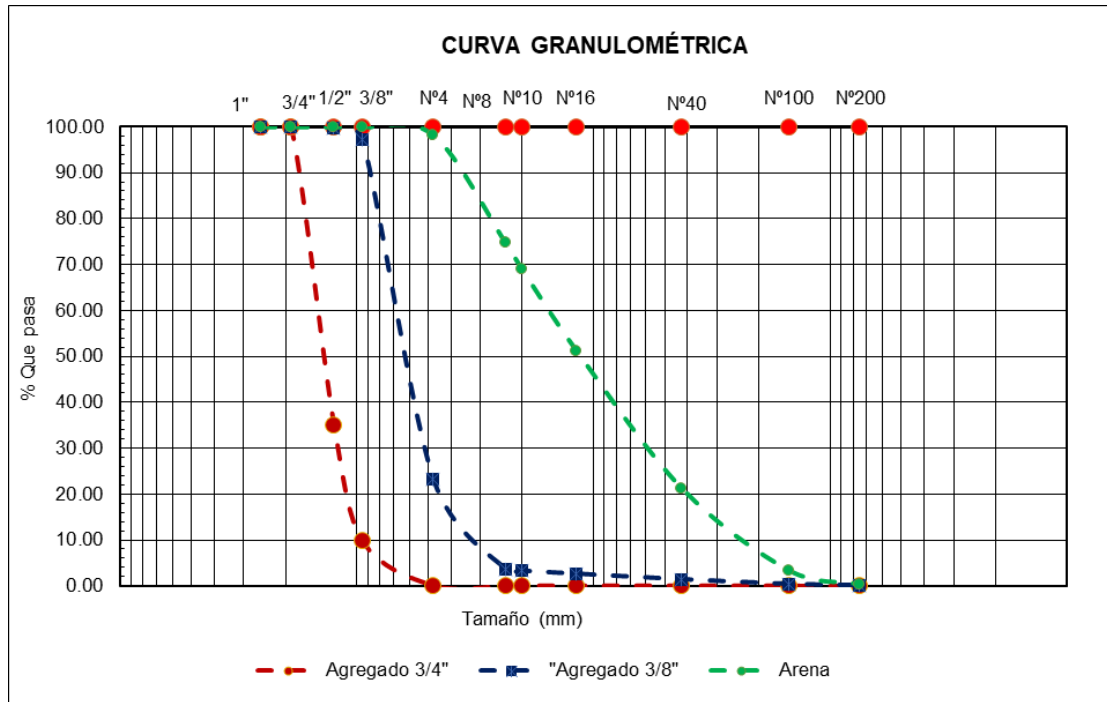
**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 3. 10.** Resultado de la granulometría - ensayo N° 3

<b>Análisis granulométrico (3)</b>				
<b>Masa total = 5000 gr</b>				
<b>Tamices</b>		<b>Grava</b>		<b>Finos</b>
		<b>3/4"</b>	<b>3/8"</b>	<b>Arena</b>
<b>(pulg)</b>	<b>(mm)</b>	<b>% Pasa</b>	<b>% Pasa</b>	<b>% Pasa</b>
1"	25.40	100.00	100.00	100.00
3/4"	19.00	100.00	100.00	100.00
1/2"	12.50	35.14	99.74	100.00
3/8"	9.50	9.91	97.30	100.00
N° 4	4.75	0.14	23.12	98.25
N° 8	2.36	0.13	3.62	74.80
N° 10	2.00	0.13	3.24	68.90
N° 16	1.18	0.12	2.58	51.20
N° 40	0.43	0.11	1.39	21.22
N° 100	0.15	0.09	0.37	3.32
N° 200	0.08	0.05	0.09	0.25
Base	-	0.01	0.02	0.01

**Fuente:** Elaboración propia

**Gráfica 3.3.** Curva granulométrica - ensayo N° 3



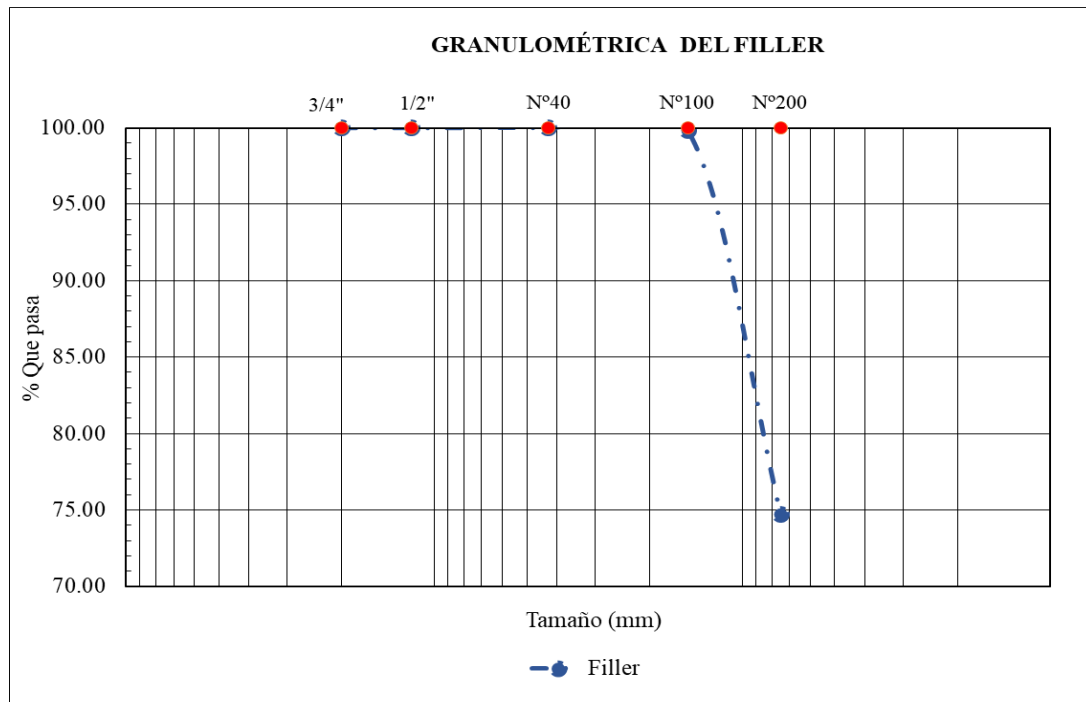
**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 3.11.** Resultado de la granulometría del filler

<b>Filler</b>		
<b>Masa total = 100 gr</b>		
<b>N° ensayo</b>		<b>1</b>
<b>Tamices</b>		<b>% Pasa</b>
<b>(pulg)</b>	<b>(mm)</b>	
N° 10	2.00	100.00
N° 16	1.18	100.00
N° 40	0.43	100.00
N° 100	0.15	99.80
N° 200	0.08	74.70
Base	-	0.70

**Fuente:** Elaboración propia

**Gráfica 3. 4.** Curva granulométrica del filler



**Fuente:** Elaboración propia

### 3.6.2. Índice de aplanamiento y de alargamiento de los agregados

La forma de las partículas de los agregados es importante en la construcción de carreteras, porque las partículas de forma defectuosa suelen generar inconvenientes. Las partículas planas y alargadas tienden a producir mezclas de concreto poco trabajables, lo que puede afectar su durabilidad a largo plazo. En las capas granulares y en las mezclas asfálticas, estas partículas son propensas a rotura y desintegración durante el proceso de compactación, modificando la granulometría del agregado y afectando adversamente su comportamiento.

**Partícula plana.-** Partícula cuya dimensión mínima (espesor) es inferior a  $3/5$  de la dimensión media de la fracción.

**Partícula larga.-** Partícula cuya dimensión máxima (largo) es superior a  $9/5$  de la dimensión media de la fracción.

Para el ensayo de índice de aplanamiento y alargamiento, se debe seguir el procedimiento según la norma INV E – 230 – 13.



### 3.6.2.1. Índice de aplanamiento de los agregados

**Imagen 3. 3.** Ensayo de aplanamiento de los agregados



**Leyenda:** Tamizado del agregado grueso y determinación de la muestras retenida o que pasa.

**Fuente:** Elaboración propia

Tamaño máximo nominal del agregado = 3/4".

Masa mínima para el ensayo = 2000 gr.

**Tabla 3. 12.** Datos del ensayo de índice de aplanamiento

Grava 3/4"- 1/2"			
Tamiz (pulg)	Peso retenido (Ri) (gr)	% Retenido	Peso de partículas que pasan (mi) (gr)
11/2" - 1"	-	0.00	-
1" - 3/4"	-	0.00	-
3/4" - 1/2"	1805.40	90.27	385.60
1/2" - 3/8"	181.40	13.58	44.80
3/8" - 1/4"	13.20	1.34	0.00
<b>Total</b>	<b>2000.00</b>	-	<b>430.40</b>

**Fuente:** Elaboración propia

**Proceso de cálculo:**

Índice de aplanamiento de cada fracción, la cual se calcula como sigue:

$$IA_i = \frac{mi}{Ri} * 100$$

$$IA_i = \frac{385.60}{1805.40} * 100$$

$$IA_i = 21.36 (\%)$$

Índice de aplanamiento global, el cual se calcula como sigue:

$$IA = \frac{\sum \text{masa pasan}}{\sum \text{masa total}} * 100$$

$$IA = \frac{430.40}{2000} * 100$$

$$IA = 21.52 (\%)$$

**Tabla 3. 13.** Resultados del ensayo de índice de aplanamiento

Tamiz (pulg)	Índice de aplanamiento (IA <sub>i</sub> ) (%)	Índice de aplanamiento global (IA) (%)
1 1/2" - 1"	-	21.52
1" - 3/4"	-	
3/4" - 1/2"	21.36	
1/2" - 3/8"	24.70	
3/8" - 1/4"	0.00	

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.6.2.2. Índice de alargamiento de los agregados

**Imagen 3. 4.** Ensayo de índice de aplanamiento de agregados



**Leyenda:** Tamizado del agregado grueso y determinación de la muestras retenida o que pasa

**Fuente:** Elaboración propia

Tamaño máximo nominal del agregado = 3/4".

Masa mínima para el ensayo = 2000 gr.

**Tabla 3. 14.** Datos del ensayo de índice de alargamiento

<b>Grava 3/4" - 1/2"</b>			
<b>Tamiz (pulg)</b>	<b>Peso retenido (Ri) (gr)</b>	<b>% retenido</b>	<b>Peso de partículas que pasan (ni) (gr)</b>
1 1/2" - 1"	-	0.00	-
1" - 3/4"	-	0.00	-
3/4" - 1/2"	1805.40	90.27	1106.20
1/2" - 3/8"	181.40	13.58	46.40
3/8" - 1/4"	13.20	1.34	0.00
<b>Total</b>	<b>2000.00</b>	<b>-</b>	<b>1152.60</b>

**Fuente:** Elaboración propia

**Proceso de cálculo:**

Índice de alargamiento de cada fracción, el cual se calcula como sigue:

$$IA_i = \frac{n_i}{R_i} * 100$$

$$IA_i = \frac{1106.20}{1805.40} * 100$$

$$IA_i = 61.27 (\%)$$

Índice de alargamiento global, el cual se calcula como sigue:

$$IA = \frac{\sum \text{masa pasan}}{\sum \text{masa total}} * 100$$

$$IA = \frac{1152.60}{2000} * 100$$

$$IA = 57.63 (\%)$$

**Tabla 3. 15.** Resultados del ensayo de índice de alargamiento

<b>Tamiz (pulg)</b>	<b>Índice de alargamiento (IAi) (%)</b>	<b>Índice de alargamiento global (IA) (%)</b>
1" - 3/4"	-	57.63
3/4" - 1/2"	61.27	
1/2" - 3/8"	25.58	
3/8" - 1/4"	0.00	

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.6.3. Porcentajes de caras fracturadas en los agregados

Uno de los propósitos de este requisito es maximizar la resistencia al corte, incrementando la fricción entre partículas en mezclas de agregados, ligadas o no. Otro propósito, es dar estabilidad a los agregados usados en tratamientos superficiales y proporcionar mayor fricción y textura a los agregados usados en la construcción de capas de rodadura.

**Cara fracturada.-** Una superficie angulosa, áspera o quebrada de una partícula de agregado, formada por trituración, por otros medios artificiales o por la naturaleza.

**Partícula fracturada.-** Una partícula de agregado que tiene, al menos, el número mínimo de caras fracturadas especificadas (generalmente una o dos).

Para el ensayo de porcentaje de partículas fracturadas, se debe seguir el procedimiento según la norma INV E – 227 – 13.

**Imagen 3. 5.** Ensayo de caras fracturadas de los agregados



**Leyenda:** Tamizado del agregado grueso y visualización de caras fracturadas y no fracturadas

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 3. 16.** Datos del ensayo de caras fracturadas

Grava 3/4" – 1/2"				
Tamiz (pulg)	Peso retenido (gr)	% Retenido	Peso de partículas no fracturadas (N) (gr)	Peso de partículas fracturadas (una cara) (F) (gr)
1" - 3/4"	-	0.00	-	-
3/4" - 1/2"	1264.50	84.30	70.26	1194.24
1/2" - 3/8"	225.60	20.66	8.30	217.30
3/8" - 1/4"	9.90	2.04	0.00	9.90
<b>Total</b>	<b>1500.00</b>	-	-	-

**Fuente:** Elaboración propia

### Proceso de cálculo:

El porcentaje de caras fracturadas, se calcula como sigue:

$$P = \frac{F}{F + N} * 100$$
$$P = \frac{1046.60}{1046.60 + 130.26} * 100$$
$$P = 94.44 (\%)$$

**Tabla 3. 17.** Resultados del ensayo de caras fracturadas

Tamiz (pulg)	Partículas fracturadas (P) (%)	Promedio partículas fracturadas (P) (%)
1" - 3/4"	-	96.92
3/4" - 1/2"	94.44	
1/2" - 3/8"	96.32	
3/8" - 1/4"	100.00	

**Fuente:** Elaboración propia

#### 3.6.4. Abrasión de agregado grueso máquina de los ángeles

Este ensayo es una medida al desgaste de los agregados minerales de graduaciones estándar resultado de una combinación de acciones que incluye la abrasión o el desgaste, impacto, y desintegración en un tambor de acero rotatorio que contiene un número especificado de esferas de acero el cual depende de la graduación de la muestra de ensayo. Después del número prescrito de revoluciones, los contenidos son removidos del tambor y la porción del agregado es tamizada para medir el desgaste como un porcentaje de pérdida.

El ensayo representa fundamentalmente el desgaste sufrido por los agregados durante el proceso de fabricación de la mezcla asfáltica y de la posterior compactación en obra al utilizarse equipos pesados, ha sido ampliamente usado como un indicador de la calidad relativa o la comparación de varias fuentes de agregado que tengan similar composición mineral.

Para el ensayo de abrasión de agregado grueso máquina de los ángeles, se debe seguir el procedimiento según la norma INV E – 218 – 13.

El tipo de abrasión que se efectuó es de tipo B para la grava y gravilla, del cual se realizó un solo ensayo.

**Imagen 3. 6.** Ensayo de abrasión de agregado grueso



**Leyenda:** Desgaste del agregado y lavado del mismo para luego proceder a secar y pesar

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 3. 18.** Datos y resultados del ensayo de abrasión de agregados máquina de los ángeles

Grava 3/4" - 1/2"						
Tamiz		Cantidad (gr)	Tipo de gradación	Números de esferas	Ret. tamiz N°12 (1.7 mm) (gr)	Desgaste (%)
Pasa	Retenido					
3/4"	1/2"	2500.00	B	11 esferas a 32.5 Rpm 500 Revoluciones	3945.20	21.10
1/2"	3/8"	2500.00				
<b>Peso total</b>		<b>5000.00</b>	-	-	-	-

**Fuente:** Elaboración propia

**Proceso de cálculo:**

$$\% \text{ pérdidas} = \frac{P_1 - P_2}{P_1} * 100$$

$$\% \text{ pérdidas} = \frac{5000.00 - 3945.20}{5000.00} * 100 = \mathbf{21.10 (\%)}$$

### 3.6.5. Peso específico del agregado fino

Este ensayo busca determinar el peso específico aparente y nominal a 23/23 °C así como la absorción después de 24 horas de sumergidos en agua, de los agregados con tamaño inferior a 4,75 mm (tamiz N° 4).

El peso específico aparente es la relación entre el peso al aire del sólido y el peso de agua correspondiente a su volumen aparente, y su peso específico nominal a la relación entre el peso al aire del sólido y el peso del agua correspondiente a su volumen nominal.

Para el ensayo de peso específico del agregado fino, se debe seguir el procedimiento según la norma INV E – 222 – 13.

**Imagen 3. 7.** Ensayo de peso específico del agregado fino



**Leyenda:** Secado superficialmente de la muestra, verificación y pesado

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 3. 19.** Datos del ensayo, peso específico del agregado fino

Arena			
Ensayos	1	2	3
Peso muestra seca al horno "A" (gr)	491.60	491.20	490.90
Peso matraz + agua "B" (gr)	671.80	671.95	671.99
Peso muestra + matraz + agua "C" (gr)	970.50	975.70	969.60
Peso muestra Sat. seca "S" (gr)	500.00	500.00	500.00
Peso matraz (gr)	171.80	171.95	171.99

**Fuente:** Elaboración propia

**Proceso de cálculo primer ensayo:**

$$\text{Peso específico seco al horno (SH)} = \frac{A}{B + S - C}$$

$$\text{Peso específico seco al horno (SH)} = \frac{491.60}{671.80 + 500.00 - 970.50}$$

$$\text{Peso específico seco al horno (SH)} = 2.44 \left( \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right)$$

$$\text{P. E. en condición saturada y superficialmente seca (SSS)} = \frac{S}{B + S - C}$$

$$\text{P. E. en condición saturada y superficialmente seca (SSS)} = \frac{500.00}{671.80 + 500.00 - 970.50}$$

$$\text{P. E. en condición saturada y superficialmente seca (SSS)} = 2.48 \left( \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right)$$

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{A}{B + A - C}$$

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{491.60}{671.80 + 491.60 - 970.50}$$

$$\text{Peso específico aparente} = 2.55 \left( \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right)$$

$$\text{Absorción, \%} = \frac{S - A}{A} * 100.00 = \frac{500.00 - 491.60}{491.60} * 100.00$$

$$\text{Absorción, \%} = 1.71 (\%)$$

Para los demás ensayos es el mismo procedimiento descrito anteriormente.

**Tabla 3. 20.** Resultados del ensayo, peso específico del agregado fino

<b>Arena</b>				
<b>Ensayos</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>Promedio</b>
Peso específico SH (gr/cm <sup>3</sup> )	2.44	2.50	2.43	<b>2.46</b>
Peso específico S.S.S (gr/cm <sup>3</sup> )	2.48	2.55	2.47	<b>2.50</b>
Peso específico aparente (gr/cm <sup>3</sup> )	2.55	2.62	2.54	<b>2.57</b>
Absorción, (%)	1.71	1.79	1.85	<b>1.78</b>

**Fuente:** Elaboración propia



### 3.6.6. Peso específico del agregado grueso

La densidad relativa (gravedad específica) es la característica generalmente empleada para calcular el volumen ocupado por el agregado en mezclas como las de concreto hidráulico, concreto asfáltico y otras que se dosifican o analizan sobre la base de un volumen absoluto.

La densidad relativa (gravedad específica) SSS se usa si el agregado está húmedo, es decir, si su absorción ha sido satisfecha. Por el contrario, la densidad relativa (gravedad específica) en condición seca (SH) se usa para los cálculos requeridos cuando el agregado está seco o se asume que lo está.

Para el ensayo de peso específico del agregado grueso, se debe seguir el procedimiento según la norma INV E – 223 – 13. Se realizó la medición tanto para la grava 3/4" y la gravilla 3/8".

**Imagen 3. 8.** Ensayo de peso específico del agregado grueso



**Leyenda:** Peso sumergido del agregado grueso y preparación para su secado

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 3. 21.** Datos del ensayo, peso específico del agregado grueso 3/4"

Grava 3/4"			
Ensayos	1	2	3
Peso muestra seca "A" (gr)	2972.10	2967.90	2972.40
Peso muestra sat. con sup. seca "B" (gr)	3000.00	3000.00	3000.00
Peso muestra sat. dentro del agua "C" (gr)	1878.00	1880.00	1879.00

**Fuente:** Elaboración propia

**Proceso de cálculo para la grava 3/4" primer ensayo:**

$$\text{Peso específico seco al horno (SH)} = \frac{A}{B - C}$$

$$\text{Peso específico seco al horno (SH)} = \frac{2972.10}{3000.00 - 1878.00}$$

$$\text{Peso específico seco al horno (SH)} = 2.65 \left( \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right)$$

$$\text{P. E. en condición saturada y superficialmente seca (SSS)} = \frac{B}{B - C}$$

$$\text{P. E. en condición saturada y superficialmente seca (SSS)} = \frac{3000.00}{3000.00 - 1878.00}$$

$$\text{P. E. en condición saturada y superficialmente seca (SSS)} = 2.67 \left( \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right)$$

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{A}{A - C}$$

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{2972.10}{2972.10 - 1878.00}$$

$$\text{Peso específico aparente} = 2.72 \left( \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right)$$

$$\text{Absorción, \%} = \frac{B - A}{A} * 100 = \frac{3000.00 - 2972.10}{2972.10} * 100$$

$$\text{Absorción, \%} = 0.94 (\%)$$

Para los demás ensayos es el mismo procedimiento descrito anteriormente.

