



**UNIVERSIDAD RICARDO PALMA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

Propiedades de la mezcla asfáltica y su incidencia  
en el ahuellamiento

**TESIS**

Para optar el título profesional de Ingeniero Civil

**AUTORES**

Huillcapoma Mendoza, Luis Renzo  
ORCID: 0000-0002-9508-3341

Figueroa Huaylla, Jhoel  
ORCID: 0000-0001-7213-9907

**ASESOR**

Huamán Guerrero, Néstor Wilfredo  
ORCID: 0000-0002-7722-8711

**Lima, Perú**

**2022**

## **Metadatos Complementarios**

### **Datos del autor(es)**

Huillcapoma Mendoza, Luis Renzo

DNI: 76156533

Figuerola Huaylla, Jhoel

DNI: 47333380

### **Datos de asesor**

Huamán Guerrero, Néstor Wilfredo

DNI: 10281360

### **Datos del jurado**

JURADO 1

Tamara Rodríguez, Joaquín Samuel

DNI: 31615059

ORCID: 0000-0002-4568-9759

JURADO 2

Arévalo Lay, Víctor Eleuterio

DNI: 04434662

ORCID: 0000-0002-2518-8201

JURADO 3

Pereyra Saldari, Enriqueta

DNI: 06743824

ORCID: 0000-0002-6949-1317

### **Datos de la investigación**

Campo del conocimiento OCDE: 2.01.01

Código del Programa: 732016

## **DEDICATORIA**

A Bella, Ricky y Tere.

Huillcapoma Mendoza, Renzo

Esta tesis lo dedico a todas las personas que estuvieron detrás en todo este proceso profesional, especialmente a mis familiares por los ánimos y consejos brindados que contribuyeron a ser una mejor persona en la sociedad.

Figueroa Huaylla, Jhoel

## **AGRADECIMIENTO**

Nuestro sincero agradecimiento a Dios y a nuestra alma mater, por habernos brindado los conocimientos de esta maravillosa carrera y a las siguientes personas y/o empresas: A los asesores que hicieron posible la culminación de esta tesis, al Ing. Juan Agurto y a los profesionales que nos han prestado su apoyo.

Huillcapoma Mendoza, Luis Renzo y  
Figuroa Huaylla, Jhoel

## ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	i
ABSTRACT.....	ii
INTRODUCCIÓN.....	iii
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.1. Descripción y formulación del problema general y específicos.....	1
1.2. Objetivo general y específico.....	2
1.3. Delimitación de la investigación: temporal espacial y temático.....	2
1.4. Justificación e importancia.....	3
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	4
2.2. Bases teóricas vinculadas a la variable o variables de estudio.....	8
2.2.1. Pavimento Asfáltico.....	8
2.2.2. Materiales que conforman la MAC.....	11
2.2.3. Propiedades de una MAC.....	18
2.2.4. Diseño Marshall.....	23
2.2.5. Deformaciones.....	25
2.2.6. Ensayo de rueda cargada de Hamburgo.....	27
2.3. Definición de términos básicos.....	30
CAPÍTULO III: SISTEMA DE HIPÓTESIS.....	32
3.1. Hipótesis.....	32
3.1.1. Hipótesis principal.....	32
3.1.2. Hipótesis secundarias.....	32
3.2. Variables.....	32
3.2.1. Definición conceptual de las variables.....	32
3.2.2. Operacionalización de las variables.....	33
CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO.....	34
4.1. Tipo y nivel.....	34
4.2. Relación entre variables.....	35
4.3. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	35
4.4. Procedimientos para la recolección de datos.....	35
CAPÍTULO V.	
PRESENTACIÓN Y ANALISIS DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	37
5.1. Materiales.....	37

5.1.1. Materiales: Primer caso.....	37
5.1.2. Materiales: Segundo caso.....	41
5.1.3. Materiales: Tercer caso.....	45
5.2. Ensayo Marshall y las propiedades de la MAC.....	47
5.2.1. Parámetros volumétricos que inciden en el ahuellamiento.....	48
5.2.2. Estabilidad y Fluencia.....	50
5.2.3. Parámetros de diseño Marshall según normativa peruana.....	51
5.3. Ensayo de ahuellamiento en mezcla asfáltica.....	52
5.3.1. Rueda cargada de Hamburgo.....	52
5.4. Resultados de ensayos.....	53
5.4.1. Resultados: Primer caso.....	53
5.4.2. Resultados: Segundo caso.....	55
5.4.3. Resultados: Tercer caso.....	56
5.5. Cuadro comparativo para el análisis de resultados.....	57
5.5.1. Comparativo primer caso.....	57
5.5.2. Comparativo segundo caso.....	58
5.5.3. Comparativo tercer caso.....	58
5.6. Análisis de los resultados.....	59
5.7. Constatación de hipótesis.....	61
CONCLUSIONES.....	65
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68
ANEXO.....	72
Anexo 1: Matriz de Consistencia.....	73

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Operacionalización de variables.....	33
Tabla 2: Características de la cantera.....	38
Tabla 3: Análisis de resultados de control de calidad de agregado grueso.....	38
Tabla 4: Análisis de resultados de control de calidad de agregado fino.....	39
Tabla 5: Reporte de control de calidad del bitumen asfáltico PEN 120-150.....	41
Tabla 6: Análisis de resultados de control de calidad de agregado grueso.....	42
Tabla 7: Análisis de resultados de control de calidad de agregado fino.....	42
Tabla 8: Análisis de resultados de mezcla modificada .....	54
Tabla 9: Reporte de resultados del ensayo de rueda cargada de Hamburgo.....	54
Tabla 10: Resultados de los Diseños de Mezcla.....	55
Tabla 11: Resultados de los ensayos de Rueda de Hamburgo.....	55
Tabla 12: Cuadro comparativo resumen de los resultados obtenidos de MAC convencional y modificada con PET al 1.2% .....	57
Tabla 13: Cuadro comparativo resumen de los resultados obtenidos .....	58
Tabla 14: Cuadro comparativo, resumen de los resultados obtenidos de MAC convencional y modificada con caucho al 1.0% .....	59
Tabla 15: Matriz de consistencia .....	73

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Estructura del pavimento.....	9
Figura 2: Requerimiento para los agregados gruesos.....	12
Figura 3: Requerimiento para los agregados finos.....	13
Figura 4: Refinamiento del petróleo.....	15
Figura 5: Selección de tipo de cemento asfáltico.....	16
Figura 6: Clasificación de polímeros.....	17
Figura 7: Componente del diagrama de compactación de una HMA.....	23
Figura 8: Ahuellamiento en un pavimento flexible con un nivel de severidad bajo.....	26
Figura 9. Máquina de Hamburgo.....	28
Figura 10: Máquina de Hamburgo.....	29
Figura 11. Gráfico esquemáticos de los resultados de HWTD.....	30
Figura 12: Husos granulométricos.....	39
Figura 13: Curva granulométrica para mezcla asfáltica convencional.....	40
Figura 14: Curva granulométrica para mezcla asfáltica modificada con PET.....	40
Figura 15: Husos granulométricos para mezclas asfálticas en caliente según ASTM D3515.....	43
Figura 16: Curva granulométrica para mezcla asfáltica modificada.....	44
Figura 17: Resultado de los ensayos del agregado grueso .....	45
Figura 18: Resultado de los ensayos del agregado fino .....	46
Figura 19: Curva granulométrica para la mezcla convencional.....	46
Figura 20: Curva granulométrica para la mezcla modificada con caucho al 1%.....	46
Figura 21: Resultado de los ensayos al Asfalto PEN 120/150.....	47
Figura 22: Requisitos para mezcla de concreto bituminoso .....	51
Figura 23: Vacíos mínimos en el agregado mineral (VMA) .....	52
Figura 24: Esquema de los resultados de un ensayo en la rueda cargada de Hamburgo	52
Figura 25: Comparación de los ensayos Marshall para la MAC convencional y modificada.....	56
Figura 26: Comparación del ensayo de Rueda de Hamburgo para la MAC convencional y modificada. ....	56

## RESUMEN

El trabajo de investigación “Propiedades de las mezclas asfálticas y su incidencia en el ahuellamiento” tuvo como objetivo determinar las propiedades de la mezcla asfáltica y su incidencia en el ahuellamiento, para ello se han extraído data de tesis de referencias para comparar una mezcla asfáltica convencional y modificada.