**Tabla 3. 22.** Resultados del ensayo, peso específico del agregado grueso 3/4"

<b>Grava 3/4"</b>				
<b>Ensayos</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>Promedio</b>
Peso específico SH (gr/cm <sup>3</sup> )	2.65	2.65	2.65	<b>2.65</b>
Peso específico S.S.S (gr/cm <sup>3</sup> )	2.67	2.68	2.68	<b>2.68</b>
Peso específico aparente (gr/cm <sup>3</sup> )	2.72	2.73	2.72	<b>2.72</b>
Absorción, (%)	0.94	1.08	0.93	<b>0.98</b>

**Fuente:** Elaboración propia

Para el proceso de cálculo de la gravilla es el mismo procedimiento que se realizó con la grava.

**Tabla 3. 23.** Datos del ensayo, peso específico del agregado grueso 3/8"

<b>Gravilla 3/8"</b>			
<b>Ensayos</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Peso muestra seca "A" (gr)	2945.16	2956.50	2955.12
Peso muestra sat. con sup. seca "B" (gr)	3000.00	3000.00	3000.00
Peso muestra sat. dentro del agua "C" (gr)	1860.00	1868.00	1868.00

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 3. 24.** Resultados del ensayo, peso específico del agregado grueso 3/8"

<b>Gravilla 3/8"</b>				
<b>Ensayos</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>Promedio</b>
Peso específico SH (gr/cm <sup>3</sup> )	2.58	2.61	2.61	<b>2.60</b>
Peso específico S.S.S (gr/cm <sup>3</sup> )	2.63	2.65	2.65	<b>2.64</b>
Peso específico aparente (gr/cm <sup>3</sup> )	2.71	2.72	2.72	<b>2.72</b>
Absorción, (%)	1.86	1.47	1.52	<b>1.62</b>

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.6.7. Equivalente de arena

Este ensayo produce como resultado un valor empírico de la cantidad relativa, finura y carácter del material arcilloso presente en la muestra de suelo o agregado fino.

Se puede especificar un valor mínimo del equivalente de arena, para limitar la cantidad admisible de finos arcillosos en un agregado.

Este método de ensayo permite determinar rápidamente, en el campo, variaciones de calidad de los agregados durante la producción o la colocación.

Para el ensayo de equivalente de arena, se debe seguir el procedimiento según la norma INV E – 133 – 13.

**Tabla 3. 25.** Datos del ensayo, equivalente de arena

<b>Arena</b>			
<b>Descripción</b>	<b>Ensayo</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Lectura nivel superior (H1) (cm)	12.10	12.10	12.40
Lectura nivel inferior (H2) (cm)	8.90	9.00	9.50

**Fuente:** Elaboración propia

**Imagen 3. 9.** Ensayo de equivalente de arena



**Leyenda:** Proceso de sedimentación del agregado fino, para luego proceder a medir el filler y la arena

**Fuente:** Elaboración propia

**Proceso de cálculo:**

$$\% \text{ de arena} = \frac{H_2}{H_1} * 100$$

$$\% \text{ de arena} = \frac{8.90}{12.10} * 100 = 73.55 (\%)$$

**Tabla 3. 26.** Resultados del ensayo equivalente de arena

Descripción	Ensayo		
	1	2	3
Equivalente de arena (%)	73.55	74.38	76.61
Promedio (%)	<b>74.85</b>		

**Fuente:** Elaboración propia

**3.6.8. Peso específico del filler**

**Tabla 3. 27.** Datos del ensayo peso específico del filler

Descripción	Ensayo 1
Peso seco (gr)	60.00
Volumen inicial (cm)	300.00
Volumen final (cm)	319.80

**Fuente:** Elaboración propia

**Imagen 3. 10.** Ensayo peso específico del filler



**Leyenda:** Peso de la muestra y medición de su volumen final

**Fuente:** Elaboración propia

**Proceso de cálculo:**

$$\text{Peso específico} = \frac{\text{masa}}{\text{Vol. final} - \text{Vol. inicial}}$$

$$\text{Peso específico} = \frac{60.00}{319.80 - 300.00}$$

$$\text{Peso específico} = 3.03 \left( \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right)$$

**Tabla 3. 28.** Resultados del ensayo peso específico del filler

Descripción	Ensayo 1
Diferencia de volumen (cm)	19.80
Peso específico (gr/cm <sup>3</sup> )	3.03

**Fuente:** Elaboración propia

Concluyendo en el ensayo del peso específico del filler, se puede concluir que en el laboratorio no se cuenta con el frasco Le Chatelier para realizar el ensayo; sin embargo, se realizó el mismo con un frasco graduado para simular su valor.

### 3.6.9. Resumen de las características de los agregados a utilizar

**Tabla 3. 29.** Resumen de resultados de las características de los agregados

Ensayos realizados sobre los agregados				
Análisis	Resultados	Especificación (INVIAS ART 400)		Norma
Índice de alargamiento de agregados (%)	<b>57.63</b>	Máximo 30	NC	INV E – 240 ASTM D 4791 - 10
Índice de aplanamiento de agregados (%)	<b>21.52</b>	Máximo 30	Cumple	INV E – 240 ASTM D 4791 – 10
Porcentaje de caras fracturadas en los agregados (%)	<b>96.92</b>	Mínimo una cara/dos caras 76/60	Cumple	INV E – 227 ASTM D 5821
Abrasión de agregado grueso máquina de los ángeles (%)	<b>21.10</b>	Máximo 25	Cumple	INV E – 218 ASTM C 131 – 06
Peso específico del agregado fino (gr/cm <sup>3</sup> )	<b>2.57</b>	–	NE	INV E – 222 ASTM C 128 – 07a
Peso específico del agregado grueso (gr/cm <sup>3</sup> )	<b>2.72</b>	–	NE	INV E – 223 ASTM C 127 – 07
Equivalente de arena (%)	<b>74.85</b>	Mínimo 50	Cumple	INV E – 133 ASTM D 2419
Peso específico del filler (gr/cm <sup>3</sup> )	<b>3.03</b>	-	NE	ASTM C 188 - 95

Fuente: Elaboración propia

## 3.7. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN AL CEMENTO ASFÁLTICO

Los resultados de los ensayos realizados que se nombran a continuación se pueden ver en la Tabla 3.36. Información complementaria, ver anexo 2.

### 3.7.1. Penetración

El ensayo de penetración se usa para medir la consistencia de los productos bituminosos a la temperatura de ensayo. Altos valores de penetración indican consistencias más blandas.

La penetración también se define como la consistencia de un material bituminoso expresada por medio de la distancia, en décimas de milímetro, hasta la cual penetra verticalmente una aguja normalizada en el material en condiciones definidas de carga, tiempo y temperatura. Normalmente, el ensayo se realiza a 25 °C, (77 °F) durante un tiempo de 5 segundos y con una carga móvil total, incluida la aguja, de 100 gr, aunque se pueden emplear otras condiciones previamente definidas.

Para el ensayo de penetración, se debe seguir el procedimiento según la norma INV E – 706 – 13.

**Imagen 3. 11.** Ensayo de penetración del cemento asfáltico



**Leyenda:** Determinación de la temperatura y penetración de la muestra.

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 3. 30.** Resultados del ensayo de penetración

Molde N°	Tiempo 5 seg.			Promedio (0.1 mm)
	Penetración N° 1 (0.1 mm)	Penetración N° 2 (0.1 mm)	Penetración N° 3 (0.1 mm)	
1	90.00	89.00	88.00	89.89
2	91.00	88.00	89.00	
3	92.00	93.00	89.00	

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.7.2. Punto de inflamación

El punto de inflamación corresponde a la temperatura a la que se puede calentar el cemento asfáltico con seguridad, sin peligro a que se inflame en presencia de llama. Sirve como prueba de seguridad en la operación de las plantas productoras de mezcla asfáltica en caliente.

Para el ensayo de punto de inflamación, se debe seguir el procedimiento según la norma INV E 709 – 13.

**Imagen 3. 12.** Ensayo de punto de inflamación del cemento



**Leyenda:** Verificación del punto de inflamación y visualización del punto de inflamación

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 3. 31.** Resultados del ensayo de punto de inflamación

Muestra N°	Punto de inflamación (°C)
1	290.00

**Fuente:** Elaboración propia

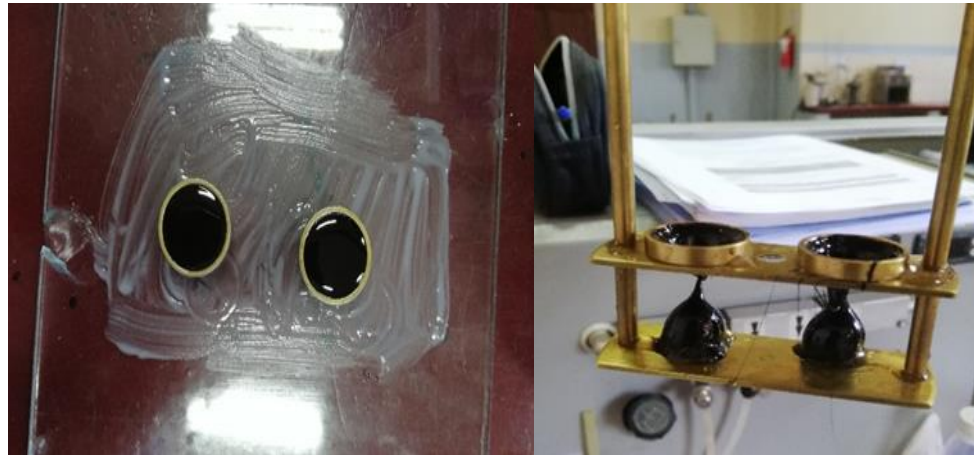
### 3.7.3. Punto de ablandamiento

Los productos bituminosos son materiales visco-elásticos y no cambian del estado sólido al estado líquido a una temperatura definida, sino que se tornan gradualmente más blandos y menos viscosos a medida que se eleva la temperatura. Por esta razón, el punto de ablandamiento se debe determinar por medio de un método arbitrario pero muy definido, que produzca resultados reproducibles y comparables.

Para el ensayo de punto de ablandamiento, se debe seguir el procedimiento según la norma INV E 712 – 13.



**Imagen 3. 13.** Ensayo de punto de ablandamiento del cemento asfáltico



**Leyenda:** Preparación de los anillos con el C.A y visualización del punto de ablandamiento

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 3. 32.** Resultados del ensayo de punto de ablandamiento

Esfera N°	Punto de ablandamiento (°C)	Promedio (°C)
1	46.00	46.25
2	46.50	

**Fuente:** Elaboración propia

#### 3.7.4. Ductilidad

La ductilidad es la capacidad del asfalto para mantenerse conglomerado bajo las deformaciones inducidas por el tránsito. Se puede definir la ductilidad como la distancia máxima en cm que se estira la probeta hasta el instante de la rotura.

Para el ensayo de ductilidad, se debe seguir el procedimiento según la norma INV E 702 – 13.

**Imagen 3. 14.** Ensayo de ductilidad del cemento asfáltico



**Leyenda:** Preparación de las briquetas con C.A y realización del ensayo de ductilidad

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 3. 33.** Resultados del ensayo de ductilidad

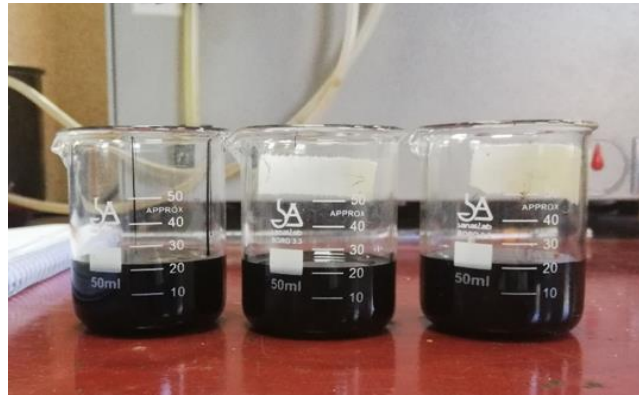
Briqueta N°	Ductilidad (cm)	Promedio (cm)
1	100	110
2	105	
3	125	

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.7.5. Peso específico

Este ensayo sirve para determinar las equivalencias de pesos a volúmenes a la temperatura de aplicación, así como para algunos cálculos necesarios para el diseño de las mezclas asfálticas, puesto que cuando se quiere emplear una cantidad determinada del material caliente, es más fácil medir volúmenes que pesos. Para el ensayo de peso específico, se debe seguir el procedimiento según la norma INV E 707 – 13.

**Imagen 3. 15.** Ensayo de peso específico del cemento



**Leyenda:** Preparación de los vasos volumétricos con C.A

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 3. 34.** Datos del ensayo de peso específico del C.A

Muestra N°	Temperatura (°C)	Peso del frasco "A" (gr)	Peso del frasco + agua "B" (gr)	Peso del frasco parcialmente lleno con asfalto "C" (gr)	Peso del frasco + asfalto + agua "D" (gr)
1	25.00	33.70	85.80	60.80	86.80
2	25.00	36.80	89.30	64.60	90.20
3	25.00	34.90	85.90	90.20	86.20

**Fuente:** Elaboración propia

**Proceso de cálculo:**

$$\text{Peso específico} = \frac{C - A}{(B - A) - (D - C)}$$

$$\text{Peso específico} = \frac{60.80 - 33.70}{(85.80 - 33.70) - (86.80 - 60.80)}$$

$$\text{Peso específico} = 1.04$$

**Peso específico corregido por la temperatura a 25 °C.**

$$\text{Peso específico} = 1.04 * T (25 \text{ °C})$$

$$\text{Peso específico} = 1.04 * 0.99707 \left( \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right)$$

$$\text{Peso específico} = 1.04 \left( \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right)$$

**Tabla 3. 35.** Resultados del ensayo de peso específico del C.A

Muestra N°	Temperatura (°C)	Peso específico	Peso específico (gr/cm <sup>3</sup> )
1	25.00	1.04	1.04
2	25.00	1.03	1.03
3	25.00	1.01	1.00
<b>Promedio</b>		<b>1.03</b>	<b>1.02</b>

Fuente: Elaboración propia

### 3.7.6. Resumen de las características del cemento asfáltico a utilizar

**Tabla 3. 36.** Resumen de resultados de las características del cemento asfáltico

Ensayos realizados al asfalto de grado de penetración 80/100						
Análisis	Unidad	Resultados		Especificación		Norma
				Mín	Máx	
Penetración	mm/10	<b>89.89</b>	Cumple	80	100	INV E – 706 ASTM D 5 - 06
Punto de inflamación	°C	<b>290.00</b>	Cumple	230	–	INV E – 709 ASTM D 92 – 11
Punto de ablandamiento	°C	<b>46.25</b>	Cumple	45	52	INV E – 712 ASTM D 36
Ductilidad	cm	<b>110.00</b>	Cumple	100	–	INV E – 702 ASTM D 113 – 07
Peso Específico	gr/cm <sup>3</sup>	<b>1.022</b>	NE	–	–	INV E – 707 ASTM D 70 - 09

Fuente: Elaboración propia

## 3.8. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DEL GRANO DE CAUCHO RECICLADO DE LLANTA

Información complementaria, ver anexo 3.

### 3.8.1. Granulometría

Se realizó un análisis granulométrico por tamizado para el grano de caucho reciclado de llantas, para observar la incorporación del mismo a la mezcla asfáltica porosa.

Para el ensayo de la granulometría, se debe seguir el procedimiento según la norma INV E – 213 – 13.

**Imagen 3. 16.** Granulometría del grano de caucho reciclado



**Leyenda:** Peso de grano de caucho reciclado y tamizado

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 3. 37.** Datos de la granulometría del grano de caucho reciclado

<b>Masa total = 1000 gr</b>		
<b>Tamices (pulg)</b>	<b>Tamaño (mm)</b>	<b>Peso ret.</b>
1"	25.40	0.00
3/4"	19.00	0.00
1/2"	12.50	0.00
3/8"	9.50	0.00
Nº 4	4.75	0.00
Nº 8	2.36	66.30
Nº 10	2.00	271.60
Nº 16	1.18	499.10
Nº 40	0.43	161.30
Nº 100	0.15	0.40
Nº 200	0.08	0.00
Base	-	0.00
<b>Total</b>		<b>998.70</b>

**Fuente:** Elaboración propia

**Proceso de cálculo:**

$$\% \text{ Que pasa} = 100 - \left( \left( \frac{\text{Peso ret.}}{\text{Peso Total Seco}} \right) * 100 \right)$$

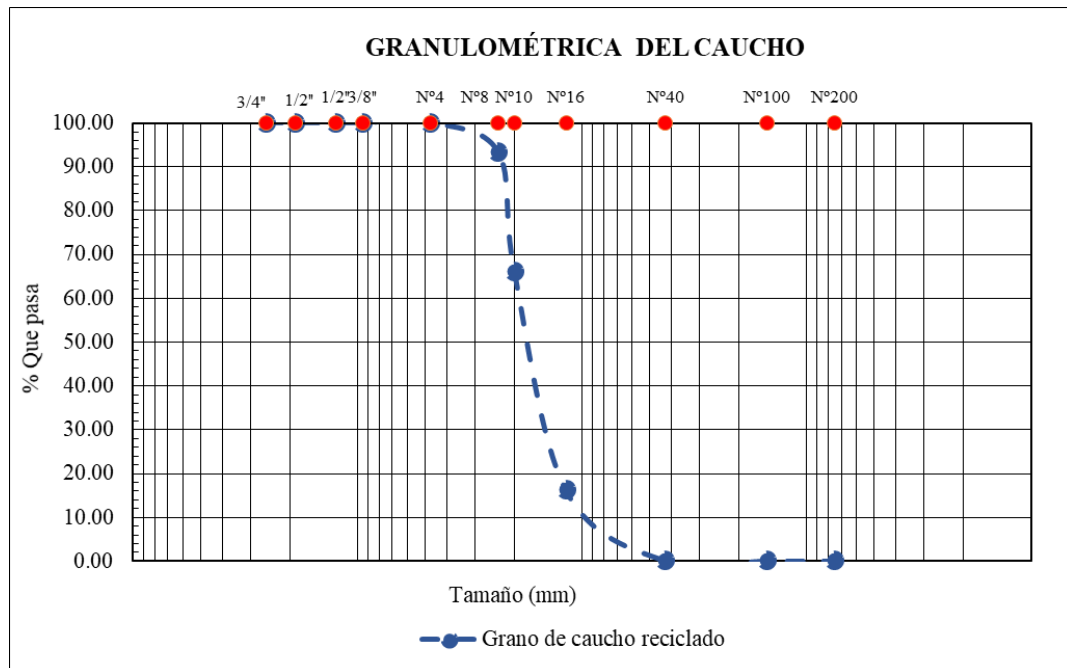
$$\% \text{ Que pasa} = 100 - \left( \left( \frac{66.30}{1000} \right) * 100 \right) = 93.37 (\%)$$

**Tabla 3. 38.** Resultado de la granulometría del grano de caucho reciclado

Tamices (pulg)	Tamaño (mm)	% Que pasa del total
1"	25.4	100.00
3/4"	19.0	100.00
1/2"	12.5	100.00
3/8"	9.50	100.00
Nº 4	4.75	100.00
Nº 8	2.36	93.37
Nº 10	2.00	66.21
Nº 16	1.18	16.30
Nº 40	0.43	0.17
Nº 100	0.15	0.13
Nº 200	0.08	0.13
Base	-	0.13

**Fuente:** Elaboración propia

**Gráfica 3. 5.** Curva granulométrica del grano de caucho reciclado



**Fuente:** Elaboración propia

### 3.8.2. Peso específico

El peso específico del caucho nos servirá como punto de partida para la dosificación de las mezclas porosas, ya que estos materiales nos dan un mayor volumen en relación a su peso.

**Imagen 3. 17.** Ensayo peso específico del caucho reciclado



**Leyenda:** Peso del grano de caucho reciclado e introducido en el matraz

**Fuente:** Elaboración propia

La siguiente fórmula se la obtiene de la calibración del frasco volumétrico, la cual nos servirá para encontrar el peso específico del caucho.

$$y = -0.3403 * x + 693.240$$

**Tabla 3. 39.** Datos del ensayo de peso específico del caucho

Descripción	Ensayo 1				
	Temperatura ensayada (°C)	39.00	30.00	27.00	21.00
Peso del suelo seco $W_s$ (gr)	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00
Peso del frasco + agua * $W_{fw}$ (gr)	679.97	683.03	684.05	686.09	687.11
Peso del frasco + agua + suelo $W_{fsw}$ (gr)	699.10	699.50	699.90	700.10	701.00

**Fuente:** Elaboración propia

#### Proceso de cálculo.

$$W_{fw} = -0.3403 * T + 693.240$$

$$W_{fw} = -0.3403 * 39.00 + 693.240$$

$$W_{fw} = 679.97 \text{ (gr)}$$

$$\text{Peso Específico} = \frac{W_s}{(W_{fw} + W_s - W_{fsw})}$$

$$\text{Peso Específico} = \frac{80.00}{(679.97 + 80.00 - 699.10)}$$

$$\text{Peso Especifico} = 1.31$$

Corregido por temperatura a los 25 °C. El factor de corrección se lo obtiene de la tabla de correcciones de temperatura para el agua.

$$\text{Peso Especifico} = \frac{1.31}{0.9971 \text{ gr/cm}^3}$$

$$\text{Peso Especifico} = 1.32 \left( \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right)$$

**Tabla 3. 40.** Resultados del ensayo de peso específico del caucho

Descripción	Ensayo 1				
Peso específico	1.31	1.26	1.25	1.21	1.21
Factor de corrección K**	0.9971	0.9971	0.9971	0.9971	0.9971
Peso específico corregido (gr/cm <sup>3</sup> )	1.32	1.26	0.62	0.40	1.21
Peso específico promedio (gr/cm <sup>3</sup> )	<b>0.96</b>				

**Fuente:** Elaboración propia



**CAPÍTULO IV**  
**APLICACIÓN, CÁLCULO Y DISEÑO**

## CAPÍTULO IV

### ANÁLISIS, CÁLCULOS Y DISEÑO

#### 4.1. DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS POROSAS

El proceso para preparar las mezclas porosas, consiste en la fabricación de probetas cilíndricas de  $101.60 \pm 0.10$  mm de diámetro y  $63.50 \pm 2.50$  mm de altura; en este caso la cantidad total de agregado es de 1000 gr a diferencia de las muestras para mezclas densas cuyo peso es de 1200 gr. Para este objetivo se pesa sucesivamente las fracciones de cada tipo de agregado hasta obtener la cantidad total requerida promedio de 1050 gr.