La investigación fue aplicada, con enfoque cuantitativo, a nivel descriptivo, y de diseño experimental y transversal. La población de la investigación correspondió a todos los pavimentos flexibles de diseño convencional, teniendo como muestra los ensayos Marshall y de rueda cargada de Hamburgo.

Finalmente se concluyó que las propiedades de vacíos de aire, vacíos llenos de asfáltico y fluencia de una mezcla asfáltica (MAC) en caliente inciden en la aparición del fenómeno del ahuellamiento en un pavimento.

**Palabras Clave:** Propiedades de una mezcla asfáltica, ahuellamiento, diseño Marshall y rueda cargada de Hamburgo.

## **ABSTRACT**

The research work "Properties of asphalt mixtures and their incidence in rutting" aimed to determine the properties of the asphalt mixture and its incidence in rutting, for this data has been extracted from a reference thesis to compare an asphalt mixture conventional and asphalt.

The research was applied, with a quantitative approach, at a descriptive level, and with an experimental and cross-sectional design. The research population corresponded to all the flexible pavements of conventional design, taking the Marshall and loaded-wheel tests from Hamburg as a sample.

Finally, it was concluded that the properties of air voids, voids filled with asphalt and flow of a hot mix asphalt (HMA) affect the appearance of the phenomenon of rutting in a pavement.

**Key Words:** Properties of hot mix asphalt, rutting, Marshall Mix Design and Hamburg Wheel-Track Test (HWTT).

## INTRODUCCIÓN

Esta investigación consiste en analizar las propiedades mecánicas y volumétricas de la mezcla asfáltica en caliente (MAC) y su incidencia el fenómeno del ahuellamiento, es por ello que se ha recurrido a investigaciones y literatura afín.

Así mismo, se ha tomado como referencia data extraída de investigaciones anteriores, donde se compara una mezcla convencional con una modificada, poniendo en manifiesto la resistencia de ambas a la deformación permanente mediante el ensayo de rueda cargada de Hamburgo y una mezcla asfáltica considerando un diseño Marshall, es acá donde, con los datos de los ensayos de laboratorio, comprobamos lo mencionado por las distintas referencias, las propiedades: vacíos de aire, vacíos llenos de asfalto y fluencia de una MAC inciden en el fenómeno estudiado el tema de investigación elegido se debe a que el ahuellamiento es uno de los fenómenos que más preocupa a los diseñadores, tras esta tesis será necesario analizar con mayor detalle los parámetros de incidencia para evitar la aparición de deformaciones permanentes.

El desarrollo de esta investigación consta de seis capítulos:

En el primer capítulo se presenta el planteamiento del problema, además abarca objetivos, justificación e importancia y limitaciones de la investigación.

En el segundo capítulo se presentan los antecedentes nacionales e internacionales, estructura teórica vinculada a las variables de estudio y definiciones conceptuales.

En el tercer capítulo refiere al planteamiento de la hipótesis de nuestra investigación y la operacionalización de las variables.

En el quinto capítulo se presenta los datos y parámetros del ensayo de referencia, así mismo se presentan y analizan los resultados que se obtuvieron dándole un enfoque a nuestra temática de investigación.

Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones obtenidas durante el desarrollo de la investigación.

## **CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.1. Descripción y formulación del problema general y específicos.**

En distintas partes del mundo, actualmente, muchos pavimentos son susceptibles a distintas fallas las cuales se dan debido a diseño no adecuado, condiciones climáticas y el tráfico. Una de las fallas más preocupantes para los diseñadores de mezclas asfálticas es el ahuellamiento, el cual trae consigo una serie de inconvenientes que afectan a las capas inferiores que compone la estructura del pavimento.

Esta falla es producto de la nula capacidad de una mezcla asfáltica “blanda” de resistir cargas pesadas. La acumulación de pequeñas deformaciones permanentes produce la falla en mención.

Sin restar valor al estudio focalizado de los factores climatológicos y del tráfico que siempre tendrán lugar en cualquier falla, podemos ver que en la etapa de diseño, las propiedades de una mezcla asfáltica inciden directamente en las deformaciones permanentes, es por ello que un correcto estudio de estas nos podrán prevenir la aparición temprana de fallas en nuestros pavimentos, reduciendo así los costos de mantenimiento y/o rehabilitación, y prologando la serviciabilidad de las vías pavimentadas.

Siendo así y por lo anteriormente expuesto lo que deviene en la siguiente investigación es el estudio a profundidad de las cualidades de una mezcla asfáltica y cómo ello se refleja en la aparición de huellas en las vías, técnicamente llamado como ahuellamiento. Falla de la que es sujeto de nuestra investigación, el cual se va a estudiar con mucho detalle en esta tesis.

#### **1.1.1. Problema general:**

¿En qué medida las propiedades de la mezcla asfáltica tienen incidencia en el ahuellamiento?

#### **1.1.2. Problemas específicos:**

- a). ¿En qué medida la propiedad de fluencia de la mezcla asfáltica, influye en el ahuellamiento?
- b). ¿Cómo incide la estabilidad de la mezcla asfáltica en el ahuellamiento?
- c). ¿Cómo incide los vacíos de aire de la mezcla asfáltica en el ahuellamiento?

- d). ¿En qué medida los vacíos llenos de asfalto de la mezcla asfáltica inciden en el ahuellamiento?
- e). ¿En qué medida el volumen de vacíos de agregado mineral de la mezcla asfáltica incide en el ahuellamiento?

## **1.2. Objetivo general y específico.**

### **1.2.1 Objetivo General**

Determinar las propiedades de las mezclas asfálticas y su incidencia en el ahuellamiento.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- a) Determinar la fluencia de la mezcla asfáltica y su incidencia ahuellamiento.
- b) Determinar la estabilidad de la mezcla asfáltica y su influencia ahuellamiento.
- c) Determinar los vacíos de aire de la mezcla asfáltica y su influencia ahuellamiento.
- d) Determinar los vacíos llenos de asfalto de la mezcla asfáltica y su influencia ahuellamiento.
- e) Determinar el volumen de vacíos de agregado mineral de la mezcla asfáltica y su influencia ahuellamiento.

## **1.3. Delimitación de la investigación: temporal espacial y temático.**

La presente tesis es una investigación esencial, realizada en base a información bibliográfica obtenida de tesis anteriores nacionales e internacionales, además de artículos, libros teóricos y congresos.

Esta investigación está orientada al diseño Marshall, es decir, a mezcla asfáltica en caliente (MAC).

#### **1.4. Justificación e importancia**

El presente proyecto de tesis se realizó con el fin de aportar una síntesis de distintas investigaciones referidas al tema para exponer la influencia de las características de una mezcla asfáltica en las huellas producto del tránsito vehicular.

Para lo cual, este trabajo servirá de referencia para futuras investigaciones.

Desde la perspectiva de la serviciabilidad, la investigación contribuirá indirectamente a tener vías más estables reduciendo la aparición de huellas en los pavimentos que reciben diariamente cargas producto del paso vehicular.

## CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

### 2.1. Antecedentes del estudio de investigación.

#### 2.1.1 Marco Histórico.

Uno de los componentes de las mezclas asfálticas es el asfalto, el cual tiene como objetivo aglutinar o impermeabilizar.