#### 4.2. RESUMEN DE RESULTADOS DEL RELEVAMIENTO DE INFORMACIÓN

**Tabla 4. 1.** Resumen de resultados de las características de los agregados

Ensayos realizados sobre los agregados				
Análisis	Resultados	Especificación (INVIAS ART 400)		Norma
Índice de alargamiento de agregados (%)	<b>57.63</b>	Máximo 30	NC	INV E – 240 ASTM D 4791 - 10
Índice de aplanamiento de agregados (%)	<b>21.52</b>	Máximo 30	Cumple	INV E – 240 ASTM D 4791 - 10
Porcentaje de caras fracturadas en los agregados (%)	<b>96.92</b>	Mínimo una cara/dos caras 76/60	Cumple	INV E – 227 ASTM D 5821
Abrasión de agregado grueso máquina de los ángeles (%)	<b>21.10</b>	Máximo 25	Cumple	INV E – 218 ASTM C 131- 06
Peso específico del agregado fino ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	<b>2.57</b>	–	NE	INV E – 222 ASTM C 128- 07a
Peso específico del agregado grueso ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	<b>2.72</b>	–	NE	INV E – 223 ASTM C 127 - 07
Equivalente de arena (%)	<b>74.85</b>	Mínimo 50	Cumple	INV E – 133 ASTM D 2419
Peso específico del filler ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	<b>3.03</b>	-	NE	ASTM C 188 - 95

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4. 2.** Resumen de resultados de las características del cemento asfáltico

<b>Ensayos realizados al asfalto de grado de penetración 80/100</b>						
<b>Análisis</b>	<b>Unidad</b>	<b>Resultados</b>	<b>Especificación</b>		<b>Norma</b>	
			<b>Mín</b>	<b>Máx</b>		
Penetración	mm/10	<b>89.89</b>	Cumple	80	100	INV E – 706 ASTM D 5 - 06
Punto de inflamación	°C	<b>290.00</b>	Cumple	230	–	INV E – 709 ASTM D 92 - 11
Punto de ablandamiento	°C	<b>46.25</b>	Cumple	45	52	INV E – 712 ASTM D 36
Ductilidad	cm	<b>110.00</b>	Cumple	100	–	INV E – 702 ASTM D 113 - 07
Peso Específico	gr/cm <sup>3</sup>	<b>1.022</b>	NE	–	–	INV E – 707 ASTM D 70 - 09

Fuente: Elaboración propia

#### 4.3. CRITERIO Y SELECCIÓN PARA EL NÚMERO DE BRIQUETAS

Para la determinación del contenido óptimo de cemento asfáltico se realizarán briquetas convencionales con el cemento asfáltico 85-100.

Se procederá a su dosificación con la granulometría formada de los agregados, realizando 6 briquetas con cada porcentaje de cemento asfáltico y variando su porcentaje en 0.50 %, hasta el 6.50 %, como se ve en la siguiente Tabla 4.3.

**Tabla 4. 3.** Cantidad de briquetas para el contenido óptimo de C.A

<b>Porcentaje de cemento asfáltico 85-100 (%)</b>	<b>Cantidad de briquetas a realizar</b>
4.00	9
4.50	9
5.00	9
5.50	9
6.00	9
6.50	9
<b>Total briquetas elaboradas</b>	<b>54</b>

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la Tabla 4.3, se procederá a realizar 54 briquetas convencionales, para obtener el porcentaje óptimo de cemento asfáltico 85-100, para una mezcla asfáltica porosa convencional.

Con el criterio de variación del grano de caucho reciclado mostrado en el apartado de la sección 3.3.4, se procederá a realizar briquetas para encontrar el porcentaje óptimo de cemento asfáltico para cada porcentaje de grano de caucho reciclado por vía seca cuyos porcentajes serán, 0.50 %, 0.75 %, 1.00 %, 1.50 %, 2.00 % y 2.50 %, para lo cual se realizaran 3 briquetas para cada porcentaje de cemento asfáltico. Dentro de este rango de porcentajes del grano de caucho reciclado, se encontrará su porcentaje óptimo, para luego realizar 30 briquetas con su contenido óptimo, para estudiar sus propiedades mecánicas.

**Tabla 4. 4.** Total de briquetas a realizar

Descripción		N° de briquetas a realizar
Briquetas, para determinar el porcentaje óptimo de cemento asfáltico.		54
<b>Briquetas con grano de caucho reciclado de llanta (%)</b>	0.50	18
	0.75	18
	1.00	18
	1.50	18
	2.00	18
	2.50	18
Briquetas, con el porcentaje óptimo de grano de caucho reciclado.		36
<b>Total briquetas elaboradas</b>		<b>198</b>

**Fuente:** Elaboración propia

#### 4.4. COMBINACIÓN DE AGREGADOS

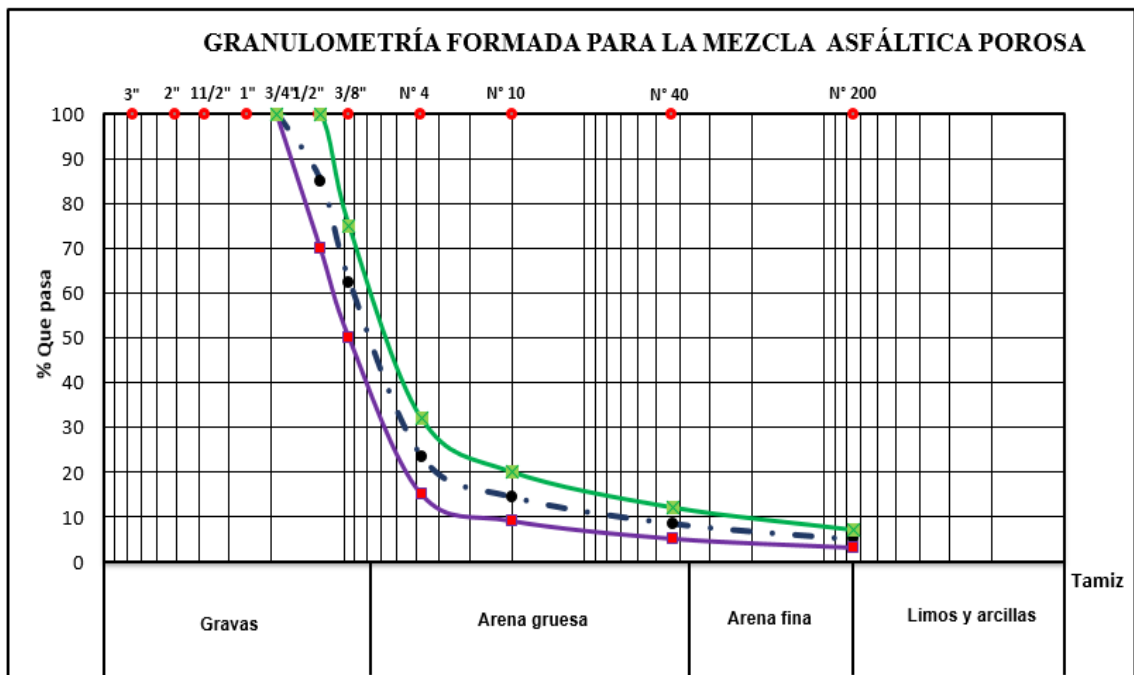
De acuerdo a la combinación de agregados, la línea punteada es la que corresponde a la granulometría del material usado para la presente investigación; las líneas paralelas a esta corresponden a la franja granulométrica para la mezcla porosa según la especificación técnica relacionada en la anterior Tabla 2.2. Como se puede observar, la granulometría del material usado se encuentra en el centro de los límites de la franja, cumpliendo con la gradación requerida.

**Tabla 4. 5.** Combinación de los agregados pétreos

Peso total (gr)					500			A.S.T.M	
Tamices (pulg)	Tamaño (mm)	Peso ret. (gr)	Peso ret. filler (gr)	Total (gr)	Ret. acum. (gr)	% Ret	% que pasa	Banda granulométrica MD-1	
3/4"	19.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>100.00</b>	100.00	100.00
1/2"	12.50	75.00	0.00	75.00	75.00	15.00	<b>85.00</b>	70.00	100.00
3/8"	9.50	112.50	0.00	112.50	187.50	37.50	<b>62.50</b>	50.00	75.00
N° 4	4.75	195.00	0.00	195.00	382.50	76.50	<b>23.50</b>	15.00	32.00
N° 10	2.00	45.00	0.00	45.00	427.50	85.50	<b>14.50</b>	9.00	20.00
N° 40	0.43	30.00	0.00	30.00	457.50	91.50	<b>8.50</b>	5.00	12.00
N° 200	0.08	8.00	9.50	17.50	475.00	95.00	<b>5.00</b>	3.00	7.00
Base	-	25.00	0.00	25.00	500.00	100.00	<b>0.00</b>	-	-

Fuente: Elaboración propia

**Gráfica 4. 1.** Granulometría formada para la mezcla porosa



Fuente: Elaboración propia

#### 4.5. DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE CEMENTO ASFÁLTICO PARA UNA MEZCLA ASFÁLTICA POROSA CONVENCIONAL

##### 4.5.1. Dosificación para la elaboración de briquetas convencionales

Para incorporar el cemento asfáltico se realizó desde el 4.00 % al 6.50 %, aunque en la normativa de INVIAS en su apartado para mezclas drenantes, nos indica que el porcentaje mínimo de cemento asfáltico es de 4.50 %.

Se tomó el porcentaje de cemento asfáltico mínimo del 4.00 % solo para ver el comportamiento que tienen estas mezclas asfálticas. Para más información ver en los anexos 4.

**Tabla 4. 6.** Dosificación para la elaboración de briquetas

Porcentaje de briqueta	100 %
Porcentaje total de cemento asfáltico	X %
Porcentaje total del agregado	100 -X %

Muestra total	1050	Material (%)
Tamiz 1/2"	75.00	15.79
Tamiz 3/8"	112.50	23.68
Tamiz N° 4	195.00	41.05
Tamiz N° 10	45.00	9.47
Tamiz N° 40	30.00	6.32
Tamiz N° 200	8.00	1.68
Filler	9.50	2.00
<b>Total</b>	<b>475.00</b>	<b>100.00</b>

Descripción	Porcentaje de cemento asfáltico en la mezcla					
	4.50 %	4.50 %	5.00 %	5.50 %	6.00 %	6.50 %
Porcentaje de agregado (%)	96.00	95.50	95.00	94.50	94.00	93.50
Peso del cemento asfáltico (gr)	42.00	47.25	52.50	57.75	63.00	68.25
Peso tamiz 1/2" (gr)	159.16	158.33	157.50	156.67	155.84	155.01
Peso tamiz 3/8" (gr)	238.74	237.49	236.25	235.01	233.76	232.52
Peso tamiz N° 4 (gr)	413.81	411.66	409.50	407.34	405.19	403.03
Peso tamiz N° 10 (gr)	95.49	95.00	94.50	94.00	93.51	93.01
Peso tamiz N° 40 (gr)	63.66	63.33	63.00	62.67	62.34	62.01
Peso tamiz N° 200 (gr)	16.98	16.89	16.80	16.71	16.62	16.53
Peso filler (gr)	20.16	20.06	19.95	19.85	19.74	19.64
<b>Peso total de la briqueta (gr)</b>	<b>1050.00</b>	<b>1050.00</b>	<b>1050.00</b>	<b>1050.00</b>	<b>1050.00</b>	<b>1050.00</b>

Fuente: Elaboración propia

Con la dosificación realizada se pesaron por separado las cantidades de agregado necesario para cada porcentaje de asfalto, las cuales se las colocó en bolsas separadas para cada dosificación; esto se realizó para optimizar el tiempo, para el preparado de la mezcla para las briquetas a realizar.

**Imagen 4. 1.** Dosificación para las mezclas asfálticas porosas



**Leyenda:** Pesos del agregado para la dosificación con diferentes porcentajes de C.A

**Fuente:** Elaboración propia

#### **4.5.2. Elaboración de briquetas**

##### **4.5.2.1. Preparación de la mezcla**

Con la dosificación realizada se procede a calentar los agregados en el horno, a una temperatura de 120 a 130 °C; de igual forma, el cemento asfáltico debe ser calentado hasta que tenga una viscosidad que permita un fácil mezclado con los agregados.

Posteriormente son mezclados en un recipiente grande para facilitar su manipulación, controlando la temperatura de mezclado, donde no aparezca escurrimiento del cemento asfáltico y obtener una mezcla homogénea y cubierta totalmente.

Se recomienda durante este periodo mantener la temperatura adecuada y constante, debido a que si se excede el asfalto pierde sus características lo que afectará a los resultados.

**Imagen 4. 2.** Mezclado de los agregados con el cemento asfáltico



**Leyenda:** Mezclado del agregado con el porcentaje de C.A dosificado

**Fuente:** Elaboración propia

#### **4.5.2.2. Compactación de la muestra**

La compactación de las mezclas asfálticas porosas, se realizara con un número de 50 golpes por cara; sin embargo, como el estudio trata del efecto de la porosidad en la estabilidad Marshall y las mezclas asfálticas porosas no se las somete al ensayo de la estabilidad Marshall, se hace necesario tomar un parámetro de estabilidad para su diseño, lo cual está ligado al número de golpes, que se tomó para un tráfico medio, con un número de 75 golpes por cara; cabe recordar que no se tomó como especificaciones técnicas lo indicado en la Tabla 2.3, sino más bien se consideraron como parámetros para su diseño.

Para realizar el proceso de compactación es necesario calentar los moldes a una temperatura de 95 a 150 °C, las dimensiones de los moldes y el martillo de compactación están dados en la normativa de INVIAS INV E – 748 – 13 (Ref. ASTM D 1559). Antes de colocar la muestra en los moldes, estos deben estar engrasados y se debe colocar un papel cubierto de aceite en la base y en el apoyo del martillo de compactación, para evitar que la mezcla se pegue en el molde.



Luego de los 75 golpes en una cara, se saca la parte inferior del molde y se voltea la briqueta para proceder a realizar los 75 golpes nuevamente en la siguiente cara.

Finalmente una vez compactada la muestra por ambas caras se debe dejar enfriar por un periodo que se vea suficiente, para proceder a desmoldarlas con un extractor de muestras.

#### **Imagen 4. 3.** Compactación de la muestra



**Leyenda:** Compactación de la muestra en el molde Marshall.

**Fuente:** Elaboración propia

### **4.5.3. Relevamiento de información de las briquetas realizadas**

#### **4.5.3.1. Alturas y diámetros de las briquetas**

Después de ser desmoldadas las briquetas se procede a tomar el peso de cada una de las briquetas a través de una balanza de 0.1 gr de precisión, cuatro medidas de diámetro y cuatro medidas de altura de las briquetas tomadas por medio de un Vernier.

Las medidas son necesarias para que con el promedio sea obtenido el volumen de la briqueta.

**Imagen 4. 4.** Medición de alturas y diámetros de briquetas



**Leyenda:** Medición de diámetro y alturas de las briquetas

**Fuente:** Elaboración propia

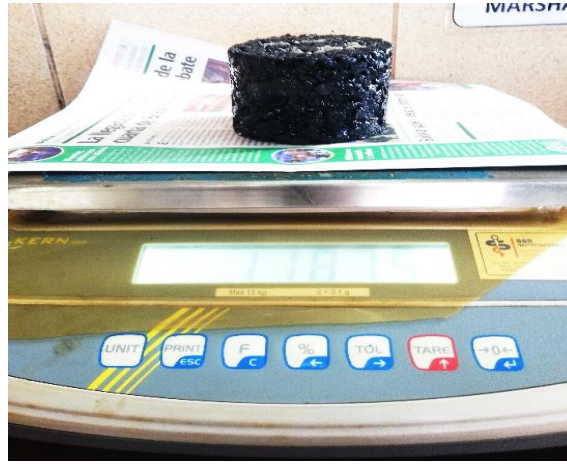
**Tabla 4. 7.** Alturas y diámetros de las briquetas

Ident. de briquetas	C.A (%)	Alturas (cm)	Prom. alturas (cm)	Diámetros (cm)	Prom. diámetros (cm)
B1	4.00	6.47	6.42	10.15	10.16
		6.40		10.16	
		6.35		10.16	
		6.44		10.15	
B2	4.00	6.40	6.40	10.16	10.16
		6.36		10.15	
		6.38		10.15	
		6.44		10.16	
B3	4.00	6.40	6.40	10.15	10.16
		6.39		10.16	
		6.42		10.15	
		6.38		10.16	

**Fuente:** Elaboración propia

#### 4.5.3.2. Pesos de las briquetas

**Imagen 4. 5.** Pesos de las briquetas



**Leyenda:** Determinación del peso de cada briqueta

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 4. 8.** Pesos de las briquetas

Ident. de briquetas	C.A (%)	Pesos de briquetas (gr)
B1	4.00	1021.30
B2		1031.70
B3		1021.90
B4		995.30
B5		1031.20
B6		1000.10

**Fuente:** Elaboración propia

#### 4.5.4. Proceso de cálculo para las briquetas compactadas

Las características principales para el análisis de las mezclas asfálticas porosas es el porcentaje de vacíos, permeabilidad, desgaste cántabro seco y desgaste cántabro húmedo.

Cada briqueta compactada se sometió a los siguientes ensayos:

Densidad bulk.

Densidad máxima teórica.

Vacíos.

Permeabilidad.

Desgaste cántabro seco.

Desgaste cántabro húmedo.

Estabilidad y fluencia.

#### 4.5.4.1. Determinación de la densidad bulk de las probetas compactadas

Se determina la densidad bulk, de cada una de las probetas de la mezcla asfáltica compactada de forma regular, a partir de su masa seca (gr) y de su volumen incluyendo los vacíos permeables (cm<sup>3</sup>).

$$\text{Densidad} = \frac{\text{Masa seca}}{\text{Volumen}}$$

Se mide la altura y diámetro de la briqueta en 4 sitios diferentes con precisión y se saca el promedio de cada medición; con los valores promedio de las alturas y diámetros se calcula el volumen de la briqueta.

$$\text{Volumen} = \frac{\pi * D^2}{4} * h$$

Se convierte la densidad bulk en gravedad específica bulk, dividiendo por 0.99707 gr/cm<sup>3</sup> o 997.07 kg/m<sup>3</sup>, densidad del agua a 25 °C.

$$\text{Geb} = \frac{\text{Densidad bulk}}{0.99707 \text{ gr/cm}^3}$$

A efecto de demostración, se realiza un ejemplo de cálculo:

#### **Briqueta al 4.00 % del contenido de asfalto.**

Peso seco briqueta = 1021.30 kg.

D promedio = 10.16 cm.

h promedio = 6.42 cm.

#### **Cálculo del volumen:**

$$\text{Volumen} = \frac{\pi * D^2}{4} * h$$

$$\text{Volumen} = \frac{\pi * 10.16^2}{4} * 6.42$$

$$\text{Volumen} = 519.57 \text{ (cm}^3\text{)}$$

**Cálculo de la densidad bulk:**

$$\text{Densidad} = \frac{\text{Masa seca}}{\text{Volumen}}$$

$$\text{Densidad} = \frac{1021.30}{519.57}$$

$$\text{Densidad} = 1.97 \left( \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right)$$

Entonces, la gravedad específica bulk (Geb) se calcula dividiendo la densidad bulk por 0.99707 gr/cm<sup>3</sup>, densidad del agua a 25.00 °C.

$$\text{Geb} = \frac{\text{Densidad bulk}}{0.99707}$$

$$\text{Geb} = \frac{1.97}{0.99707}$$

$$\text{Geb} = 1.97 \left( \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right)$$

**Tabla 4. 9.** Resultados de gravedad específica bulk

C.A (%)	Gravedad específica bulk (gr/cm <sup>3</sup> )	Promedio Geb (gr/cm <sup>3</sup> )
4.00	1.97	1.98
	2.00	
	1.98	
	1.94	
	2.01	
	1.99	

**Fuente:** Elaboración propia

Como el proceso de cálculo es similar para las demás briquetas, en los anexos 4, se detallan todas las mediciones, pesos y cálculos realizados.

#### 4.5.4.2. Determinación de la densidad máxima teórica de las probetas compactadas

Para determinar la densidad máxima teórica primero se procede a calcular el promedio del peso específico del agregado total.

$$P. E_{agr} = \frac{100}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \frac{P_3}{G_3} + \dots + \frac{P_n}{G_n}}$$

**Donde:**

$P_1+P_2+P_3+\dots+P_n$  = Porcentaje en peso de cada una de las fracciones de material que intervienen en el total del agregado.

$G_1+G_2+G_3+\dots+G_n$  = Pesos específicos de los materiales a los que corresponde las fracciones del agregado.