Las primeras carreteras pavimentadas en los EE.UU. fueron en la Av. Pennsylvania, frente a la Casa Blanca. El asfalto usado fue natural proveniente de la Isla Trinidad en las costas de Venezuela. La otra fuente de asfalto natural se encuentra en Bermúdez-Venezuela. Los asfaltos naturales se encuentran en depresiones de la corteza terrestre formando los lagos de asfalto o aparecen impregnados en calizas, formaciones de areniscas o similares, formando las llamadas rocas asfálticas, también se encuentran mezclados por impurezas minerales. Durante 1800 y 1900 la demanda de las carreteras pavimentadas se incrementó tan rápido que la extracción y transporte desde los lagos de asfalto hasta la obra, fue limitando la construcción de estos pavimentos. Se tuvo que considerar otra fuente para producir asfalto, es así que la mayoría de los asfaltos utilizados en la actualidad son provenientes del refino del petróleo. Minaya González & Ordóñez Huamán, (2006).

#### 2.1.2 Investigaciones internacionales.

Olarte Riaño & Soler Sánchez, (2018) en su tesis de grado “Efecto del grano de caucho en el ahuellamiento de una mezcla asfáltica tipo MD-12” realizada en la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia por facultad de Ingeniería, Escuela de Transporte y Vías cuyo país de procedencia es Colombia (ciudad de Tunja), concluyen el progreso que presentó la mezcla asfáltica en cuanto al optimización de una de las propiedades de la mezcla asfáltica como la resistencia al ahuellamiento en la carpeta de rodadura, por la adición del grano de caucho reciclado a través de vía seca, llegando a la elección porcentual óptima de GCR en donde se considera utilizarlo para que la mezcla asfáltica tenga la mejor eficiencia desde el punto de vista mecánico, así como también mejoras en la vida útil del pavimento y la disminución de los daños medio ambientales que produce el ineficiente manejo de neumáticos en desuso.

En la tesis de grado “Efecto de las cargas dinámicas desarrolladas en la interfaz llanta – pavimento, en la vida por fatiga y ahuellamiento en pavimentos flexibles” Pineda Morales & Rodríguez, (2020) realizada en la Universidad de la Costa por la Facultad de Ingeniería por el departamento de Ingeniería Civil y Ambiental cuyo país de procedencia es Colombia (ciudad de Barranquilla) exponen la influencia que tienen las cargas dinámicas en la vida por fatiga y vida por ahuellamiento, debiéndose a que realmente los pavimentos están sometidos a cargas dinámicas y no a cargas estáticas. En síntesis, en los casos estudiados, la resistencia a la fatiga era menor a la resistencia al ahuellamiento, es decir, que la carpeta asfáltica en primera instancia fallaría por fatiga, siendo esto predecible, al aumentar las cargas, se tendrá una relación directa proporcional con los esfuerzos en la rasante y por ende se produce fatiga en los pavimentos asfálticos. Así mismo, mencionar que los espesores de asfalto eran grandes, minimizando la posibilidad de ahuellamiento.

En otra medida, al aumentar el valor del IRI, se reduce la vida por fatiga y ahuellamiento, es decir, que al tener una vía con mayor IRI, la carga dinámica se acrecienta y por ende se disminuye la vida útil del pavimento.

En la tesis para obtener el grado de Ingeniero Civil, Góchez Rivas, Monroy Gonzales, & Ventura Lima, (2012) en su tesis “Diseño de mezclas asfálticas para prevenir el fenómeno de ahuellamiento” cuya universidad de procedencia es la Universidad de El Salvador en la ciudad de Santa Ana, relaciona el comportamiento del pavimento flexible con las características de los materiales, el tránsito y el diseño de un pavimento.

El pavimento flexible resiste diferentes cargas que el tráfico transmite, presentando ciertas deformaciones. Usualmente se presentan fallas relacionadas con la acumulación de esfuerzos, estas dependen de muchos factores como los aspectos físicos y mecánicos intrínsecos en los materiales, así como los ambientales, cambiando el comportamiento del pavimento por la aplicación de cargas.

En esta investigación se busca conocer más acerca del ahuellamiento, y a la vez proponer soluciones para corregir errores, yendo desde un mal diseño hasta la mejora de procesos constructivos.

En el trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Civil, Hernández Cabrera & Ramírez Rodríguez, (2016) en su tesis: “Análisis de la influencia del grado de compactación de una mezcla asfáltica en su deformación permanente y la susceptibilidad a la humedad” cuyo origen es la Universidad Católica de Colombia en la ciudad de Bogotá, se plantea la afectación generada por una compactación con parámetros debajo de los solicitados en una mezcla asfáltica, analizando la falla de la deformación permanente o el “ahuellamiento” y la susceptibilidad al agua, ensayos que dan resultados de afectación de las variables en cuestión en las capas asfálticas y que instauran lo influyente que puede ser un grado de compactación menor a 100%, como se trabaja en los materiales granulares que conforman las capas que preceden a la capa asfáltica.

En la tesis “Estudio del comportamiento de las capas asfálticas ante las deformaciones plásticas en las diferentes regiones del Ecuador” por Jaramillo Briceo (2015) cuya procedencia es la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil en la ciudad de Guayaquil expone las deformaciones permanentes por la aplicación de cargas reiteradas como las que producen el tránsito y las condiciones de temperatura.

Para estimar el ahuellamiento se utiliza el sistema de estimación de deformaciones permanentes, considerando la temperatura y el ensayo de cargas reiteradas del tránsito.

Los resultados determinan y/o recomiendan espesores adecuados de acuerdo a condiciones de tránsito y temperatura en diferentes zonas del Ecuador, comparándolos con los recomendados por la AASTHO 93 siguiendo las mismas condiciones.

### 2.1.3 Investigaciones nacionales.

En la tesis de grado “Diseño de mezcla asfáltica auto reparable mediante inducción de calor, para controlar fallas superficiales de tráfico pesado en vías metropolitanas de Lima” Quispe Castro & Torres Meza, (2020) realizada en la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC) por la facultad de Ingeniería, programa académico de Ingeniería civil, cuya procedencia es la ciudad de Lima Perú, estudia la problemática del deterioro de pavimentos

planteando el diseño de una mezcla asfáltica que posea la característica de auto repararse, utilizando como punto de partida el diseño de la mezcla asfáltica típico, al que se le adiciona polímeros y fibras de lana de acero, con la función de optimizarlo física y mecánicamente, encontrando su capacidad de recuperación, manejando las fisuras con la inducción de calor y extendiendo la operacionalidad de los pavimentos.

Córdova Carbajal & Sánchez Llontop, 2021 en su tesis de grado “Evaluación de la resistencia mecánica a la deformación permanente de una mezcla asfáltica convencional con gradación MAC tipo II y ASTM 3515, Tarapoto 2021” en la Universidad Científica del Perú (UCP) por la Facultad de Ciencias e Ingeniería, cuya procedencia es la ciudad de Tarapoto - Perú estudia las diferencias entre dos mezclas asfálticas con distinta gradación: ASTM-3515 y MAC-2, para esto se usó el ensayo de la Rueda de Hamburgo, analizando cuál de estas dos mezclas tiene un mayor desempeño a la resistencia frente al ahuellamiento.

Por otro lado, los ensayos de desempeño buscan encontrar el desempeño de las MAC a las problemáticas más típicas, como lo es la resistencia a la deformación permanente, por ello se realizó el ensayo de la Rueda de Hamburgo a fin de hallar la susceptibilidad a la deformación permanente y su serviciabilidad.

En su tesis de grado “Reducción de la deformación permanente en pavimentos diseñados con mezclas asfálticas en caliente a través de la incorporación de polvo de caucho proveniente de neumáticos usados” Contreras Martínez & Mamani Vilcatoma (2019) en la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas por la Facultad de Ingeniería, programa académico de Ingeniería Civil, cuya procedencia es Lima – Perú, exponen uso del polvo de caucho reciclado como parte del diseño de mezclas asfálticas con la finalidad de reducir el ahuellamiento en la carpeta asfáltica y de esa manera extender la vida útil a través del ensayo de la Rueda de Hamburgo.

Adicionalmente se motiva la utilización de recursos reciclados para proyectos viales para cuidar el ambiente y la calidad de vida de las personas.

En la tesis llamada “Mitigación del Ahuellamiento, usando el método Marshall y granulometría SUPERPAVE en la carpeta asfáltica, del tramo: La Oroya – Jauja, 2018”, Castillo Neyra (2018) en la Universidad Cesar Vallejo por la

Facultad de Ingeniería, escuela profesional de Ingeniería Civil cuya procedencia es la ciudad de Lima – Perú, explica en que medida es posible mitigar el ahuellamiento en la carpeta asfáltica del pavimento en la carretera central, específicamente en el km 45+800 al km 46+000 carril izquierdo del tramo la Oroya - Jauja, a través de un diseño de Mezcla Asfáltica en Caliente utilizando la metodología Marshall.

El principal aporte es el estudio del desempeño de la MAC a la deformación permanente y a la vulnerabilidad al daño inducido por humedad, en donde se vio que la M.A.C. que usa la granulometría SUPERPAVE tiene un mejor desempeño físico mecánico al ahuellamiento, extendiendo la vida útil de la carpeta asfáltica.

Arellano Loayza & Cáceres Candia (2018) en la tesis “Importancia de la evaluación a las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas en caliente a más de 3000 msnm para el proyecto carretera desvío Imperial-Pampas” en la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas por la Facultad de Ingeniería, escuela profesional de Ingeniería Civil cuya procedencia es la ciudad de Lima – Perú busca dar los directrices para tener un pavimento flexible utilizando mezclas asfálticas en caliente (MAC) a más de 3 000 m.s.n.m. Para esto se realizó la ejecución del Proyecto Carretera Desvío Imperial-Pampas en el distrito de Tayacaja, provincia de Huancavelica paso a paso; permitiendo analizar la problemática que suceden en cada etapa de la ejecución de la carpeta asfáltica en MAC, muchos de ellos a causa de las condiciones geográficas y climáticas del lugar.

## 2.2 Bases teóricas vinculadas a la variable o variables de estudio

### 2.2.1. Pavimento Asfáltico

Los pavimentos flexibles son sistemas multicapa de diferentes calidades cerca de la superficie donde hay altas tensiones. Un pavimento flexible reparte la carga hasta un nivel a la subrasante. Debajo de la capa de hormigón asfáltico se ubica una base la cual es de piedra partida, grava bien graduada o materiales estabilizados (con cemento, cal o asfalto). Debajo de esta se encuentra una última capa de calidad menor llamada subbase. AASHTO (2021)

## Estructura de un pavimento asfáltico

La estructura apoyada sobre el terreno de cimentación (subrasante), y que está constituido por varias capas de calidades de material y espesores diferentes, que siguen un lineamiento estructural, se llama pavimento. Tiene la función de resistir las cargas producto del tráfico. Usualmente, la metodología del diseño, son empíricos. Están compuestos por una carpeta asfáltica apoyados, en la mayoría de los casos, en dos capas blandas, la base y sub base. La distribución de la estructura que conforma el pavimento se explica en la siguiente figura. Minaya González & Ordóñez Huamán, (2006).

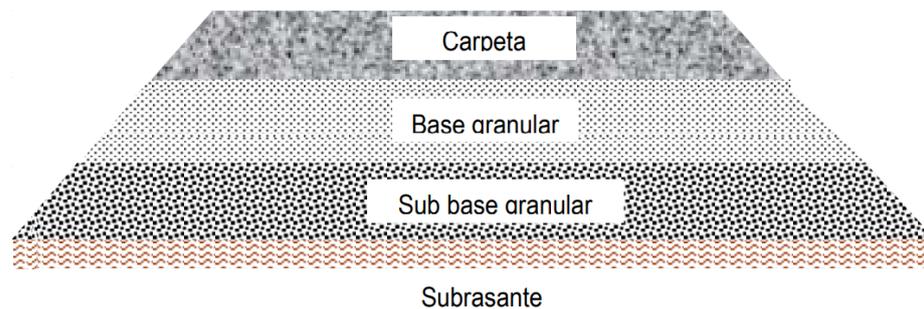


Figura 1: Estructura del pavimento

Fuente: Minaya González & Ordóñez Huamán, (2006)

## Capeta Asfáltica

La capa de rodamiento provee una superficie homogénea y estable al tránsito, de forma y color apropiado, que resiste el tránsito y las duras condiciones de temperatura. El método de diseño AASHTO 1993 considera al módulo resiliente como datos importante para el diseño de la carpeta asfáltica, cuando hablamos de mezclas asfálticas en caliente, estos valores oscilan de 400,000 a 450,000 psi (28,000 a 32,000 kg/cm<sup>2</sup>) a 20°C. Minaya González & Ordóñez Huamán, (2006).

## Base

La capa de base, en su mayoría granular, se apoya encima de la sub base. La utilidad de esta es transferir los esfuerzos del tráfico, a la sub base y subrasante. Está constituida por grava chancada, compactada al 100% de la máxima densidad seca utilizando el ensayo proctor modificado. Su módulo elástico se estudia con el módulo resiliente, MR. Una base granular con CBR

del 100% tiene un valor MR de 30,000 psi (2,100 kg/cm<sup>2</sup>). Minaya González & Ordóñez Huamán, (2006).

### **Sub –base**

La sub base, es una capa opcional que de acuerdo al diseño puede o no formar parte del pavimento. Esta encima de la sub-rasante y la calidad de los materiales que la conforman pueden ser de menor calidad que la base, ya que los esfuerzos verticales que se transmiten a través de las capas del pavimento son altos en la superficie y disminuyen al profundizarse. La sub base es la capa de material seleccionado, más onda del pavimento, es por ello que los materiales que la conforman tienen menores requisitos de calidad. El módulo elástico de la sub base se estudia mediante el módulo resiliente, MR. El CBR mínimo debe ser del 40% de acuerdo a las Especificaciones Técnicas Generales para Construcción de Carreteras EG-2000, Ministerio de Transportes, Comunicaciones, Vivienda y Construcción, Oficina de Control de Calidad). Minaya González & Ordóñez Huamán, (2006).

### **Sub rasante**

Es el suelo de fundación para todo el paquete estructural del pavimento.  
(AASHTO, 2021)

### **Las propiedades de los suelos tienen dos categorías:**

Propiedades físicas:

Utilizadas seleccionar materiales, métodos constructivos y control de calidad.

Propiedades ingenieriles:

Estiman la calidad de los materiales. La calidad de los suelos para subrasantes se puede asociar con el módulo resiliente, el módulo de Poisson, el valor soporte del suelo y el módulo de reacción de la sub-rasante.

### **Terreno de fundación**

El terreno de fundación suele estar conformado por un terraplén (caso de rellenos) o simplemente terreno natural para cortes, en los dos casos, la banda superior se llama subrasante. El módulo elástico relacionado al terreno de fundación es el módulo resiliente, importante dato que ha sido muy estudiado

por diferentes agencias de transportes de U.S.A, correlacionándolo con el CBR. Minaya González & Ordóñez Huamán, (2006).