Se calcula la densidad máxima teórica de la muestra para cada porcentaje de asfalto, la cual corresponde al que teóricamente se obtendría si fuera posible comprimir la muestra hasta obtener una masa de asfalto y agregados carentes de vacíos con aire.

$$G_{em} = \frac{100}{\frac{\% \text{ agregados}}{P. E_{agr}} + \frac{\% \text{ cemento asfáltico}}{P. E_{C.A}}}$$

A efecto de demostración, se realiza un ejemplo de cálculo:

**Briqueta al 4.00 % del contenido de asfalto.**

Promedio  $P.E_{agr} = 2.75 \text{ gr/cm}^3$ .

$P.E_{C.A} = 1.02 \text{ gr/cm}^3$ .

$$G_{em} = \frac{100}{\frac{\% \text{ agregados}}{P. E_{agr}} + \frac{\% \text{ cemento asfáltico}}{P. E_{C.A}}}$$

$$G_{em} = \frac{100}{\frac{100 - 4.00}{2.75} + \frac{4.00}{1.02}} = 2.58 \left( \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right)$$

#### 4.5.4.3. Porcentaje de vacíos de las briquetas compactadas

El porcentaje de vacíos se calcula con los valores de la gravedad específica bulk y la densidad máxima teórica, para cada contenido de cemento asfáltico.

$$V = 100 * \left(1 - \frac{G_{eb}}{G_{em}}\right)$$

**Donde:**

$G_{eb}$  = Gravedad específica bulk.

$G_{em}$  = Densidad máxima teórica.

A efecto de demostración, se realiza un ejemplo de cálculo:

**Briqueta al 4.00 % del contenido de asfalto.**

$$G_{eb} = 1.97 \text{ gr/cm}^3.$$

$$G_{em} = 2.58 \text{ gr/cm}^3.$$

$$V = 100 * \left(1 - \frac{G_{eb}}{G_{em}}\right)$$

$$V = 100 * \left(1 - \frac{1.97}{2.58}\right) = 23.71 (\%)$$

**Tabla 4. 10.** Resultados de porcentaje de vacíos

C.A (%)	Ident.	Vacíos (%)	Promedio de vacíos (%)
4.00	B1	23.71	23.36
	B2	22.69	
	B3	23.46	
	B4	24.99	
	B5	22.37	
	B6	22.93	

**Fuente:** Elaboración propia

#### 4.5.4.4. Permeabilidad de las briquetas compactadas

En la normativa INVIAS se da una prueba para realizar la permeabilidad, a fin de comprobar que los poros de la mezcla se encuentren interconectados y cumplan su función principal de drenar el agua.

Esta prueba establece que se debe colocar 100 ml de agua sobre la briqueta previamente humedecida; el tiempo que el agua tarda en atravesar la muestra no debe ser mayor a 15 seg.

Para evitar escurrimiento del agua por los costados de la briqueta esta debe estar aún dentro del molde Marshall.

**Imagen 4. 6.** Medición de la permeabilidad



**Leyenda:** Introducción de agua a la briqueta y medición del tiempo de evacuación

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 4. 11.** Resultados de permeabilidad

C.A (%)	Ident.	Tiempo de pre humedecimiento (min)	Permeabilidad (seg)	Promedio de permeabilidad (seg)
4.00	B1	4.00	6.90	7.32
	B2		7.00	
	B3		7.50	
	B4		7.80	
	B5		7.20	
	B6		7.50	

**Fuente:** Elaboración propia

#### 4.5.4.5. Cántabro seco de las briquetas compactadas

Este ensayo nos ayuda a valorar de manera directa la cohesión, trabazón y resistencia a la disgregación de las mezclas, ante efectos de la abrasión y succión originados por la acción del tráfico.



El ensayo se calcula con los valores del peso de la briqueta inicial y el peso de la briqueta final luego del ensayo.

$$\% \text{ Desgaste} = \frac{P_i - P_f}{P_i} * 100$$

$$\% \text{ Desgaste} = \frac{995.30 - 780.90}{995.30} * 100 = \mathbf{21.54 (\%)}$$

**Tabla 4. 12.** Resultados de cántabro seco

C.A (%)	Ident.	Desgaste cántabro seco (%)	Promedio de desgaste cántabro seco (%)
4.00	B4	21.54	21.62
	B5	14.90	
	B6	28.42	

**Fuente:** Elaboración propia

**Imagen 4. 7.** Ensayo de cántabro seco y húmedo



**Leyenda:** Extrayendo la muestra de la máquina de cántabro y resultado después del ensayo

**Fuente:** Elaboración propia

#### 4.5.4.6. Cántabro húmedo de las briquetas compactadas

Este ensayo nos ayudará a comprobar la adhesividad entre el agregado y el material ligante, para obtener una caracterización de la mezcla en presencia del agua.

**Tabla 4. 13.** Resultados de cántabro húmedo

C.A (%)	Ident.	Desgaste cántabro húmedo (%)	Promedio de desgaste cántabro húmedo (%)
4.00	B1	36.46	35.48
	B2	34.10	
	B3	35.87	

**Fuente:** Elaboración propia

#### 4.5.4.7. Estabilidad y fluencia

El diseño de mezclas abiertas o porosas (drenantes) a diferencia del diseño de las mezclas densas, no se basa en la metodología Marshall, pero esta investigación se basó en el estudio del efecto de la porosidad en la estabilidad Marshall incorporando caucho reciclado de llantas a la mezcla asfáltica porosa para determinar sus propiedades mecánicas y de resistencia a la acción del tráfico.

Sin embargo, y aunque no existe una metodología propia de caracterización para las mezclas asfálticas porosas por el método Marshall, se tomaron como parámetros para su diseño y no como especificaciones técnicas lo indicado en la Tabla 2.3.

**Imagen 4. 8.** Ensayo de estabilidad y fluencia



**Leyenda:** Realizando el ensayo de estabilidad y flujo en la prensa Marshall

**Fuente:** Elaboración propia

En la Tabla 4.14, se muestra los valores que se lectura por el ensayo de Marshall.

**Tabla 4. 14.** Resultados del ensayo Marshall

Ident.	C.A (%)	Lectura Dial	
		Estabilidad (mm)	Fluencia (pulg)
B1	4.00	331	12
B2		330	10
B3		335	11
B4	4.50	440	15
B5		450	14
B6		430	15

**Fuente:** Elaboración propia

Una vez obtenidos los valores de la lectura dial de la estabilidad se los transforma en estabilidad real con la siguiente ecuación:

$$\text{Estabilidad real} = (0.012 * \text{Estabilidad (mm)} - 0.0812) * 224.40$$

Ejemplo de cálculo:

$$\text{Estabilidad real} = (0.012 * 331 - 0.0812) * 224.4 = \mathbf{873.10 \text{ lb}}$$

**Tabla 4. 15.** Transformación de la estabilidad en lb

Ident.	Estabilidad (mm)	Estabilidad real (lb)
B1	331	873.10
B2	330	870.40
B3	335	883.87

**Fuente:** Elaboración propia

Una vez obtenidos los valores de la estabilidad, se procede a realizar en ellos las correcciones por la altura de cada briqueta, con la siguiente fórmula:

$$\text{Estabilidad corregida} = \text{Estabilidad} * \text{factor de corrección de altura}$$

**Tabla 4. 16.** Factor de corrección por altura, para la estabilidad Marshall

Volumen de la probeta (cm <sup>3</sup> )	Espesor de la probeta		Factor de corrección (cm)
	(mm)	(pulg)	
200 a 213	25.40	1.00	5.56
2014 a 225	27.00	1.06	5.00
226 a 237	28.60	1.12	4.55
238 a 250	30.20	1.19	4.17
251 a 264	31.80	1.25	3.85
265 a 276	33.30	1.31	3.57
277 a 289	34.90	1.38	3.33
290 a 301	36.50	1.44	3.03
302 a 316	38.10	1.50	2.78
317 a 328	39.70	1.56	2.50
329 a 340	41.30	1.62	2.27
341 a 353	42.90	1.69	2.08
354 a 367	44.40	1.75	1.92
368 a 379	46.00	1.81	1.79
380 a 392	47.60	1.88	1.67
393 a 405	49.20	1.94	1.56
406 a 420	50.80	2.00	1.47
421 a 431	52.40	2.06	1.39
432 a 443	54.00	2.12	1.32
444 a 456	55.60	2.19	1.25
457 a 470	57.20	2.25	1.19
471 a 482	58.70	2.31	1.14
483 a 495	60.30	2.38	1.09
496 a 508	61.90	2.44	1.04
509 a 522	63.50	2.50	1.00

**Fuente:** INVIAS – Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall, INV E – 748 – 13

**Tabla 4. 17.** Factor de corrección por altura de briquetas

Ident.	Promedio de altura (cm)	Factor de corrección por altura
B1	6.42	0.98
B2	6.40	0.99
B3	6.30	1.01

**Fuente:** Elaboración propia

Ejemplo de cálculo:

$$\text{Estabilidad corregida} = 873.10 * 0.98$$

$$\text{Estabilidad corregida} = 857.82 \text{ lb}$$

**Tabla 4. 18.** Estabilidad corregida

Ident.	Estabilidad real (mm)	Factor de corrección	Estabilidad corregida (lb)
B1	873.10	0.98	857.82
B2	870.40	0.99	859.52
B3	883.87	1.01	895.36

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4. 19.** Estabilidad y fluencia real

Ident.	Estabilidad			Fluencia (pulg)	
	Real (lb)	Promedio (lb)	Promedio (kg)	1/100 pulg.	Promedio
B1	857.82	870.90	391.90	12	11.00
B2	859.52			10	
B3	895.36			11	

Fuente: Elaboración propia

#### 4.5.5. Análisis de resultados para encontrar el contenido óptimo de cemento asfáltico

El diseño de las mezclas asfálticas porosas, se basa en el contenido de vacíos, y no en la estabilidad y flujo, como en las mezclas densas. Sin embargo, también se tomará este criterio y con el análisis de las gráficas podremos definir el contenido óptimo de cemento asfáltico para una mezcla asfáltica porosa convencional.

Los ensayos que se realizaron en las diferentes briquetas de las mezclas asfálticas porosas arrojaron resultados mostrados en la Tabla 4.14; en base a estos valores se determinó el contenido óptimo de cemento asfáltico.

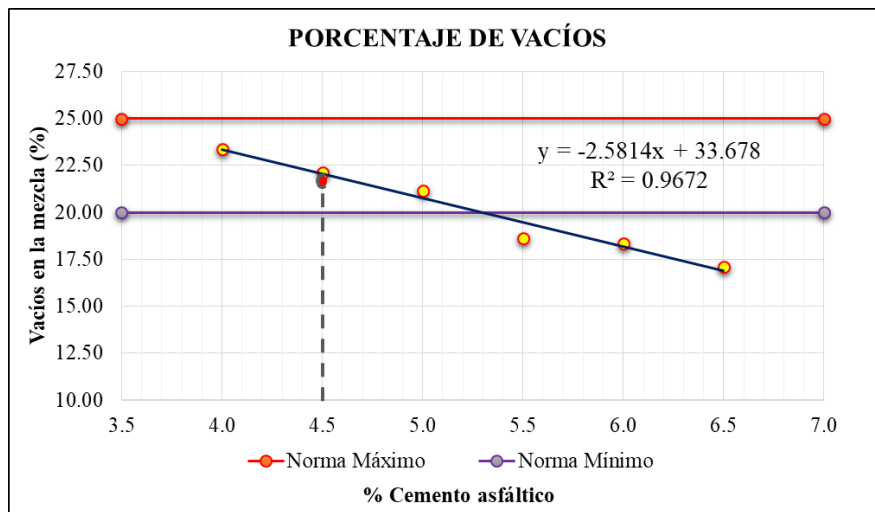
**Tabla 4. 20.** Resumen de resultados de ensayos realizados a las briquetas

Resumen de resultados						
C.A (%)	Vacíos (%)	Desgaste cántabro seco (%)	Desgaste cántabro húmedo (%)	Permeabilidad (seg)	Estabilidad (Kg)	Fluencia (mm)
4.00	23.36	21.62	35.48	7.32	391.90	2.79
4.50	22.15	18.97	31.53	8.18	528.28	3.73
5.00	21.18	17.95	29.58	8.65	702.77	5.08
5.50	18.62	15.08	21.18	11.54	695.55	5.59
6.00	18.34	13.75	19.18	13.72	656.52	6.77
6.50	17.12	7.02	18.85	15.27	623.68	7.54

Fuente: Elaboración propia

En las siguientes gráficas, se puede observar la tabulación de los datos de la tabla anterior para una mejor interpretación, de esta manera se puede apreciar cómo varía el comportamiento de la mezcla asfáltica porosa en cada ensayo dependiendo del contenido del cemento asfáltico.

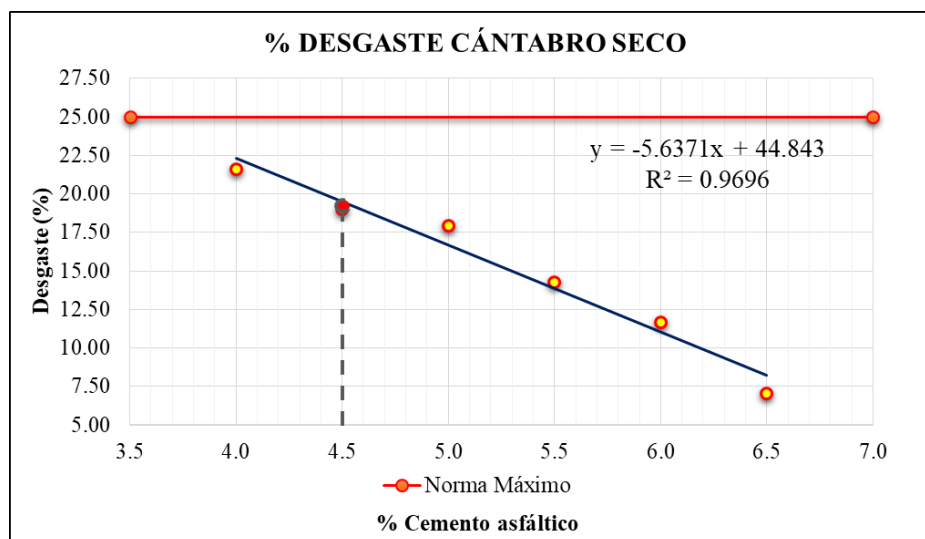
**Gráfica 4. 2.** Porcentajes de vacíos de la mezcla asfáltica porosa



Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la Gráfica 4.2, el porcentaje de vacíos va disminuyendo a medida que se aumenta el porcentaje de cemento asfáltico.

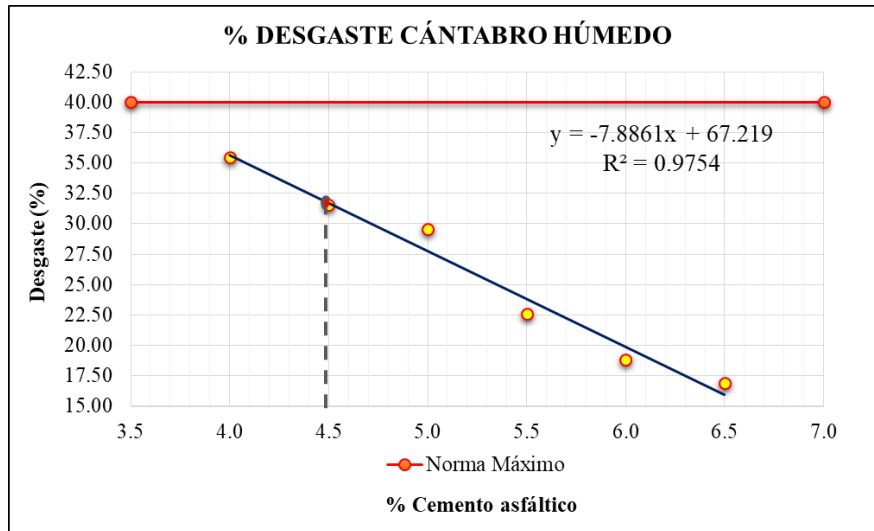
**Gráfica 4. 3.** Desgaste cántabro seco de la mezcla asfáltica porosa



Fuente: Elaboración propia

Se puede observar en la Gráfica 4.3, que para los porcentajes de cemento asfáltico del 4.00 % al 6.50 %, posee una pérdida directa a la cohesión, trabazón y resistencia a la disgregación menor del 25 %, como nos menciona la normativa de INVIAS.

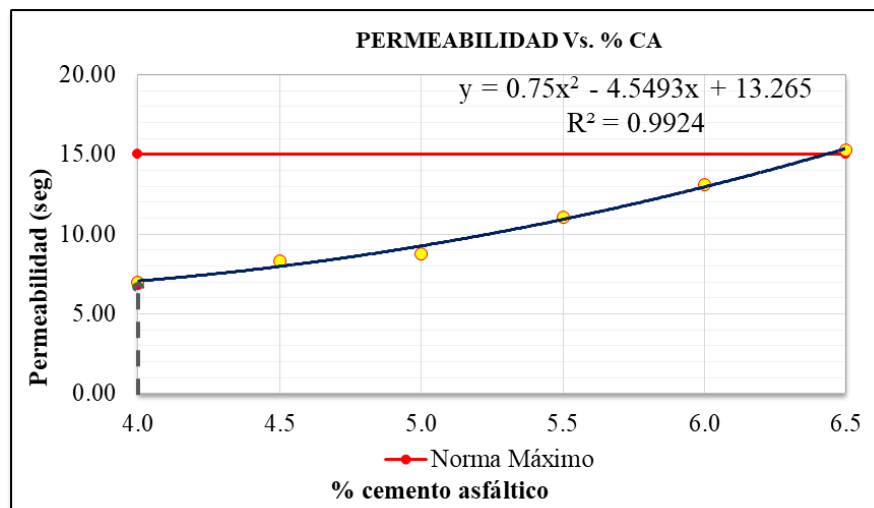
**Gráfica 4. 4.** Desgaste cántabro húmedo de la mezcla asfáltica porosa



**Fuente:** Elaboración propia

Se puede observar en la Gráfica 4.4, que la incorporación de porcentajes de cemento asfáltico del 4.00 % al 6.50 %, poseen una pérdida en adhesividad menor del 40 %, como nos menciona la normativa de INVIAS.

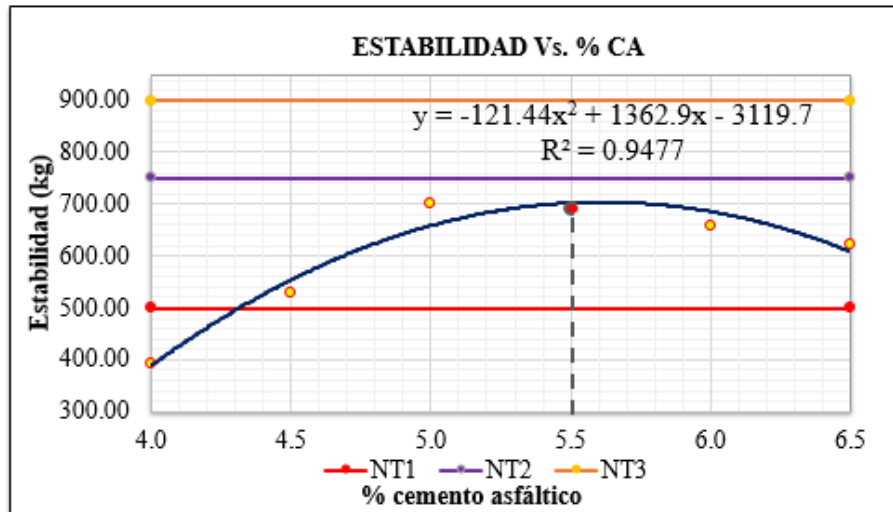
**Gráfica 4. 5.** Permeabilidad de la mezcla asfáltica porosa



**Fuente:** Elaboración propia

Se puede observar en la Gráfica 4.5, que la incorporación de porcentajes de cemento asfáltico del 4.00 % al 6.50 %, poseen una permeabilidad menor del 15 seg, como nos menciona la normativa de INVIAS.

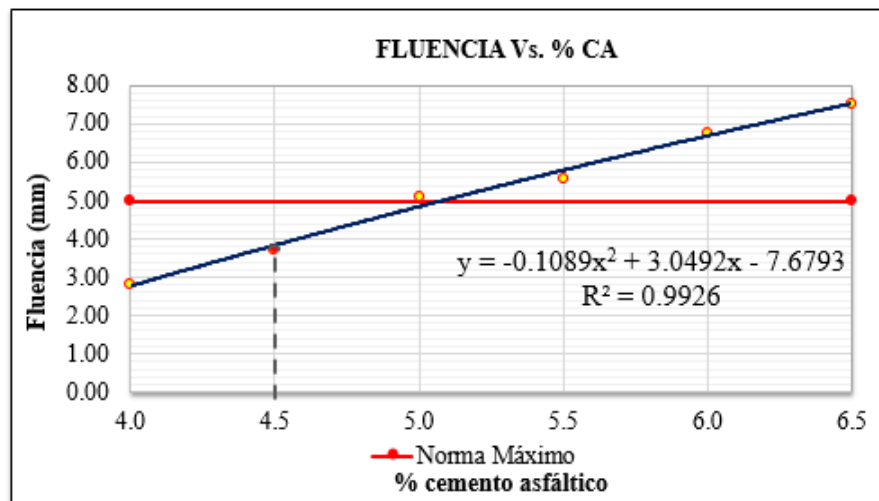
**Gráfica 4. 6.** Estabilidad de la mezcla asfáltica porosa



Fuente: Elaboración propia

En la Gráfica 4.6, se ve que la estabilidad se incrementa entre el 4.00 y 5.50 % de cemento asfáltico; posteriormente reduce bruscamente a partir del 5.50 %

**Gráfica 4. 7.** Fluencia de la mezcla asfáltica porosa



Fuente: Elaboración propia



En la Gráfica 4.7, se ve que la fluencia tiene un comportamiento creciente ya que a medida que se aumenta el cemento asfáltico su valor de fluencia, de igual forma, aumenta.