### 2.2.2. Materiales que conforman la MAC

La mezcla asfáltica en caliente (MAC) está compuesta por agregados pétreos los cuales están revestido con un ligante asfáltico, estos dos se homogenizan a altas temperaturas superiores a 120°C en proporciones las cuales previamente se han especificado de acuerdo a las propiedades que se esperan obtener de la mezcla. Finalmente, estas se componen en función a la carga vehicular con la cual se diseña la carpeta asfáltica. Las mezclas asfálticas en caliente (MAC) son las más utilizadas en el mundo, debido a sus propiedades de flexibilidad, duración, uniformidad y resistencia, por ende, se han generado varias investigaciones con la finalidad de aumentar sus propiedades mecánicas y dinámicas principalmente. Estas mezclas asfálticas se dividen según su granulometría. INVIAS (2013)

#### **Agregado Grueso**

De acuerdo al Sistema de Clasificación de Suelos, es un agregado grueso, a la parte del agregado pétreo total retenido en el tamiz #4.

La granulometría es la caracterización física y fundamental de todo grupo de partículas ya que contribuye directamente en la resistencia mecánica del conjunto (esqueleto mineral). Usualmente se usan granulometrías sensiblemente continuas, con la finalidad de obtener la compacidad máxima del conjunto, sin embargo, también se utilizan granulometrías no continuas en el caso de algunas mezclas asfálticas. Para calzar una granulometría en algún huso normalizado se inicia de fracciones homogéneas que se combinan en proporciones adecuadas. Los análisis granulométricos se llevan a cabo mediante un tamizado; el proceso es similar al elaborado en suelos. Padilla Rodríguez (2004).

#### **Requerimientos para agregado grueso según MTC - EG 2013**

Los agregados pétreos utilizados para una mezcla bituminosa, al ser sometida a ésta debe poseer una característica de no desprenderse por la presencia de la humedad o al aplicar una carga. Por ello, sólo es captado el uso de agregados

hidrófilos, o en su defecto añadido con aditivo que aporte la propiedad de adherencia entre el agregado y el cemento asfáltico.

Se denomina agregado grueso hasta el material retenido hasta el tamiz con abertura de 4.75 mm. agregado fino a la proporción que pasa el tamiz 4.75 mm. hasta la retención del tamiz 75  $\mu\text{m}$ , y como polvo mineral lo que pasa el tamiz de abertura 75  $\mu\text{m}$ .

La procedencia del agregado grueso debe ser producto de la trituración de rocas, y además los fragmentos triturados deberán cumplir con la característica de que sean limpios, durables y resistentes, sin exceso de partículas planas, longitudinales, frágiles o desmenuzables. El material deberá estar libre de polvo, arcillas entre otras sustancias que impidan la adhesión del material bituminoso.

Los requisitos mínimos se presentan en cada especificación. De acuerdo al manual del EG-2013, el agregado grueso deberá cumplir con lo establecido en la siguiente tabla. Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú, (2013)

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

\* Excepcionalmente se aceptarán porcentajes mayores sólo si se aseguran las propiedades de durabilidad de la mezcla asfáltica.

- La adherencia del agregado grueso para zonas mayores a 3000 msnm será evaluada mediante la performance de la mezcla según lo señalado en la Subsección 430.02.
- La notación "85/50" indica que el 85% del agregado grueso tiene una cara fracturada y que el 50% tiene dos caras fracturadas.

Figura 2: Requerimiento para los agregados gruesos

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

### Agregado fino

El sistema de clasificación SUCS, define al agregado fino como a los pasantes del tamiz con abertura de 4.75 mm. y retenido en el tamiz con abertura de 75

µm. La procedencia del agregado fino para el empleo de una mezcla asfáltica deberá ser producto de roca triturada. cabe resaltar que existen restricciones en el uso del agregado fino de procedencia natural, frecuentemente éste se emplea para pavimentos de poca demanda vehicular y livianos, la porción a utilizar deberá ser un máximo de 10% del total de agregado combinado y que no sobrepase la cantidad de agregado fino triturado proyectado, la medida de esta indicación es con el afán de evitar la merma de la resistencia a la rigidez final de la mezcla asfáltica. Padilla Rodríguez (2004)

### Requerimientos para agregado fino según MTC - EG 2013

El agregado fino debe ser constituido por arena producto de la chancadora/trituradora o una mezcla de ella con arena natural. La proporción admisible de esta última será establecida en el diseño aprobado correspondiente.

Los granos del agregado fino deberán cumplir con la dureza normada, impolutos y de superficie rugosa y angular. El material deberá estar libre de cualquier sustancia, que impida la adhesión con el asfalto y deberá cumplir los requisitos de control de calidad normados en las especificaciones. Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú, (2013)

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

\*\*Excepcionalmente se aceptarán porcentajes mayores sólo si se aseguran las propiedades de durabilidad de la mezcla asfáltica.

- La adherencia del agregado fino para zonas mayores a 3000 msnm será

Figura 3: Requerimiento para los agregados finos

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

### **Polvo mineral (Fíller)**

De acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), es definida como polvo mineral a una parte del agregado pétreo que se ubica debajo de la malla número 200, Por otra parte, la norma europea UNE. EN 933.2 el filler es diferenciada por ser la parte del agregado pétreo que se ubica por debajo del tamiz 0.063 milímetros. El filler es un producto comercial que se presenta con característica pulverulenta o un polvo, generalmente calizo, y su utilización especial está en la elaboración del mastico para mezclas asfálticas. Tratándose de un producto comercial, debe ser garantizado su control de calidad y conocerse sus propiedades, así como su pronóstico desempeño dentro de la mezcla. También mencionar el filler de recuperación, es aquello que se obtiene de las plantas asfálticas, en el que no se sabe con certeza sus componentes y/o propiedades que podrían estar dentro o fuera de las normativas, por ser un filler producto del residuo.

La función del filler es de rellenar los vacíos existentes entre los agregados pétreos, contribuir a su consistencia, manejabilidad, la resistencia al agua y envejecimiento. La presencia del filler en la mezcla asfáltica aumenta su resistencia a las deformaciones. Padilla Rodríguez, (2004)

### **La norma peruana EG 2013 indica que para el filler se debe considerar lo siguiente:**

El polvo mineral o llenante provendrá de los procesos de trituración de los agregados pétreos o podrá ser de aporte de productos comerciales, generalmente cal hidratada o cemento portland. Podrá usarse una fracción del material proveniente de la clasificación, siempre que se verifique que no tenga actividad y que sea no plástico. Su peso unitario aparente, determinado por la norma de ensayo MTC E 205, deberá encontrarse entre 0,5 y 0,8 g/cm<sup>3</sup> y su coeficiente de emulsibilidad (NLT 180) deberá ser inferior a 0,6. (N.P). Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú, (2013)

### **Cemento Asfáltico De Petróleo (CAP)**

Son producidos especialmente por presentar propiedades propias para un uso adecuado en la construcción de pavimentos flexibles. Es apropiado para

aplicaciones en proyectos de pavimentación por sus propiedades impermeabilizantes, aglutinantes, durabilidad, flexibilidad y alta resistencia a los ácidos y álcalis en general. Su clasificación es de acuerdo a su consistencia medida por la viscosidad dinámica o absoluta y por su penetración (PEN). Huamán Guerrero (2022)

### Asfalto

Es una compleja mezcla de hidrocarburos con altos pesos moleculares, el cual tiene las características de un cuerpo viscoso semi elástico, de color oscuro y no cristalino, se puede obtener producto de la destilación artificial o natural del petróleo. Es el residuo más pesado y sólido que es residuo después de que se hayan extraído los componentes más ligeros del crudo. En palabras simples el asfalto se puede clasificar como el desecho de la refinación, pero visto desde nuestra perspectiva ingenieril es un producto que tiene un abanico de utilidades dentro de la construcción sobre todo en pavimentos flexibles, denominados también carpeta bituminosa, con propiedades resaltantes como es ductilidad, flexibilidad, y tenacidad material que los compone. Padilla Rodríguez, (2004)

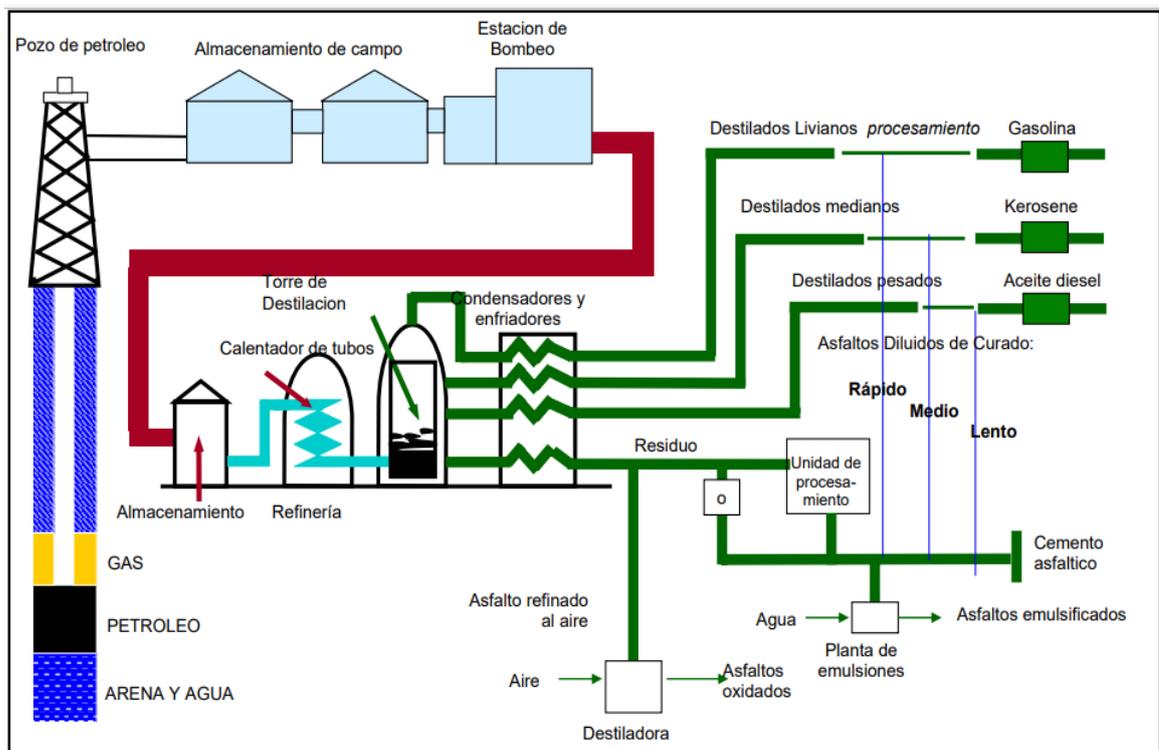


Figura 4: Refinamiento del petróleo

Fuente: Minaya González & Ordóñez Huamán, (2006)

### Requerimientos para el cemento asfáltico según MTC - EG 2013

El cemento asfáltico a emplear en los riegos de liga y en las mezclas asfálticas elaboradas en caliente será clasificado por viscosidad absoluta y por penetración. Su empleo será según las características climáticas de la región, la correspondiente carta viscosidad del cemento asfáltico y tal como lo indica la Tabla 415-01, según lo establecido en Proyecto y aprobado por el Supervisor.

Temperatura Media Anual			
24°C o más	24°C - 15°C	15°C - 5°C	Menos de 5°C
40-50 ó 60-70 o modificado	60-70	85-100 120-150	Asfalto Modificado

Figura 5: Selección de tipo de cemento asfáltico

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

El cemento asfáltico debe presentar un aspecto homogéneo, libre de agua y no formar espuma cuando es calentado a la temperatura de 175°C.

### Polímeros

Según (Wulf, 2008), son sustancias de elevada masa molecular, que están unidas por miles de pequeñas moléculas llamadas monómeros (compuestos químicos con moléculas simples). Es así como se forman moléculas gigantes de y adoptan diferentes formas: cadenas escalonadas, cadenas que no se deforman a altas temperaturas, cadenas largas y sueltas.

Los polímeros termoplásticos son los de mayores demandas, utilizados para modificar mezclas asfálticas debido a su resistencia a altas temperaturas manteniendo casi intacta sus propiedades. Estos polímeros a su vez se dividen en dos: Elastómeros y plastómeros. Los tipos de elastómeros más utilizados para modificar asfaltos son los cauchos naturales como el estireno butadieno-estireno (SBS), cauchos sintéticos derivados del petróleo (Estireno-butadieno-caucho, SBR) y el grano de llanta reciclado y triturado (GCR). Dentro los plastómeros se encuentran: el polietileno de alta y baja densidad, polipropileno (PP), poliestireno (PS), etc. (Rondón & Reyes, 2015).

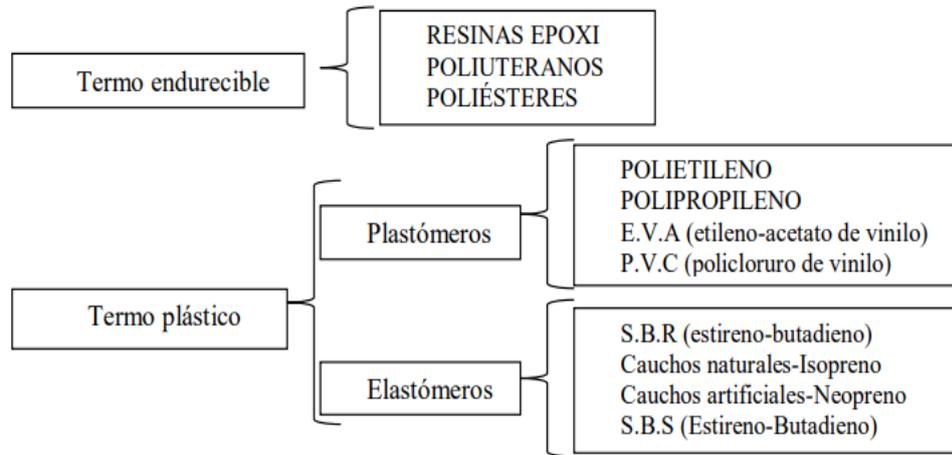


Figura 6: Clasificación de polímeros

Fuente: Montejo (2006)

### Polímeros SBS

El estireno-butadieno-estireno, usualmente abreviado SBS (Styrene-Butadiene Styrene), es un elastómero termoplástico sintético el cual se obtiene mediante la polimerización de una combinación de estireno y de butadieno. Este es un caucho duro, utilizado para objetos como cubiertas de neumáticos, suelas de zapatos y otros en donde se necesite durabilidad. (SBS Tecnología de los plásticos, 2011).

El SBS brinda un especial coeficiente de fricción superficial, con baja de formación permanente, con una mucha resistencia a la tracción, muy buen comportamiento a bajas temperaturas, procesabilidad y excelentes propiedades eléctricas. (SBS Tecnología de los plásticos, 2011)

### El caucho

En el mercado global el uso del caucho es de origen sintético y el natural. El primero, son derivados de distinto polímeros que son bastante usados para una gama de productos; por su parte, el caucho de origen natural proviene de sudeste asiático. Cabe resaltar que el 75 % del caucho natural y el 60% del sintético se destinan a la industria de los neumáticos y afines (Correa, 2016).

Propiedades y aplicaciones del Caucho Natural, el caucho en su estado original se caracteriza por tener la propiedad de buena resistencia a la abrasión, baja resistencia al calor, ozono y a los aceites debido a su comportamiento elastómero.

El comportamiento mecánico de éste depende directamente de la variación de la temperatura y del tiempo, el cual se le conoce como comportamiento visco elástico, que dependerá del tiempo de la carga sometida y de la cantidad de carga aplicada. El caucho a temperaturas bajas tiende a rigidizarse y cuando se acerca a las temperaturas de congelamiento la estructura es fibrosa, y cuando pasa los 100 grados Celsius llega comportarse de manera plástica, cabe mencionar que, si este material se somete a fuertes estiramientos y deformaciones, no recobra su estado inicial (Moreno, 2016).