El porcentaje óptimo de cemento asfáltico, será calculado por el promedio de los siguientes parámetros:

**Tabla 4. 21.** Resumen de resultados del porcentaje óptimo de cemento asfáltico

<b>Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico</b>	<b>Ensayo</b>	<b>Valor de diseño</b>	<b>Valor calculado</b>	<b>C.A (%)</b>
	Permeabilidad (seg)	15.00	6.53	3.50
	Vacíos de la mezcla (%)	20.00	22.15	4.50
	Desgaste cántabro seco (%)	25.00	18.97	4.50
	Desgaste cántabro húmedo (%)	40.00	31.53	4.50
	Estabilidad (Kg)	750.00	702.69	5.50
	Fluencia (mm)	5.00	3.84	4.50
	Porcentaje óptimo de C.A.		Promedio	

**Fuente:** Elaboración propia

#### **4.6. PROCEDIMIENTO DE LA INCORPORACIÓN DEL GRANO DE CAUCHO RECICLADO A LA MEZCLA ASFÁLTICA POROSA**

Primeramente para la incorporación del grano de caucho reciclado se tiene que tener previamente pesados los agregados pétreos con cada dosificación respectivamente.

Luego, una vez que se tiene los pesos de los agregados para cada dosificación, se incorpora el grano de caucho reciclado, para proceder al mezclado de los agregados con el grano de caucho reciclado lo más uniforme posible en una bandeja.

Una vez mezclado se coloca, cada bandeja con su dosificación respectiva al horno a una temperatura de 150 °C a 170 °C, con un tiempo mayor o igual a dos horas, para que se produzca el fenómeno de digestión.

Finalmente, una vez concluido con el tiempo recomendado para su digestión se incorpora el cemento asfáltico previamente calentado, para realizar el mezclado respectivo lo más uniformemente posible y posteriormente someterlo a la compactación.

## 4.7. DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE CEMENTO ASFÁLTICO EN RELACIÓN AL PORCENTAJE DE GRANO DE CAUCHO RECICLADO

### 4.7.1. Dosificación para la elaboración de briquetas con 0.50 % de GCR

**Tabla 4. 22.** Dosificación para la elaboración de briquetas con 0.5 % de GCR

Descripción	Porcentaje de caucho adicional					
	0.50 %					
Porcentaje de C.A (%)	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50
Porcentaje de agregados (%)	96.00	95.50	95.00	94.50	94.00	93.50
Peso de C.A óptimo (gr)	42.00	47.25	52.50	57.75	63.00	68.25
Peso tamiz 1/2" (gr)	159.16	158.33	157.50	156.67	155.84	155.01
Peso tamiz 3/8" (gr)	238.74	237.49	236.25	235.01	233.76	232.52
Peso tamiz N° 4 (gr)	413.81	411.66	409.50	407.34	405.19	403.03
Peso tamiz N° 10 (gr) 34 % GCR	93.71	93.21	92.72	92.22	91.72	91.22
Peso tamiz N° 40 (gr) 66 % GCR	60.20	59.87	59.54	59.20	58.87	58.54
Peso tamiz N° 200 (gr)	16.98	16.89	16.80	16.71	16.62	16.53
Peso filler (gr)	20.16	20.06	19.95	19.85	19.74	19.64
Peso del caucho (gr)	5.25	5.25	5.25	5.25	5.25	5.25
<b>Peso total, briqueta (gr)</b>	<b>1050.00</b>	<b>1050.00</b>	<b>1050.00</b>	<b>1050.00</b>	<b>1050.00</b>	<b>1050.00</b>

Fuente: Elaboración propia

### 4.7.2. Elaboración de briquetas

En este punto es el mismo procedimiento que el apartado 4.5.2, pero donde se incorpora el grano de caucho reciclado (GCR) de llantas a la mezcla asfáltica porosa, tal como lo muestra la Imagen 4.9.

**Imagen 4. 9.** Mezcla con el porcentaje de GCR



Fuente: Elaboración propia

### 4.7.3. Relevamiento de información de las briquetas realizadas

#### 4.7.3.1. Alturas y diámetros de las briquetas

En este punto es el mismo procedimiento que del apartado 4.5.3.1.

**Tabla 4. 23.** Alturas y diámetros de las briquetas con 0.50 % de GCR

Ident. de briquetas	C.A (%)	Alturas (cm)	Prom. alturas (cm)	Diámetros (cm)	Prom. diámetros (cm)
B1	4.00	6.40	6.40	10.16	10.16
		6.39			
		6.40			
		6.40			
B2	4.00	6.40	6.40	10.16	10.16
		6.40			
		6.45			
		6.35			
B3	4.00	6.30	6.30	10.16	10.16
		6.30			
		6.30			
		6.30			

Fuente: Elaboración propia

#### 4.7.3.2. Pesos de las briquetas

**Tabla 4. 24.** Pesos de las briquetas con 0.50 % de GCR

Ident. de briquetas	C.A (%)	Pesos de briquetas (gr)
B1	4.50	1018.00
B2		1010.00
B3		998.00

Fuente: Elaboración propia

### 4.7.4. Proceso de cálculo para las briquetas compactadas

Las características principales del ensayo Marshall son los análisis de densidad, vacíos, permeabilidad, estabilidad y fluencia.

En el método de Marshall, cada briketa compactada se sometió a los siguientes ensayos:

Densidad bulk.

Densidad máxima teórica.

Vacíos.

Permeabilidad.

Estabilidad y fluencia.

#### 4.7.4.1. Determinación de la densidad bulk de las probetas compactadas

Es el mismo procedimiento que el apartado 4.5.4.1.

**Tabla 4. 25.** Gravedad específica bulk de las briquetas con 0.50 % de GCR

C.A (%)	Gravedad específica bulk (gr/cm <sup>3</sup> )	Promedio G <sub>eb</sub> (gr/cm <sup>3</sup> )
4.00	1.97	1.96
	1.95	
	1.96	

Fuente: Elaboración propia

#### 4.7.4.2. Determinación de la densidad máxima teórica de las probetas compactadas

Es el mismo procedimiento que el apartado 4.5.4.2.

#### 4.7.4.3. Porcentaje de vacíos de las briquetas compactadas

Es el mismo procedimiento que el apartado 4.5.4.3.

**Tabla 4. 26.** Porcentaje de vacíos con 0.50 % de GCR

C.A (%)	Ident.	Vacíos (%)	Promedio de vacíos (%)
4.00	B1	23.85	24.16
	B2	24.45	
	B3	24.16	

Fuente: Elaboración propia

#### 4.7.4.4. Permeabilidad de las briquetas compactadas

Es el mismo procedimiento que el apartado 4.5.4.4.

**Tabla 4. 27.** Permeabilidad de las briquetas con 0.50 % de GCR

C.A (%)	Ident.	Tiempo de pre humedecimiento (min)	Permeabilidad (seg)	Promedio de permeabilidad (seg)
4.00	B1	4.00	6.00	6.17
	B2		6.50	
	B3		6.00	

Fuente: Elaboración propia

#### 4.7.4.5. Estabilidad y fluencia de las briquetas compactadas

Es el mismo procedimiento que el apartado 4.5.4.7.

**Tabla 4. 28.** Estabilidad y fluencia real de briquetas con 0.50 % de GCR

Ident.	Estabilidad			Fluencia (pulg)	
	Real (lb)	Promedio (lb)	Promedio (kg)	1/100 pulg.	Promedio
B1	1045.66	1189.91	535.46	15	17.67
B2	1178.62			18	
B3	1345.45			20	

Fuente: Elaboración propia

#### 4.7.5. Análisis de resultados para encontrar el contenido óptimo de cemento asfáltico en relación al porcentaje de grano de caucho reciclado

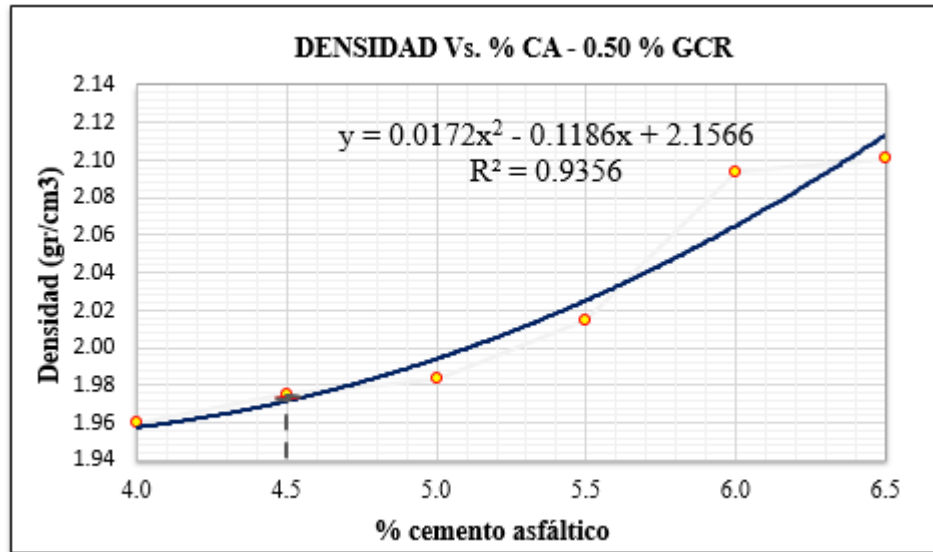
Los ensayos que se realizaron en las diferentes briquetas de las mezclas asfálticas porosas arrojaron resultados mostrados en la Tabla 4.29; en base a estos valores se determinó el porcentaje óptimo de grano de caucho reciclado.

**Tabla 4. 29.** Resumen de resultados de ensayos realizados con 0.50 % de GCR

Resumen de resultados						
C.A. (%)	GCR (%)	Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	Vacíos (%)	Estabilidad (kg)	Fluencia (mm)	Permeabilidad (seg)
4.00	0.50	1.96	24.16	535.46	4.49	6.17
4.50	0.50	1.98	22.95	672.07	5.00	6.53
5.00	0.50	1.98	22.03	656.22	5.25	7.63
5.50	0.50	2.01	20.16	586.80	5.42	9.50
6.00	0.50	2.09	16.40	507.14	5.50	11.47
6.50	0.50	2.10	15.47	317.11	5.59	14.17

Fuente: Elaboración propia

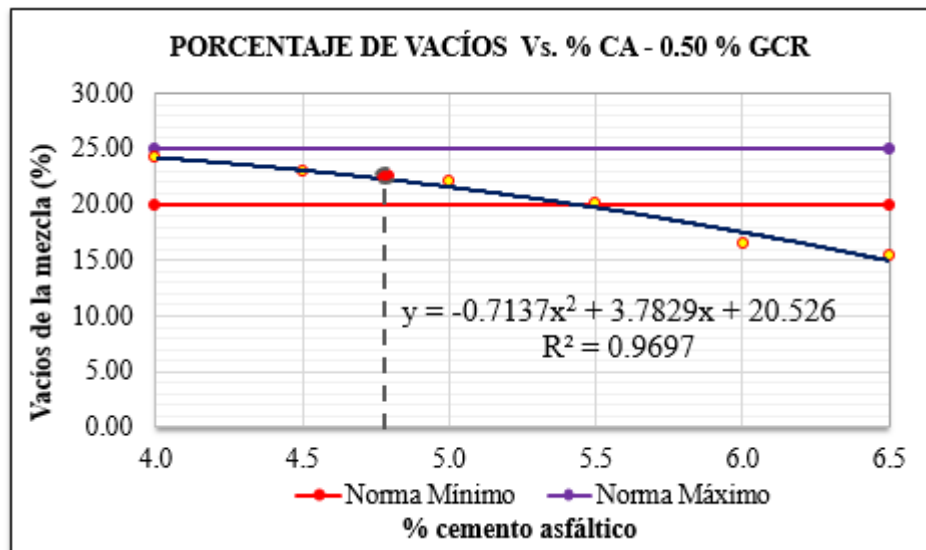
**Gráfica 4. 8.** Densidad Vs. porcentaje de cemento asfáltico



Fuente: Elaboración propia

Se puede observar en la Gráfica 4.8, que la densidad con el aumento del porcentaje de cemento asfáltico va aumentando, esto sucede porque a menor porcentaje de vacío, mayor será la densidad.

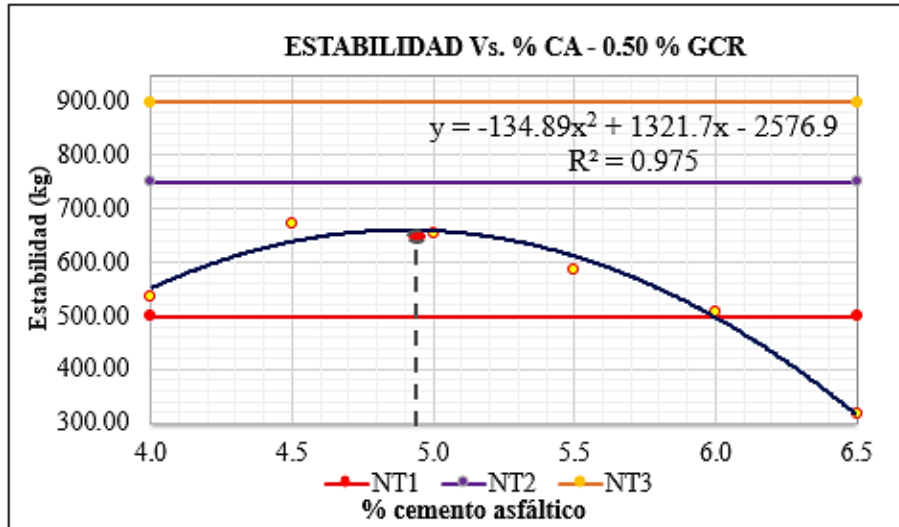
**Gráfica 4. 9.** Porcentaje de vacíos Vs. porcentaje de cemento asfáltico



Fuente: Elaboración propia

Se puede observar en la Gráfica 4.9, que el porcentaje de vacíos, con el aumento del porcentaje de cemento asfáltico va en descenso.

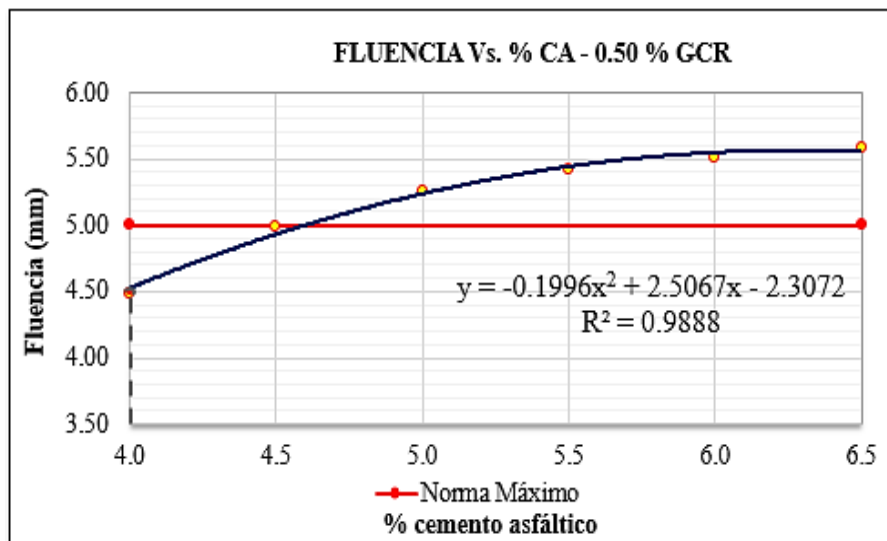
**Gráfica 4. 10.** Estabilidad Vs. porcentaje de cemento asfáltico



**Fuente:** Elaboración propia

En la Gráfica 4.10, se ve que la estabilidad se incrementa entre el 4.00 y 4.50 % de adición de cemento asfáltico, posteriormente reduce bruscamente a partir del 4.50 % de adición del cemento asfáltico.

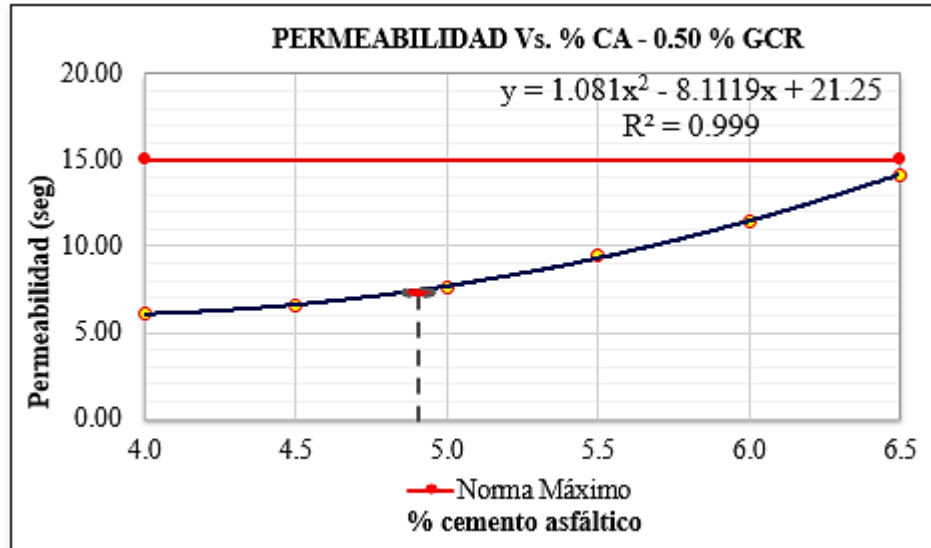
**Gráfica 4. 11.** Fluencia Vs. porcentaje de cemento asfáltico



**Fuente:** Elaboración propia

En la Gráfica 4.11, se ve que la fluencia tiene un comportamiento creciente que a medida que se aumenta el cemento asfáltico su valor de fluencia de igual forma aumenta.

**Gráfica 4. 12.** Permeabilidad Vs. porcentaje de cemento asfáltico



**Fuente:** Elaboración propia

En la Gráfica 4.12, se ve que la permeabilidad tiene un comportamiento que a medida que aumenta el cemento asfáltico su tiempo de evacuación del agua aumenta; sin embargo está por debajo de lo normado por las especificaciones de la normativa INVIAS.

Con el análisis de las gráficas podemos definir nuestro contenido óptimo de cemento asfáltico y también determinar el contenido óptimo de grano de caucho reciclado, lo cual para determinar el contenido óptimo se realiza un promedio de los óptimos parciales de cada gráfica, como se muestra a continuación:

**Tabla 4. 30.** Resultados del porcentaje óptimo de grano de caucho reciclado

Determinación del porcentaje óptimo de cemento asfáltico en relación al porcentaje de grano de caucho reciclado	Ensayo	Valor de diseño	Valor calculado	C.A (%)
	Densidad específica (gr/cm <sup>3</sup> )	-	1.97	4.50
	Vacíos de la mezcla (%)	20.00	22.24	4.80
	Estabilidad Marshall (kg)	750.00	660.71	4.89
	Fluencia (mm)	5.00	4.53	4.00
	Permeabilidad (seg)	15.00	7.46	4.90
	Porcentaje óptimo de GCR	Promedio		<b>4.62</b>

**Fuente:** Elaboración propia



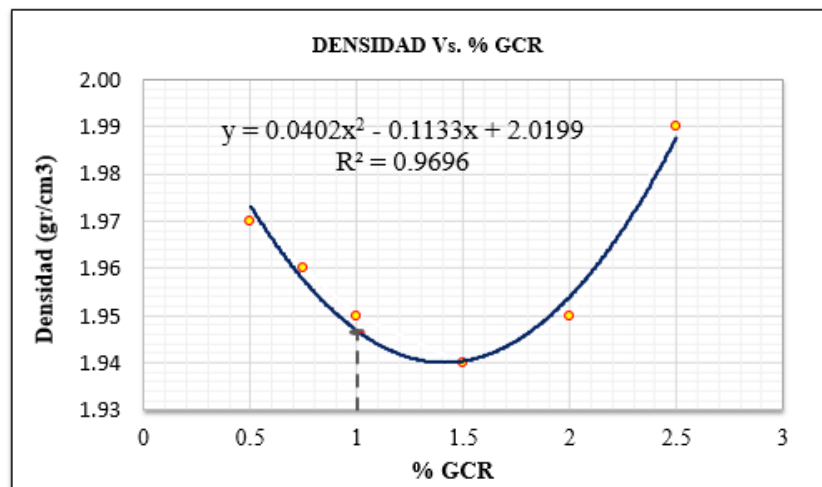
Para encontrar los demás porcentajes de cemento asfáltico en relación al porcentaje de grano de caucho reciclado, se realiza el mismo procedimiento mencionado desde el apartado 4.7. A continuación se muestra una tabla de resultados de cada porcentaje óptimo de cemento asfáltico en relación a su porcentaje de grano de caucho reciclado. Información complementaria ver anexos 4.

**Tabla 4. 31.** Porcentajes óptimos de cementos asfálticos en relación al GCR

Óptimo C.A (%)	Óptimo GCR (%)	Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	Vacíos (%)	Estabilidad (Kg)	Fluencia (mm)	Permeabilidad (Seg)
4.62	0.50	1.97	22.24	660.71	4.53	7.46
4.60	0.75	1.96	22.42	688.35	4.85	7.26
4.50	1.00	1.95	22.93	705.05	4.80	5.97
4.68	1.50	1.94	22.59	654.09	4.85	7.58
4.56	2.00	1.95	22.20	619.00	4.96	7.75
4.68	2.50	1.99	22.44	500.15	7.14	8.83

Fuente: Elaboración propia

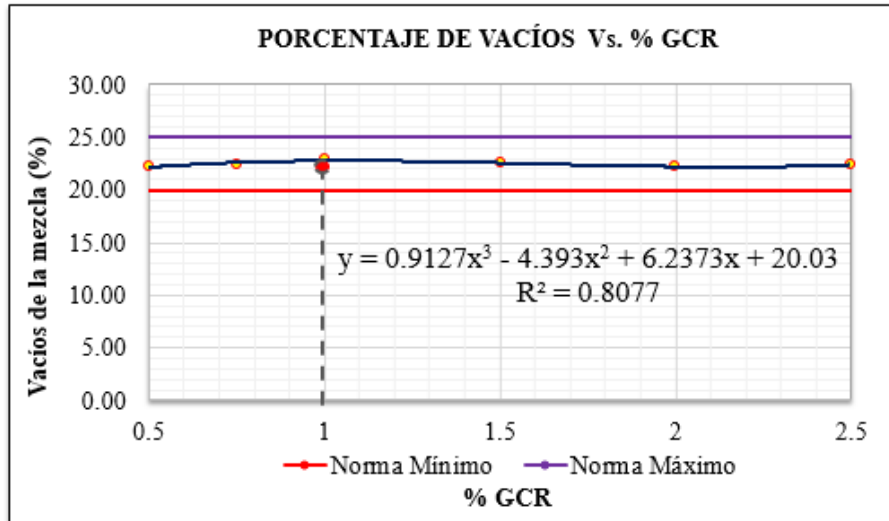
**Gráfica 4. 13.** Densidades con porcentajes óptimos de grano de caucho reciclado



Fuente: Elaboración propia

Se puede observar en la Gráfica 4.13, que la densidad con el aumento del porcentaje de grano de caucho reciclado empieza a disminuir, esto sucede porque a mayor porcentajes de vacíos menores serán la densidades, como también se puede observar que a partir del 1.50 %, incorporación del grano de caucho, este empieza a aumentar, esto sucede porque a menor porcentaje de vacío, mayor será la densidad.

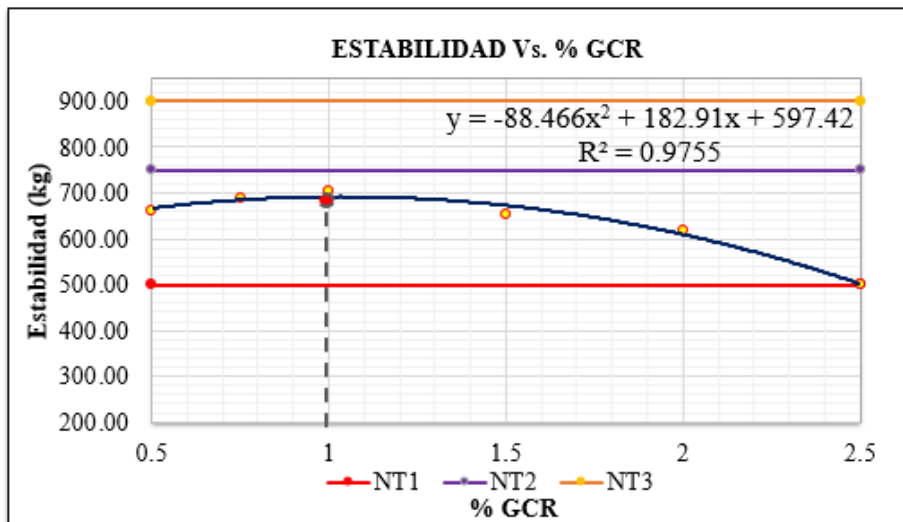
**Gráfica 4. 14.** Vacíos con porcentajes óptimos de grano de caucho reciclado



Fuente: Elaboración propia

Se puede observar en la Gráfica 4.14, que los porcentajes de vacíos con los diferentes porcentajes de adición del grano de caucho reciclado se mantienen dentro del rango dado por las especificaciones de la normativa INVIAS.

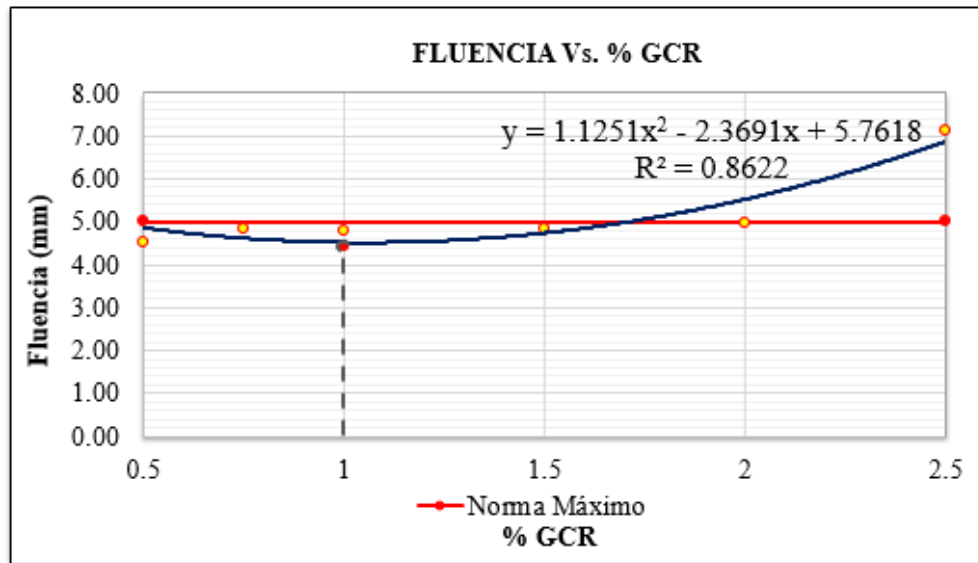
**Gráfica 4. 15.** Estabilidad con porcentajes óptimos de grano de caucho reciclado



Fuente: Elaboración propia

En la Gráfica 4.15, se ve que la estabilidad se incrementa entre el 0.50 y 1.00 % de adición de grano de caucho reciclado, posteriormente reduce bruscamente a partir del 1.00 % de adición del grano de caucho reciclado.

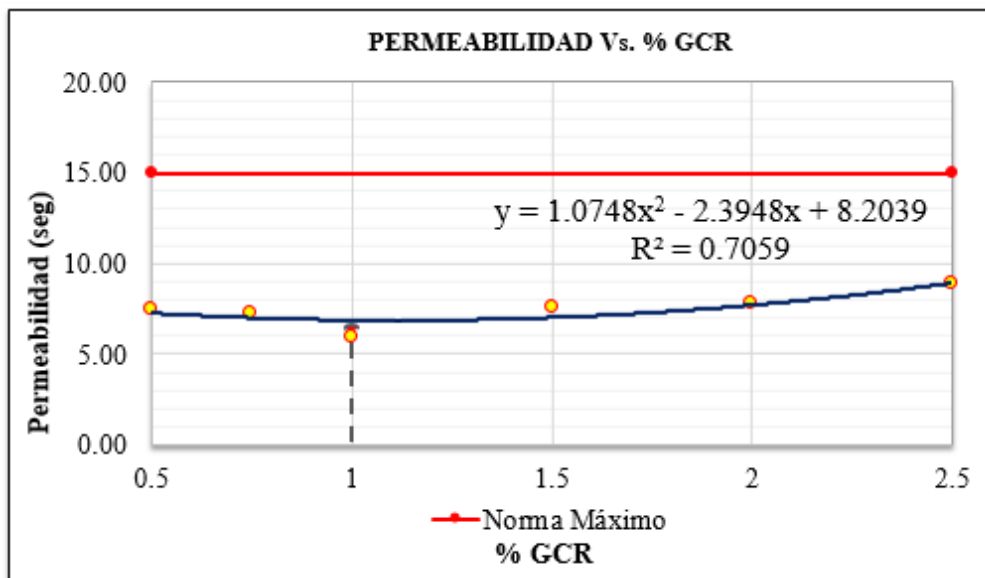
**Gráfica 4. 16.** Fluencia con porcentajes óptimos de grano de caucho reciclado



Fuente: Elaboración propia

En la Gráfica 4.16, se ve que la fluencia tiene un comportamiento creciente que a medida que se aumenta el grano de caucho reciclado su valor de fluencia de igual forma aumenta.

**Gráfica 4. 17.** Permeabilidad con porcentajes óptimos de grano de caucho reciclado



Fuente: Elaboración propia

En la Gráfica 4.17, se ve que la permeabilidad tiene un comportamiento que a medida que se aumenta la incorporación del grano de caucho reciclado, el tiempo de evacuación del

agua aumenta; sin embargo, está por debajo de lo normado por las especificaciones de la normativa INVIAS.

Realizando un análisis comparativo de cada gráfica, podemos observar que para un porcentaje del 1.00 % del grano de caucho reciclado y el 4.50 % de cemento asfáltico presenta mejoras en sus propiedades mecánicas en relación a los demás porcentajes por lo cual concluimos que el porcentaje óptimo de grano de caucho reciclado en la mezcla asfáltica porosa es del 1.00 %.

#### **4.8. ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS PARA EL DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA POROSA CON GRANO DE CAUCHO RECICLADO DE LLANTAS POR PROCESO DE VÍA SECA**

La dosificación para el contenido óptimo de grano de caucho reciclado, se puede obtener de los anexos 4.

Una vez encontrado el porcentaje óptimo de grano de caucho reciclado y del cemento asfáltico se procedió a realizar 30 briquetas para el diseño de la mezcla asfáltica porosa, para luego someterla a los ensayos correspondientes de densidad, porcentaje de vacíos, estabilidad, flujo y permeabilidad.

Como se mencionó en el capítulo 2, en el apartado 2.2.9, estas mezclas se diseñan con los ensayos de cántabro seco, cántabro húmedo, y no con el ensayo de estabilidad Marshall, pero como el objetivo de la investigación trata de ver el efecto de la porosidad en la estabilidad Marshall se las someten a esos ensayos.

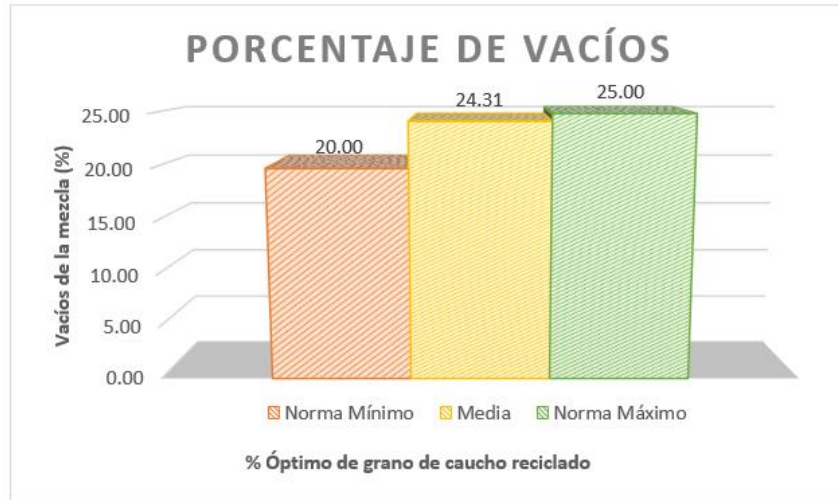
Sin embargo, para su control se elaboraron 6 briquetas más para someterlas a cántabro seco, cántabro húmedo y ver si sus características cumplen con lo estimulado por la normativa de INVIAS Art. – 453.

**Tabla 4. 32.** Resultados del diseño de la mezcla asfáltica porosa, con GCR

<b>Resumen de resultados del diseño de la mezcla asfáltica porosa, con GCR</b>							
<b>N°</b>	<b>C.A Óptimo (%)</b>	<b>GCR óptimo (%)</b>	<b>Densidad (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Vacíos (%)</b>	<b>Estabilidad (kg)</b>	<b>Fluencia (mm)</b>	<b>Permeabilidad (seg)</b>
1	4.50	1.00	1.93	24.75	757.92	5.59	7.00
2	4.50	1.00	1.92	24.86	759.96	5.33	6.50
3	4.50	1.00	1.94	24.39	765.87	5.08	6.20
4	4.50	1.00	1.93	24.79	773.60	5.33	6.00
5	4.50	1.00	1.93	24.77	757.63	4.57	6.80
6	4.50	1.00	1.95	23.95	754.11	6.35	8.00
7	4.50	1.00	1.93	24.57	754.05	7.11	7.00
8	4.50	1.00	1.95	23.78	763.50	7.62	6.90
9	4.50	1.00	1.92	25.13	755.28	5.08	6.50
10	4.50	1.00	1.88	26.48	761.88	5.59	6.00
11	4.50	1.00	1.94	24.06	756.46	5.33	5.90
12	4.50	1.00	1.91	25.43	730.81	6.10	6.00
13	4.50	1.00	1.91	25.45	732.32	5.33	6.20
14	4.50	1.00	1.97	23.23	808.53	6.86	6.50
15	4.50	1.00	1.94	24.07	745.38	5.59	6.90
16	4.50	1.00	1.96	23.56	692.16	6.35	6.90
17	4.50	1.00	1.96	23.55	771.77	5.08	6.00
18	4.50	1.00	2.01	21.32	778.86	5.33	6.40
19	4.50	1.00	1.90	25.81	633.64	7.11	7.00
20	4.50	1.00	1.90	25.68	750.22	6.35	6.50
21	4.50	1.00	1.91	25.24	720.58	5.59	6.80
22	4.50	1.00	2.00	21.68	762.32	6.35	7.90
23	4.50	1.00	1.95	23.99	754.88	6.10	6.90
24	4.50	1.00	1.96	23.59	755.81	5.59	6.90
25	4.50	1.00	1.96	23.54	754.05	5.08	7.00
26	4.50	1.00	1.94	24.05	765.84	5.59	7.50
27	4.50	1.00	1.92	24.82	745.38	6.35	7.80
28	4.50	1.00	1.93	24.62	680.69	3.81	7.80
29	4.50	1.00	1.94	24.07	751.18	5.08	7.90
30	4.50	1.00	1.93	24.71	748.25	5.33	6.00
<b>Media</b>			<b>1.94</b>	<b>24.31</b>	<b>747.39</b>	<b>5.68</b>	<b>6.76</b>
Especificaciones		Mínimo	-	<b>20.00</b>	<b>750.00</b>	<b>3.00</b>	-
		Máximo	-	<b>25.00</b>	-	<b>5.00</b>	<b>15.00</b>

**Fuente:** Elaboración propia

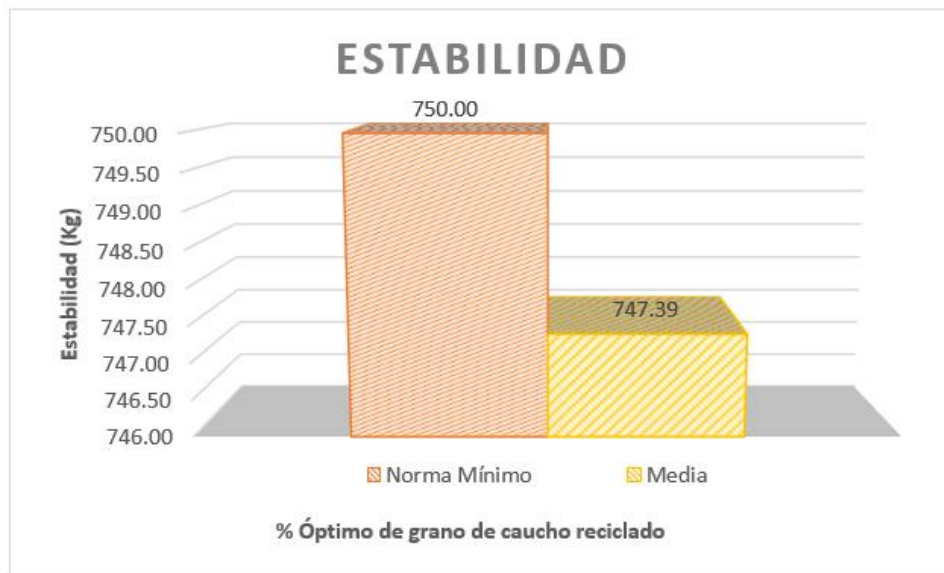
**Gráfica 4. 18.** Comparación de porcentaje de vacíos



**Fuente:** Elaboración propia

Como se puede observar en la Gráfica 4.18, el valor de la media aritmética del porcentaje de vacíos es menor al valor máximo permitido por la normativa INVIAS, el cual damos como satisfactorio para el diseño de la mezcla asfáltica porosa.

**Gráfica 4. 19.** Comparación de estabilidad

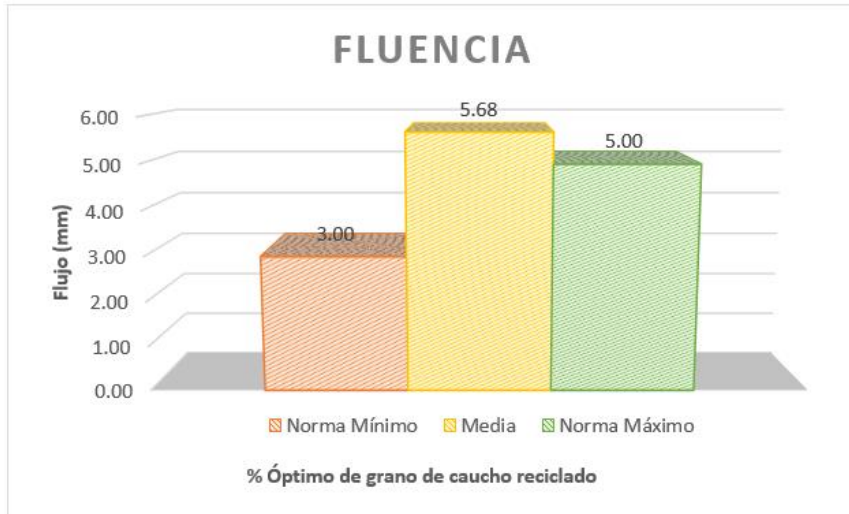


**Fuente:** Elaboración propia

Como se puede observar en la Gráfica 4.19, el valor de la media aritmética de la estabilidad es menor al valor mínimo permitido por la normativa INVIAS, el cual damos

como no satisfactorio para el diseño de la mezcla asfáltica porosa, para trafico medio, sin embargo podemos ver que si cumple para trafico liviano.

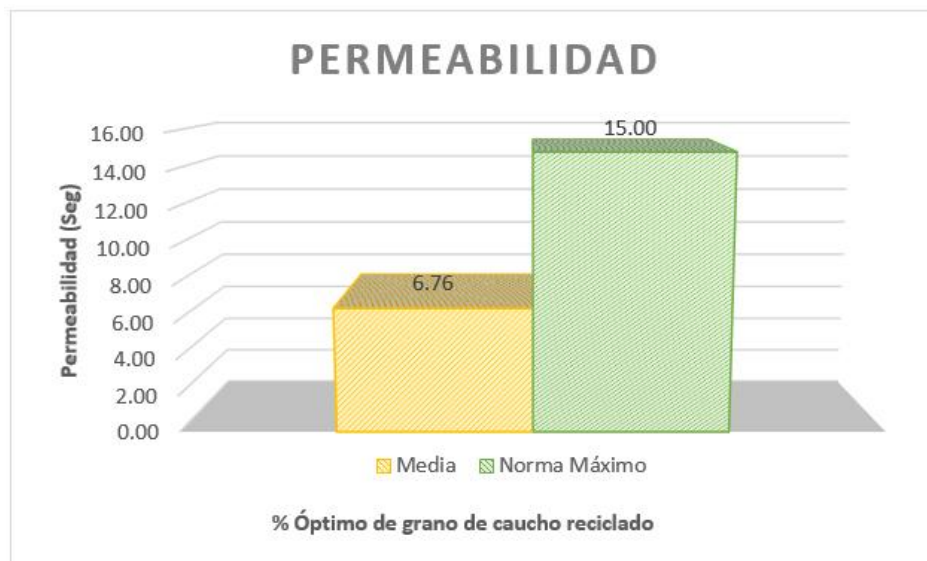
**Gráfica 4. 20.** Comparación de flujo



**Fuente:** Elaboración propia

Como se puede observar en la Gráfica 4.20, el valor de la media aritmética de la fluencia es menor al valor mínimo permitido por la normativa INVIAS, el cual damos como no satisfactorio para el diseño de la mezcla asfáltica porosa.

**Gráfica 4. 21.** Comparación de permeabilidad



**Fuente:** Elaboración propia

Como se puede observar en la Gráfica 4.21, el valor de la media aritmética de la permeabilidad es menor al valor máximo permitido por la normativa INVIAS, el cual damos como satisfactorio para el diseño de la mezcla asfáltica porosa.