### 2.2.3. Propiedades de una MAC

#### **PROPIEDADES MECÁNICAS**

##### **La Estabilidad**

Esta propiedad guarda relación con la capacidad del asfalto para resistir deformaciones por el efecto de las cargas de tráfico y evitar el desplazamiento horizontal, depende de la rugosidad y cohesión interna.

La rugosidad se enlaza con la forma geométrica y la superficie del agregado; la cohesión depende de las propiedades del ligante.

Los agregados pétreos de una mezcla asfáltica se deben caracterizar por tener superficie fracturada y rugosa, usualmente se elabora en una planta chancadora de rocas. Los agregados con las especificaciones mencionadas tienen una mejor adherencia y resistencia al corte, en vez de los agregados cuyas partículas son con características ovoides y se desplazan entre ellas.

La estabilidad de una mezcla asfáltica se relaciona con la cantidad de asfalto en ella. Cuando se tienen mayor contenido de asfalto la mezcla es más estable hasta un determinado límite, a este le llamaremos óptimo contenido de asfalto, posterior a ello la estabilidad baja. Al aumentar asfalto en la mezcla, la película de asfalto que bordea los agregados deja que estos se acomoden. En caso la película de asfalto sea de un gran espesor se impedirá la cohesión entre estas. Minaya González & Ordóñez Huamán (2006)

##### **Durabilidad**

Es una propiedad de la mezcla asfáltica que depende de la capacidad a la resistencia de la desintegración del agregado, al desempeño del asfalto al relacionarse con el medio y prevenir que el asfalto se suelte del agregado.

Las presiones que resistirán los agregados, especialmente en sus esquinas son elevadas, por ende, deben caracterizarse por tener gran resistencia y dureza. Para evitar el desprendimiento de la película de asfalto, los agregados deben repeler al agua.

La película de asfalto tiene una función importante para la durabilidad de la mezcla. Cuando la película es de un gran espesor, como resultado obtendremos una menor cantidad de vacíos de aire, esta retrasa la oxidación que el asfalto sufre al tener contacto con el oxígeno, en donde sus características originales se mantienen por largo tiempo. Los vacíos de aire no se deben disminuir abruptamente ya que el asfalto requiere de área para extenderse en lugares cálidos. Si la película es de un muy menor espesor, el asfalto tendrá una rápida oxidación. (Minaya González & Ordóñez Huamán, 2006, p.169)

### **Flexibilidad**

Es la propiedad por la que el pavimento mantiene su forma a pesar de las deformaciones sin llegar al agrietamiento. El suelo natural se asentará con el pasar del tiempo a causa del servicio, este asentamiento se verá en la superficie y la carpeta tendrá la capacidad de amoldamiento sin sufrir grietas. Minaya González & Ordóñez Huamán, (2006).

### **Trabajabilidad**

Esta propiedad de la mezcla asfáltica tiene la característica de ser moldeable, compuesta y compactada en la pavimentación, para que la mezcla asfáltica caliente sea trabajable debe estar en la temperatura adecuada de compactación, caso contrario perdería la propiedad en mención.

Es por ello que al momento de la composición in situ se suele corroborar la temperatura mínima de la mezcla asfáltica para su adecuada compactación.

### **Resistencia a la fatiga**

Esta propiedad se caracteriza por la resistencia a la repetida acción de las cargas de tránsito. Se ha demostrado que el contenido de vacíos, que están en función del porcentaje de asfalto, y la viscosidad del asfalto guardan mucha relación con la resistencia a la fatiga. Corbacho Chipana (2018)

## **Fluencia**

Es la deformación total expresada en mm. que experimenta una probeta al realizarse el ensayo Marshall a una mezcla asfáltica desde el inicio de la aplicación de carga en el ensayo de estabilidad, hasta el momento de la falla. Anguas, Delgado Alamilla, Gómez López, Alonso Romero, & Alarcón Orta (2004)

## **PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS**

Es fundamental considerar las propiedades volumétricas dentro de la mezcla asfáltica, como son los volúmenes de asfalto y de los componentes; o como se suele llamar, los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica. En esta sección describiremos el análisis volumétrico de una MAC, que es imperiosa en muchos procedimientos de diseño. Las propiedades volumétricas de una MAC compactada (Contenido de asfalto, vacíos llenos de asfalto, vacíos de agregado mineral y vacíos de aire, brindan una probable indicación del desempeño de la mezcla asfáltica. Es menester comprender el concepto y los procesos que se describen en el presente capítulo para tomar decisiones pertinentes a la selección del diseño de mezclas asfálticas. Lo descrito en esta sección aplica a probetas obtenidas de campo como a mezclas elaboradas en planta/laboratorio. (Anguas, Delgado Alamilla, Gómez López, Alonso Romero, & Alarcón Orta, 2004)

### **Vacíos en el agregado mineral (VMA)**

Es el espacio vacío intergranular entre las partículas del agregado de una mezcla asfáltica compuesta, en esta incluye el contenido de asfalto efectivo y los vacíos de aire, expresado como un porcentaje del volumen total de la muestra.

El VMA es posible calcular sobre la base de la gravedad específica neta del agregado y expresado como un porcentaje. Por lo tanto, el VMA puede estimarse sustrayendo el volumen del agregado determinado por su gravedad específica neta, del volumen neto de la mezcla asfáltica compactada. La fórmula utilizada de las dos maneras para el cálculo del VMA es la siguiente:

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb} \times P_s}{G_{sb}}$$

Donde:

VMA = vacíos en el agregado mineral (porcentaje del volumen neto)

$G_{sb}$  = gravedad específica neta del total de agregado

$G_{mb}$  = gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada (ASTM D 1188 O D 2726/AASHTO T 166)

$P_s$  = contenido de agregado, porcentaje del total de la masa de la mezcla asfáltica

O, si la composición de la mezcla es determinada como el porcentaje de la masa del agregado:

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb}}{G_{sb}} \times \frac{100}{100 + P_b} \times 100$$

Donde:

$P_b$  = contenido de asfalto, porcentaje de la masa del agregado

(Anguas, Delgado Alamilla, Gómez López, Alonso Romero, & Alarcón Orta, 2004)

### Contenido de asfalto efectivo (Pbe)

Esta representa el contenido de asfalto total utilizado en una mezcla asfáltica menos la cantidad de asfalto absorbido en las partículas del agregado.

Es la parte del contenido total de asfalto que permanece en el exterior del agregado pétreo, dicho contenido es el que se desempeña como aglutinante dentro de la mezcla asfáltica. La fórmula para el cálculo es la siguiente:

$$P_{ba} = 100 \times \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{sb} G_{se}} \times G_b$$

Donde:

$P_{be}$  = contenido de asfalto efectivo, porcentaje de la masa total de la mezcla

$P_b$  = contenido de asfalto, porcentaje de la masa total de la mezcla

$P_{ba}$  = asfalto absorbido, porcentaje de la masa del agregado

$P_s$  = contenido de agregado, porcentaje total de la masa de la mezcla

(Anguas, Delgado Alamilla, Gómez López, Alonso Romero, & Alarcón Orta, 2004)

### Vacíos de aire (Va)

Es el volumen total de pequeñas bolsas de aire atrapadas entre las partículas cubiertas del agregado sólido en una mezcla asfáltica compactada, el cual se expresa como el porcentaje del volumen neto de la mezcla del pavimento compactado.