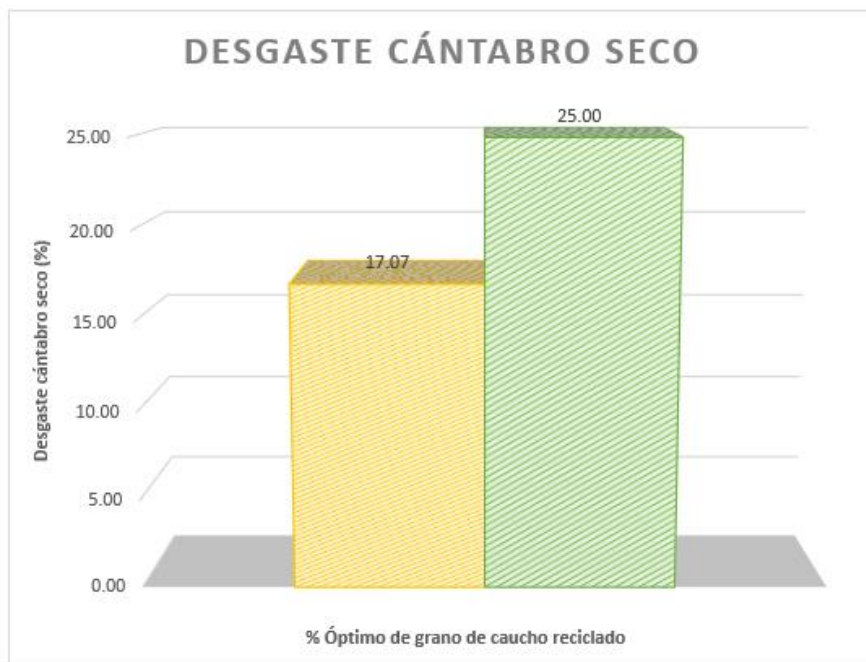
**Tabla 4. 33.** Resultados de cántabro para el diseño de la mezcla asfáltica porosa, con GCR

C.A (%)	GCR óptimo (%)	Desgaste cántabro seco (%)	Desgaste cántabro húmedo (%)
4.50	1.00	17.07	-
4.50	1.00	-	31.58

**Fuente:** Elaboración propia

A continuación se realizará un análisis de los resultados.

**Gráfica 4. 22.** Desgaste de cántabro seco con GCR

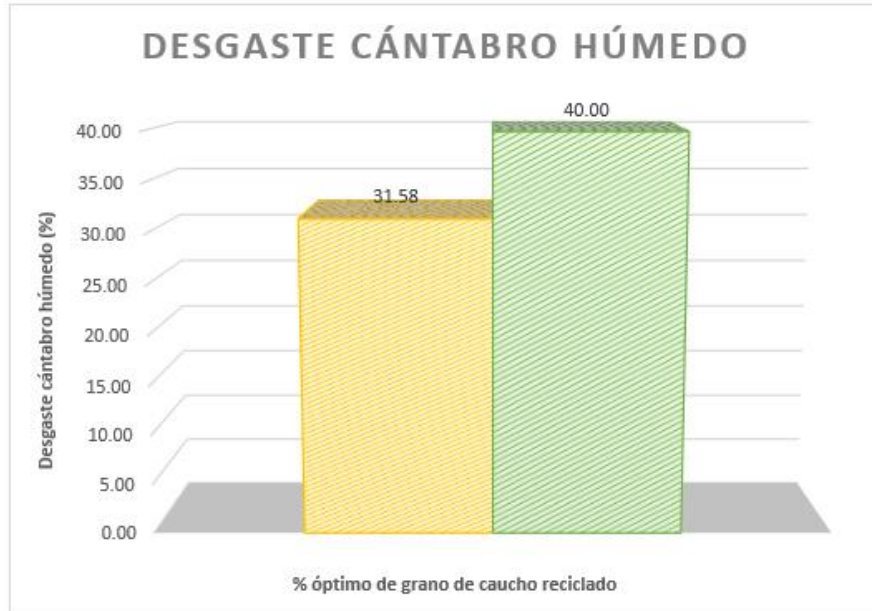


**Fuente:** Elaboración propia

Como se puede observar en la Gráfica 4.22, el porcentaje que nos dio el ensayo de cántabro seco está por debajo de lo especificado por la normativa, dando así validez a nuestro resultado obtenido para nuestro diseño.



**Gráfica 4. 23.** Desgaste de cántabro húmedo con GCR



**Fuente:** Elaboración propia

Como se puede observar en la Gráfica 4.23, el porcentaje que nos dio el ensayo de cántabro húmedo está por debajo de lo especificado por la normativa, dando así validez a nuestro resultado obtenido para nuestro diseño.

#### **4.9. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS**

Para el análisis del tratamiento estadístico se debe seguir una secuencia de pasos la cual nos llevará a la confiabilidad de los resultados del diseño para las mezclas asfálticas porosas.

Los pasos a seguir son los siguientes:

**Paso 1:** Desviación estándar.

$$S = \sqrt{\sum_{1-n}^n \frac{(X_i - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

$$S = \sqrt{\frac{11.83}{30 - 1}} = \mathbf{0.64 \text{ (seg)}}$$

**Tabla 4. 34.** Desviación estándar de resultados para el diseño

<b>n</b>	<b><math>(X_i - \bar{X})^2</math></b>
1	0.06
2	0.07
3	0.32
4	0.58
5	0.00
6	1.53
7	0.06
8	0.02
9	0.07
10	0.58
11	0.74
12	0.58
13	0.32
14	0.07
15	0.02
16	0.02
17	0.58
18	0.13
19	0.06
20	0.07
21	0.00
22	1.30
23	0.02
24	0.02
25	0.06
26	0.55
27	1.08
28	1.08
29	1.30
30	0.58
<b>Total</b>	<b>11.83</b>

**Fuente:** Elaboración propia

**Paso 2:** Varianza.

$$S^2 = \sigma^2$$

$$\sigma^2 = 0.41 \text{ (seg)}$$

**Paso 3:** Error medio de la media.

$$E_{\bar{x}} = \frac{S}{\sqrt{n}}$$

$$E_{\bar{x}} = \frac{0.64}{\sqrt{30}} = \mathbf{0.12 \text{ (seg)}}$$

**Paso 4:** Error probable.

$$E_p = Z * E_{\bar{x}}$$

NC = Nivel de confianza = 95 % → Z = 1.96 (De tabla, distribución normal)

$$E_p = 1.96 * 0.12 = \mathbf{0.23}$$

**Paso 5:** Intervalo de confianza.

$\bar{X}$  = (Media aritmética) = 6.76 seg.

$$Va = \bar{X} \pm E_p$$

$$Va = 6.76 + 0.23$$

**Va = 6.99 seg → Valor máximo**

$$Va = 6.76 - 0.23$$

**Va = 6.53 seg → Valor mínimo**

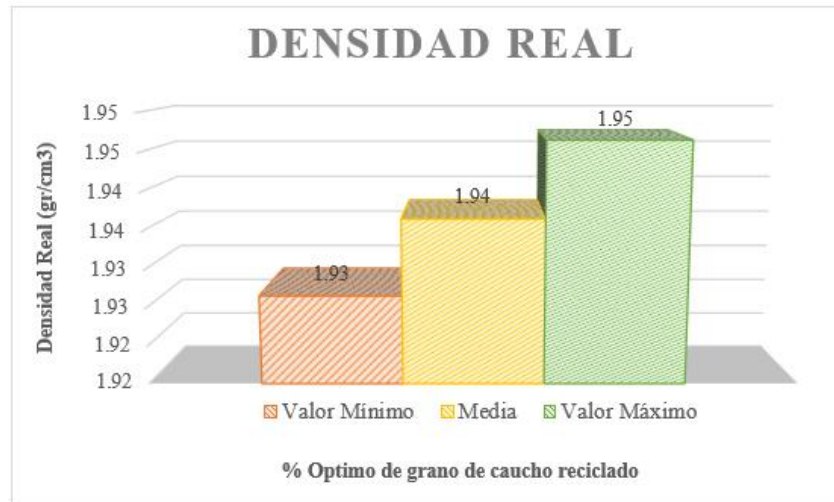
**Tabla 4. 35.** Tratamiento estadístico para el diseño de una mezcla asfáltica porosa con GCR

<b>Propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas porosas</b>					
<b>n</b>	<b>Densidad real (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Vacíos (%)</b>	<b>Estabilidad corregida (kg)</b>	<b>Fluencia (mm)</b>	<b>Permeabilidad (seg)</b>
1	1.93	24.75	757.92	5.59	7.00
2	1.92	24.86	759.96	5.33	6.50
3	1.94	24.39	765.87	5.08	6.20
4	1.93	24.79	773.60	5.33	6.00
5	1.93	24.77	757.63	4.57	6.80
6	1.95	23.95	754.11	6.35	8.00
7	1.93	24.57	754.05	7.11	7.00
8	1.95	23.78	763.50	7.62	6.90
9	1.92	25.13	755.28	5.08	6.50
10	1.88	26.48	761.88	5.59	6.00
11	1.94	24.06	756.46	5.33	5.90
12	1.91	25.43	730.81	6.10	6.00
13	1.91	25.45	732.32	5.33	6.20
14	1.97	23.23	808.53	6.86	6.50
15	1.94	24.07	745.38	5.59	6.90
16	1.96	23.56	692.16	6.35	6.90
17	1.96	23.55	771.77	5.08	6.00
18	2.01	21.32	778.86	5.33	6.40
19	1.90	25.81	633.64	7.11	7.00
20	1.90	25.68	750.22	6.35	6.50
21	1.91	25.24	720.58	5.59	6.80
22	2.00	21.68	762.32	6.35	7.90
23	1.95	23.99	754.88	6.10	6.90
24	1.96	23.59	755.81	5.59	6.90
25	1.96	23.54	754.05	5.08	7.00
26	1.94	24.05	765.84	5.59	7.50
27	1.92	24.82	745.38	6.35	7.80
28	1.93	24.62	680.69	3.81	7.80
29	1.94	24.07	751.18	5.08	7.90
30	1.93	24.71	748.25	5.33	6.00
<b>Media</b>	<b>1.94</b>	<b>24.31</b>	<b>747.39</b>	<b>5.68</b>	<b>6.76</b>
<b>Desviación estándar (S)</b>	0.03	1.09	32.077	0.81	0.64
<b>Varianza (S<sup>2</sup> = σ<sup>2</sup>)</b>	7.79E-04	1.19	1028.93	0.66	0.41
<b>Error medio de la media (Ex)</b>	0.01	0.20	5.8564	0.15	0.12
<b>Error probable (Ep)</b>	0.01	0.39	11.479	0.29	0.23
<b>Límite superior (M+Ep)</b>	<b>1.95</b>	<b>24.70</b>	<b>758.87</b>	<b>5.97</b>	<b>6.99</b>
<b>Límite inferior (M-Ep)</b>	<b>1.93</b>	<b>23.92</b>	<b>735.92</b>	<b>5.39</b>	<b>6.53</b>

Fuente: Elaboración propia

A continuación se detalla un análisis de los resultados obtenidos por el tratamiento estadístico.

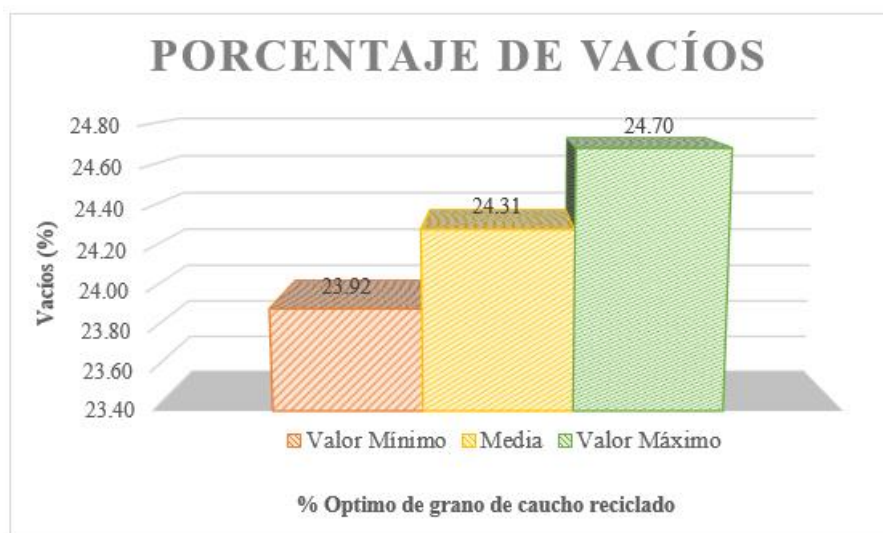
**Gráfica 4. 24.** Densidad real para el diseño de la mezcla asfáltica porosa con GCR



**Fuente:** Elaboración propia

Se puede observar en la Gráfica 4.24, que el valor de la media aritmética de la densidad real, se encuentra aún dentro del intervalo de confianza, dando así validez al resultado obtenido para nuestro diseño.

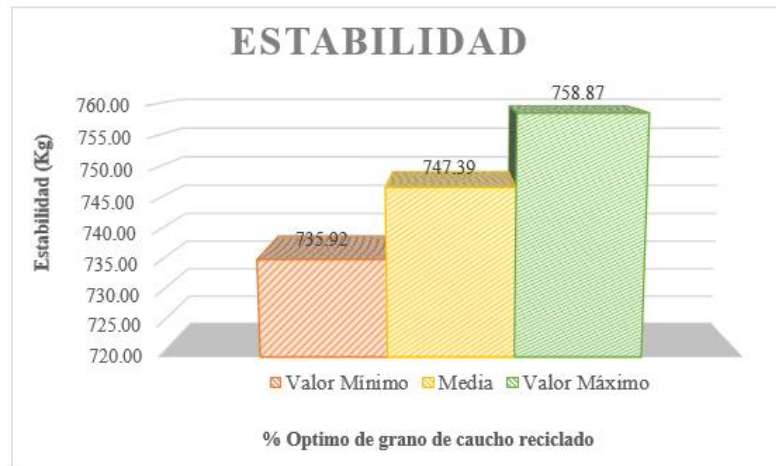
**Gráfica 4. 25.** Porcentaje de vacíos para el diseño de la mezcla asfáltica porosa con GCR



**Fuente:** Elaboración propia

Se puede observar en la Gráfica 4.25, que el valor de la media aritmética del porcentaje de vacíos, se encuentra aún dentro del intervalo de confianza, dando así validez al resultado obtenido para nuestro diseño.

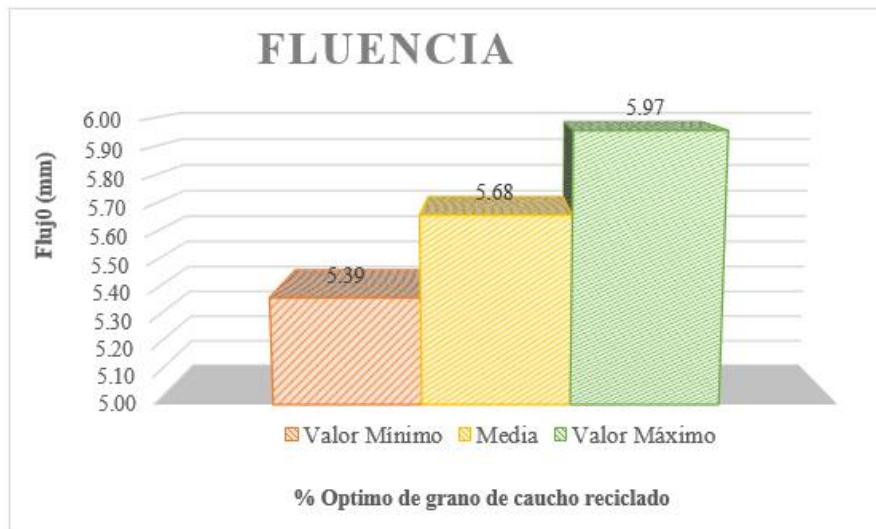
**Gráfica 4. 26.** Estabilidad para el diseño de la mezcla porosa con GCR



**Fuente:** Elaboración propia

Se puede observar en la Gráfica 4.26, que el valor de la media de la estabilidad, se encuentra aún dentro del intervalo de confianza, dando así validez al resultado obtenido para nuestro diseño.

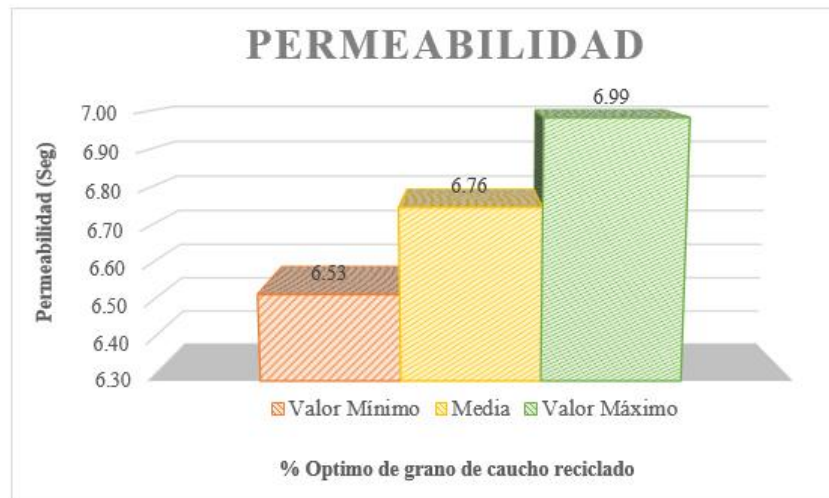
**Gráfica 4. 27.** Fluencia para el diseño de la mezcla porosa con GCR



**Fuente:** Elaboración propia

Se puede observar en la Gráfica 4.27, que el valor de la media aritmética de la fluencia, se encuentra aún dentro del intervalo de confianza, dando así validez al resultado obtenido para nuestro diseño.

**Gráfica 4. 28.** Permeabilidad para el diseño de la mezcla porosa con GCR



**Fuente:** Elaboración propia

Se puede observar en la Gráfica 4.28, que el valor de la media aritmética de la permeabilidad, se encuentra aún dentro del intervalo de confianza, dando así validez al resultado obtenido para nuestro diseño.

#### **4.10. PRUEBA DE HIPÓTESIS**

Para la prueba de hipótesis se debe seguir unas secuencias de pasos que se detallarán a continuación.

**Paso 1:** Determinar la prueba de hipótesis.

Extrayendo de la sección 1.6, la cual nos indica: (Variable dependiente = Porosidad).

**Datos:**

$n = N^{\circ}$  de briquetas de diseño = 30.

$\bar{X}$  = Media aritmética = 6.76 seg.

$S$  = Desviación estándar = 0.64 seg.

$\mu$  = Media poblacional = 15 seg.

**Paso 2:** Generando la hipótesis.

**Tabla 4. 36.** Tipos de relación en función a la hipótesis

<b>H<sub>0</sub></b>	<b>H<sub>1</sub></b>
=	≠
≤	>
≥	<

**H<sub>0</sub>** = Hipótesis nula, **H<sub>1</sub>** = Hipótesis alternativa

**Fuente:** Elaboración propia

De la Tabla 4.36 podemos hacer la siguiente relación en función de la hipótesis.

$$H_1: \bar{X} < \mu$$

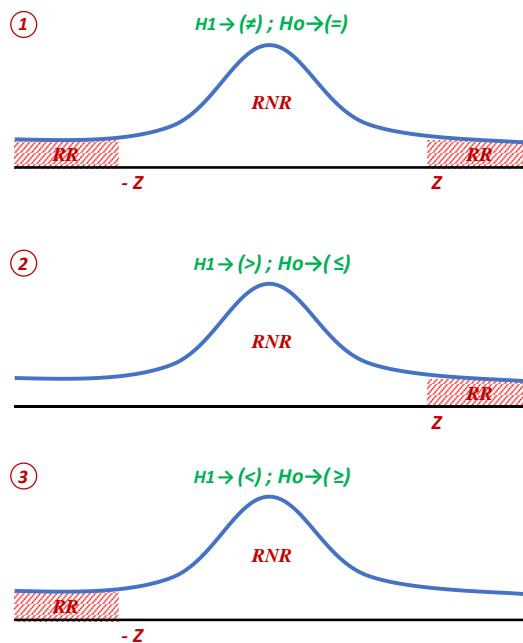
$$H_0: \bar{X} \geq \mu$$

Reemplazando tenemos:

$$H_1: 6.76 < 15$$

$$H_0: 6.76 \geq 15$$

**Gráfica 4. 29.** Tipos de regiones según el tipo de relación en función a la hipótesis



**Fuente:** Elaboración propia



**Paso 3:** Determinar el nivel de Significancia ( $\alpha$ ).

$$NC + \alpha = 1$$

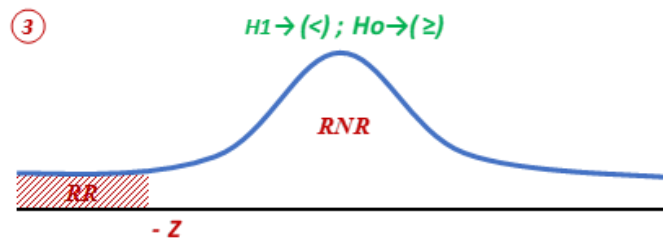
$$NC = \text{Nivel de confianza} = 95.00 \% = 0.95$$

$$\alpha = 1.00 - 0.95 = \mathbf{0.05} \text{ (Tabla distribución normal)}$$

$$\mathbf{Z = 1.96} \text{ (De la tabla de distribución normal)}$$

De la Gráfica 4.29, obtenemos el tipo de región el cual es el 3 con la cola a la izquierda.

**Gráfica 4. 30.** Región 3, cola a la izquierda



**Fuente:** Elaboración propia

**Paso 4:** Calcular el  $Z_c$ .

$$Z_c = \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma/\sqrt{n}}$$

$$\sigma = \frac{S}{\sqrt{n}}$$

Calculando:

$$\sigma = \frac{0.64}{\sqrt{30}}$$

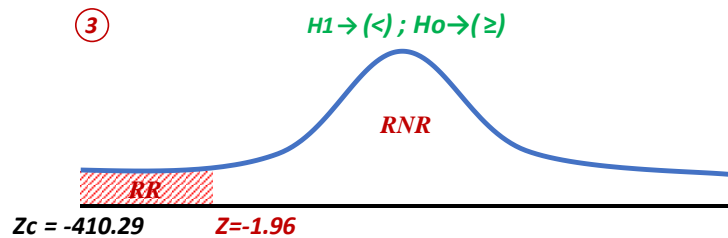
$$\sigma = \mathbf{0.11}$$

$$Z_c = \frac{6.76 - 15}{0.11/\sqrt{30}}$$

$$\mathbf{Z_c = - 410.29}$$

**Paso 5:** Verificar con el  $Z_c$  en que región se encuentra dicho valor.

**Gráfica 4. 31.** Región 3, con valores calculados



**Fuente:** Elaboración propia

Observando la Gráfica 4.31, podemos indicar que está en la región rechazada (RR) y con cola hacia la izquierda.

**Paso 6:** Conclusión.

La hipótesis nula es rechazada, por lo tanto, se acepta la hipótesis alternativa.

Al terminar la prueba de hipótesis, se puede verificar que la hipótesis planteada es válida ya que con el porcentaje óptimo de grano de caucho reciclado al 1.00 %, sí se obtiene mejoras en la porosidad y en la estabilidad.

#### **4.11. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL GRANO DE CAUCHO RECICLADO COMO ADITIVO EN LA MEZCLA ASFÁLTICA POROSA**

El grano de caucho reciclado debe cumplir una serie de especificaciones técnicas para que a medida que se incorpore a la mezcla no cambie sus características mecánicas.

El caucho triturado deberá provenir de la trituración de los neumáticos de vehículos corrientes usando el método ambiental o criogénico, o una combinación de ambos.

Los requerimientos son los indicados a continuación:

El grano de caucho reciclado debe ser mayor o igual al 95 % libre de impurezas, como ser, tierra u otros componentes que podrían alterar su comportamiento.

El tamaño máximo del grano de caucho reciclado no debe ser mayor a 2 mm.

Su peso específico debe ser igual o mayor a 0.96 gr/cm<sup>3</sup>.

Las condiciones de preparación del caucho reciclado de llantas adicionado a la mezcla asfáltica porosa son las siguientes:

Porcentaje de caucho en masa incorporado a la mezcla asfáltica entre 0.50 % - 1.00 %.

Temperatura de reacción de la mezcla 150 – 170 °C.

Tiempo de reacción (a la temperatura de reacción) mayor o igual a 2 horas.

#### **4.12. PRECIOS UNITARIOS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA POROSA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON GRANO DE CAUCHO RECICLADO (GCR) POR VÍA SECA**

Se realiza el análisis de precios unitarios por metro cúbico para la mezcla asfáltica porosa convencional y para la mezcla modificada con GCR.

El precio a tener en cuenta es el costo de producción, el cual es uno de los indicadores más importantes a considerar en los proyectos de ingeniería civil; por lo tanto, mientras más eficiente sea, menor será la inversión de los recursos en la producción de la mezcla y por ende menor será la cuantía de los gastos.

Para la ejecución y transporte de la carpeta asfáltica porosa, el análisis de precios unitarios comprende los costos de materiales, mano de obra, equipo y herramientas, gastos generales e impuestos.

A continuación se detallará la dosificación para una mezcla asfáltica porosa convencional:

**Tabla 4. 37.** Dosificación para la mezcla asfáltica porosa convencional

<b>Cálculo de la dosificación de la mezcla convencional</b>	
<b>Materiales</b>	<b>(%)</b>
Agregado 1/2"	15.79
Agregado 3/8"	23.68
Agregado N° 4	41.05
Agregado N° 10	9.47
Agregado N° 40	6.32
Agregado N° 200	1.68
Filler	2.00
Cemento asfáltico	4.50

**Fuente:** Elaboración propia

Se realizó un cálculo para una producción de 1 m<sup>3</sup> de la mezcla asfáltica porosa convencional; a continuación se muestran los respectivos cálculos:

El peso unitario estandarizado para el cálculo de dosificaciones es: 2250 kg/m<sup>3</sup>.

**Tabla 4. 38.** Dosificación de la mezcla asfáltica porosa para un metro cúbico

<b>Dosificación para 1 m<sup>3</sup> de la mezcla asfáltica porosa convencional</b>				
<b>Material</b>	<b>Peso (kg)</b>	<b>Materiales (%)</b>	<b>Peso específico (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>
Agregado 1/2"	355.28	15.79	2720	0.131
Agregado 3/8"	532.80	23.68	2720	0.196
Agregado N° 4	923.63	41.05	2570	0.359
Agregado N° 10	213.08	9.47	2570	0.083
Agregado N° 40	142.20	6.32	2570	0.055
Agregado N° 200	37.80	1.68	2570	0.015
Filler	45.00	2.00	3030	0.015
Cemento asfáltico	101.25	4.50	1022	-

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4. 39.** Dosificación de la mezcla asfáltica porosa modificada

<b>Dosificación para 1 m<sup>3</sup> de la mezcla asfáltica porosa modificada</b>				
<b>Material</b>	<b>Peso (kg)</b>	<b>Material (%)</b>	<b>Peso específico (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>
Grano de caucho reciclado	22.50	1.00	950	0.024

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4. 40.** Dosificación de la mezcla asfáltica porosa modificada

<b>Dosificación para 1 m<sup>3</sup> de la mezcla asfáltica porosa modificada</b>				
<b>Material</b>	<b>Peso (kg)</b>	<b>Materiales (%)</b>	<b>Peso específico (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>
Agregado 1/2"	355.28	15.79	2720	0.131
Agregado 3/8"	532.80	23.68	2720	0.196
Agregado N° 4	923.63	41.05	2570	0.359
Agregado N° 10	205.20	9.12	2570	0.080
Agregado N° 40	126.45	5.62	2570	0.049
Agregado N° 200	37.80	1.68	2570	0.015
Filler	45.00	2.00	3030	0.015
Cemento asfáltico	101.25	4.50	1022	-

Fuente: Elaboración propia

Dentro del análisis de costos de la elaboración del grano de caucho reciclado de llantas se tiene lo siguiente:

La materia prima como las llantas en desuso tiene un costo de cero.

El proceso de molienda que se realiza para transformarla en grano de caucho, se lo puede realizar en las rencauchadoras, cuyo costo es de 1.50 Bs/kg.

El transporte, tomando en cuenta que se realizará en una volqueta de 12 m<sup>3</sup> (1270 kg) tiene un costo de 227.85 Bs/hr, por lo que se asume el traslado en 0.70 hr. Teniendo en cuenta como resultado 159.50 Bs este precio para la volqueta llena, tendría una estimación de 0.13 Bs/kg.

**Tabla 4. 41.** Costo de producción del GCR

<b>Material</b>	<b>Costo</b>
Materia prima (llantas en desuso)	0.00
Molienda	1.50
Transporte	0.13
<b>Total</b>	<b>1.63</b>

**Fuente:** Elaboración propia

A continuación se resume el costo total para una mezcla asfáltica porosa convencional y una mezcla asfáltica porosa modificada. El análisis de datos se detalla en los anexos 5.

**Tabla 4. 42.** Resumen de precios unitarios para una mezcla asfáltica porosa convencional

<b>Descripción</b>	<b>Costo total</b>
1.- Materiales	
Total materiales	1409.97
2.- Mano de obra	
Total mano de obra	127.25
3.- Equipo, maquinaria y herramientas	
Total equipo, maquinaria y herramientas	204.15
4.- Gastos generales	
Total gastos generales	313.45
5.- Utilidad	
Total utilidad	205.48
6.- Impuestos	
Total impuestos	69.84
<b>Total precio unitario</b>	<b>2330.14</b>

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 4. 43.** Resumen de precios unitarios para una mezcla asfáltica porosa con GCR

Descripción	Costo total
1.- Materiales	
Total materiales	1408.68
2.- Mano de obra	
Total mano de obra	127.25
3.- Equipo, maquinaria y herramientas	
Total equipo, maquinaria y herramientas	204.15
4.- Gastos generales	
Total gastos generales	313.21
5.- Utilidad	
Total utilidad	205.33
6.- Impuestos	
Total impuestos	69.79
<b>Total precio unitario</b>	<b>2328.40</b>

**Fuente:** Elaboración propia

Se puede observar que el costo total para una mezcla asfáltica porosa modificada es menor al costo total de una mezcla asfáltica porosa convencional debido al costo de este material reciclado, dando así viabilidad para la construcción de una carpeta asfáltica porosa modificada con grano de caucho reciclado.

Generalmente en los proyectos de ingeniería se busca realizar una actividad al menor costo posible pero que a su vez tenga las mejores características mecánicas.

#### **4.12.1. Análisis económico**

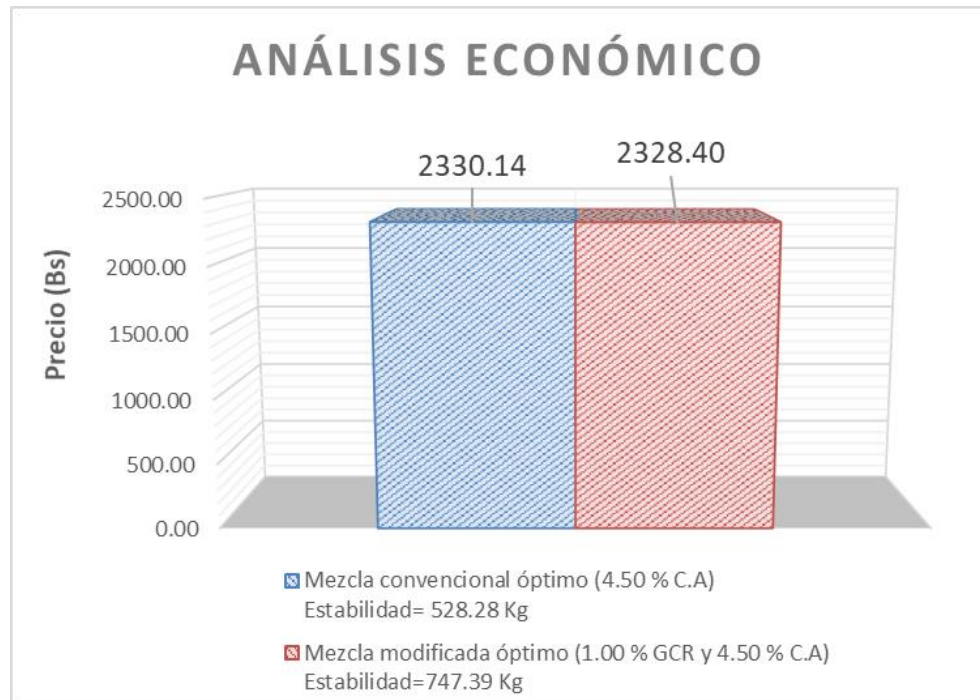
Se realizará un análisis económico para ver cómo varía el costo de una mezcla asfáltica porosa convencional y otra modificada, con el mismo contenido de cemento asfáltico.

Como las mezclas asfálticas se caracterizan por su resistencia, este será el análisis que se realizará, para realizar su análisis económico.

En la Gráfica 4.32, se ve cómo varía el costo de una mezcla asfáltica porosa convencional y otra modificada.

Se puede observar que el costo de una mezcla asfáltica modificada, tiene una pequeña diferencia en precio; sin embargo, esta tiene una mejor estabilidad en relación a la mezcla asfáltica porosa convencional, dando así viabilidad para la construcción de una carpeta asfáltica porosa modificada con grano de caucho reciclado.

**Gráfica 4. 32.** Análisis económico de una mezcla asfáltica convencional y una modificada



**Fuente:** Elaboración propia

**CAPÍTULO V**  
**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

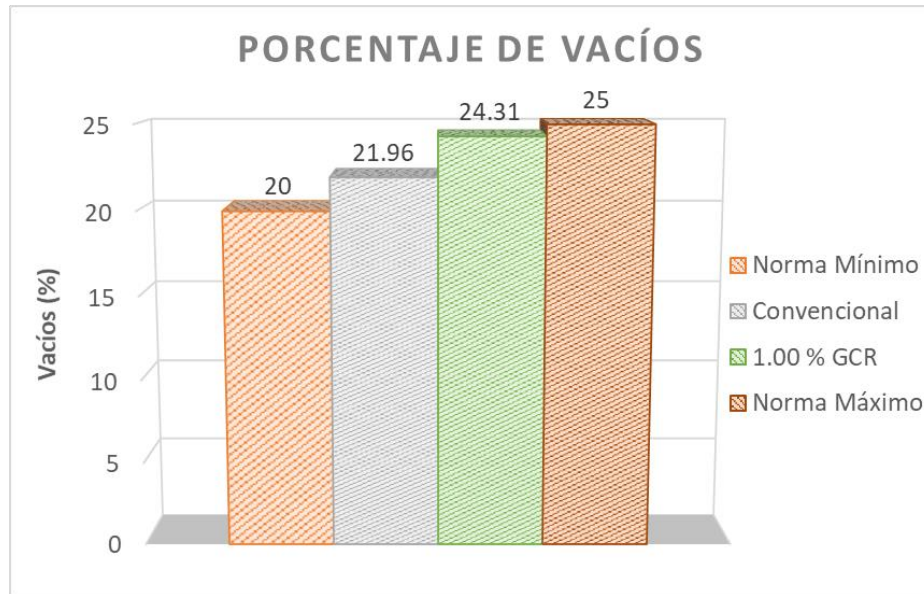


## CAPÍTULO V

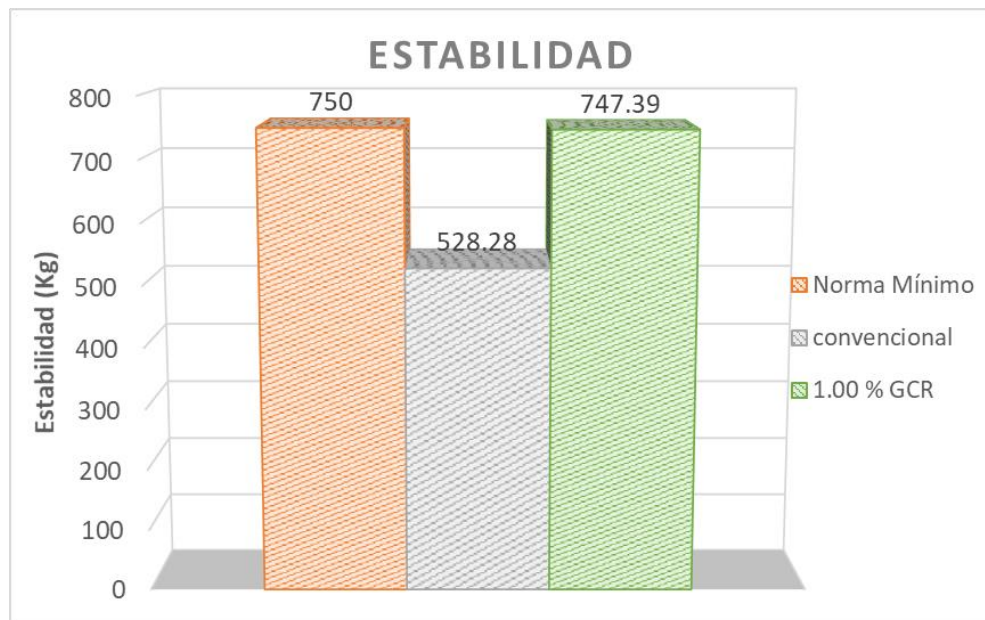
### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. CONCLUSIONES

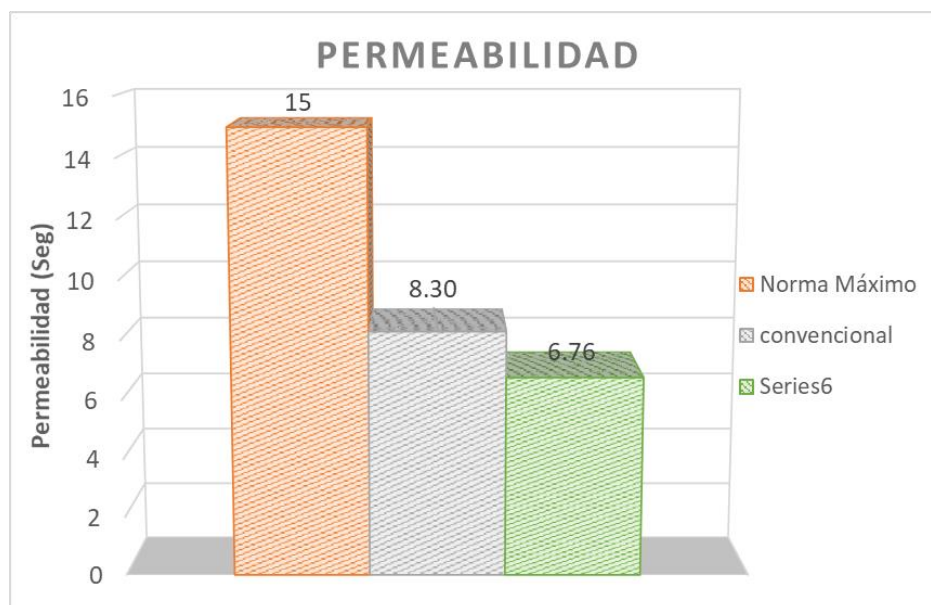
- ✚ La incorporación de un desecho como el Grano de Caucho Reciclado (GCR) de llantas en la mezcla, es una alternativa viable para la reutilización y disminución de la contaminación al medio ambiente y para la salud humana.
- ✚ Se realizó con normalidad los diferentes ensayos de caracterización, como de los agregados pétreos de la planta chancadora de Charajas, el cemento asfáltico como aporte de filler y el grano de caucho reciclado de llantas, donde se pudo verificar que los mismos cumplen con las especificaciones de las normas INVIAS y ASTM para el diseño de la mezcla asfáltica porosa.
- ✚ Se estableció el contenido óptimo de CA, para que una mezcla asfáltica porosa convencional cumpla con los parámetros fijados por la normativa la cual nos dio un contenido óptimo del CA del 4.50 %. Con este porcentaje podemos concluir que obtuvimos mejores propiedades en la mezcla asfáltica porosa, tanto como en su porcentaje de vacíos, cántabro seco, cántabro húmedo y permeabilidad.
- ✚ Se estableció el contenido óptimo de C.A para cada porcentaje de GCR para una mezcla asfáltica porosa que cumpla los parámetros fijados por la normativa, la cual se concluyó que con el 1.00 % de GCR y el 4.50 % de C.A, presentan mejoras en las propiedades mecánicas, tal como el porcentaje de vacíos, permeabilidad y estabilidad.
- ✚ Se pudo analizar el efecto que tiene el GCR, a aplicarle a la mezcla asfáltica porosa convencional por proceso de vía seca, la cual sufre un fenómeno de incremento de sus propiedades mecánicas a causa del GCR; sin embargo, a pesar de esto también se pudo observar que mientras se va adicionando un mayor porcentaje de GCR, estas van reduciendo bruscamente.
- ✚ En el análisis del porcentaje de vacíos, una mezcla asfáltica porosa con el contenido óptimo del GCR del 1.00 % y el 4.50 % de C.A, presenta un mayor porcentaje de vacíos del 10 %, en relación a una mezcla asfáltica convencional como se observa en la siguiente gráfica.



✚ En el análisis de la estabilidad, una mezcla asfáltica porosa con el contenido óptimo del GCR óptimo del 1.00 % y el 4.50 % de C.A, presenta una mayor estabilidad del 41 %, en relación a una mezcla asfáltica convencional, como se observa en la siguiente gráfica.



✚ En el análisis de la permeabilidad, una mezcla asfáltica porosa con el contenido óptimo del GCR del 1.00 % y el 4.50 % de C.A, presenta un menor tiempo de evacuación del 19 %, lo que nos indica que aumentó su permeabilidad, en relación a una mezcla asfáltica convencional, como se observa en la siguiente gráfica.



- ✚ De acuerdo a la hipótesis planteada se concluye que si diseñamos una mezcla asfáltica porosa utilizando como agregado el GCR sus propiedades cumplen con las especificaciones de diseño; por lo tanto, este material puede ser considerado como alternativa técnica para la elaboración de las mezclas asfálticas porosas, para así disminuir la contaminación al medio ambiente que generan las llantas en desuso.

## 5.2. RECOMENDACIONES

Una vez concluido el trabajo de investigación se tiene las siguientes conclusiones:

- ✚ Para la realización de estas mezclas asfálticas, se debe seguir lo expuesto en la normativa de INVIAS Art. 453, que es la guía para el diseño de estas mezclas asfálticas.
- ✚ Para facilitar la trabajabilidad al momento de realizar las briquetas con cada contenido de asfalto, se debe realizar el pesaje de los agregados pétreos en bandejas separadas, posteriormente a su elaboración.
- ✚ Realizar el mezclado de los agregados, el cemento asfáltico y el GCR de la manera más homogénea posible para evitar la variabilidad de los resultados de la mezcla en los distintos ensayos que se realicen para su caracterización.

- ✚ Al momento de la compactación con el martillo Marshall, ésta se debe realizar a una velocidad y una altura constante; debido a estas alteraciones podrían variar los resultados en el momento de realizar los ensayos correspondientes.
- ✚ Es necesario realizar una experimentación a escala real para poder observar cómo es el comportamiento del grano de caucho reciclado en las mezclas asfálticas porosas.
- ✚ Se recomienda que el proceso más habitual de incorporación del Grano de caucho reciclado, es en proporciones inferiores a 1.00 % respecto al peso total de los agregados de la mezcla.
- ✚ Tener mucho cuidado durante el proceso de medición y obtención de datos para poder verificar los resultados con las especificaciones de la normativa de INVIAS.

El aporte de esta investigación estimula la necesidad de seguir investigando más a detalle el comportamiento de las propiedades de las mezclas asfálticas porosas, utilizando como adición el GCR a la mezcla, por proceso de vía seca.