El cálculo del porcentaje de vacíos de aire dentro de la mezcla compactada se estima con la siguiente fórmula.

$$V_a = 100 \times \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}}$$

Donde:

$V_a$  = vacíos de aire en la mezcla compactada, porcentaje del volumen total

$G_{mm}$  = gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica

$G_{mb}$  = gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada

### **Vacíos llenos de asfalto (VFA)**

Porción del porcentaje del volumen de espacio vacío intergranular entre las partículas del agregado, que es ocupado por el asfalto efectivo. Se expresa como la porción de  $(VMA - V_a)$  entre VMA. (Anguas, Delgado Alamilla, Gómez López, Alonso Romero, & Alarcón Orta, 2004)

$$VFA = 100 \times \frac{VMA - V_a}{VMA}$$

Donde:

VFA = vacíos llenados con asfalto, porcentaje de VMA

VMA = vacíos en el agregado mineral, porcentaje del volumen total

$V_a$  = vacíos de aire en mezclas compactadas, porcentaje del volumen total

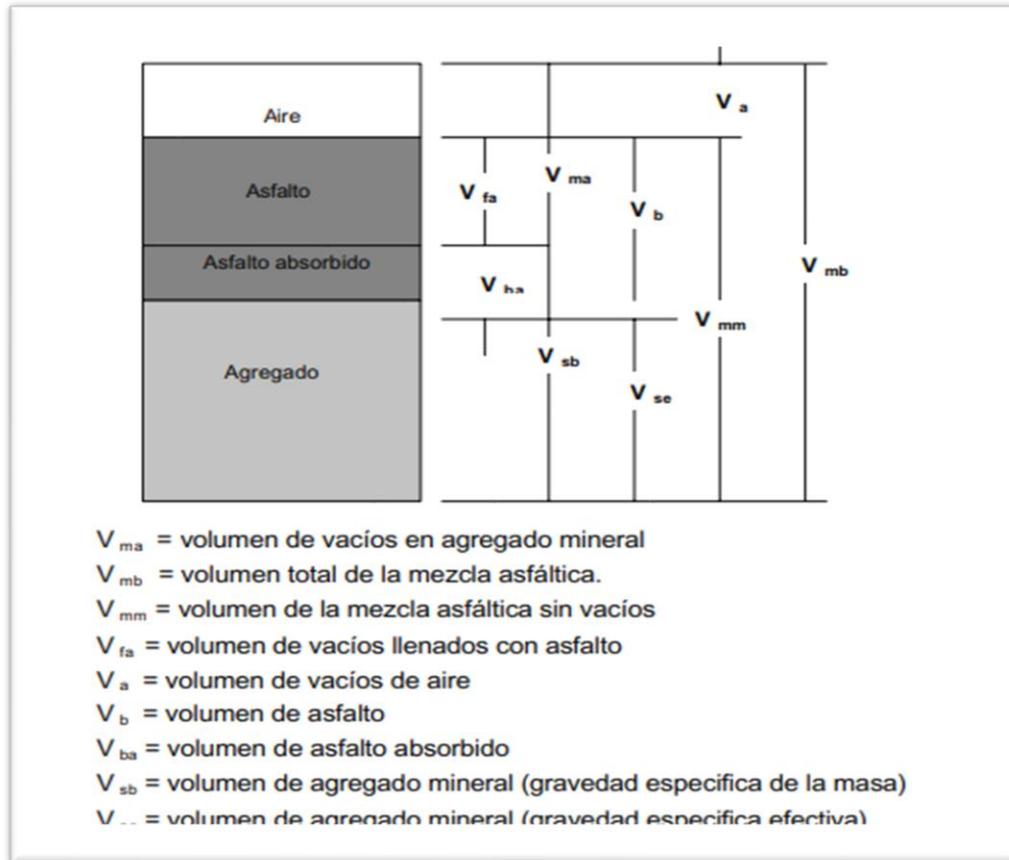


Figura 7: Componente del diagrama de compactación de una HMA

Fuente: Anguas, Delgado Alamilla, Gómez López, Alonso Romero, & Alarcón Orta, (2004)

Los vacíos en el agregado mineral (VAM) y vacíos de aire ( $V_a$ ), se expresan en porcentaje con respecto al volumen total compactado. Los vacíos llenos de asfalto (VFA) son el porcentaje del VAM llenado con el asfalto efectivo.

Debido a que el vacío de aire, VAM y VFA son cantidades medidas en unidades de volumen; por esa razón una mezcla asfáltica, primeramente, debe ser diseñada o analizada sobre la base del volumen. Para casos de diseño, este acercamiento volumétrico puede ser fácilmente cambiado a valores de masas, para proveer una mezcla de diseño.

#### 2.2.4. Diseño Marshall

Este método es aplicable solo a mezclas asfálticas en caliente para pavimentación que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1") o menor.

El método Marshall es un experimento de laboratorio dirigido al diseño de una adecuada mezcla asfáltica en caliente por medio del análisis de su estabilidad/fluencia y densidad de vacíos que garanticen dicha mezcla asfáltica en caliente durable.

Es el método de diseño más usual, consiste en someter una muestra cilíndrica de mezcla a una carga vertical hasta que se dé la rotura de la muestra. La prensa que aplica esa carga cuenta con un medidor de fluencia que mide la deformación del cuerpo de prueba en centésimo de pulgada (0.01”) (Asphalt Institute, 1992).

### **Parámetros a determinar mediante el método de diseño Marshall**

Según (Asphalt Institute, 1992), los parámetros son los siguientes:

#### **Determinación del peso específico total:**

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

#### **Ensayo de estabilidad y fluencia:**

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

#### **Valor de estabilidad Marshall:**

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

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

### **Valor de fluencia Marshall**

La fluencia Marshall es la medida del desplazamiento, teniendo como unidad de medida a la cuarta parte de un milímetro deformado en la briqueta. Dicha deformación es apreciada cuando disminuye el diámetro vertical de la briqueta. Cuando el comportamiento de las briquetas es bajo en fluencia y altos en estabilidad Marshall es considerada como muy frágiles. Las mezclas que tienen valores bajos de fluencia y valores muy altos de estabilidad Marshall son consideradas demasiado frágiles y rígidas para un pavimento en servicio. Aquellas briquetas que tienen valores elevados de fluencia se consideran muy plásticas y tiene tendencia a deformarse bajo las cargas aplicadas a través de los neumáticos.

Corbacho Chipana (2018)

#### 2.2.5. Deformaciones

Las deformaciones en los pavimentos son surcos que se forman a lo largo del eje longitudinal de circulación de vehicular, estos canales representan la acumulación de pequeñas deformaciones permanentes producidas por las repetidas aplicaciones de carga producto del mismo rodado vehicular sobre la superficie del pavimento y es uno de los tipos de deterioro que más preocupa dentro del estudio del comportamiento de las mezclas asfálticas.



*Figura 8: Ahuellamiento en un pavimento flexible con un nivel de severidad bajo*

*Fuente: Del Carpio Molero & Correa Vásquez, (2019)*

### **Permanente (Ahuellamiento)**

Una deformación permanente o ahuellamiento, es una falla superficial que se origina en la carpeta de rodadura y se caracterizan por presentar deformaciones continuadas en el trayecto del neumático vehicular que pasa constantemente. Esta falla se caracteriza por presentar una longitud considerable, por ello, para poder clasificarlo como ahuellamiento debe tener un trayecto ahuellado de al menos 6 metros lineales.

Una causa común de esta falla en la carpeta de rodadura es debido a la continua repetición de cargas vehicular en zonas longitudinales específicas; Además, está en función a otros factores que apuran el daño, como puede ser un diseño inapropiado del pavimento que no resiste el tráfico para el que fue proyectado o un aumento exorbitante a lo previsto. Correa Vásquez & Del Carpio Molero, (2019).

Este tipo falla es el que mayormente preocupa a los proyectistas del diseño de mezclas asfálticas. La causa es debido a la poca resistencia de una mezcla asfáltica “blanda” de aguantar grandes cargas sin llegar a fallar. Por ende, en cada paso de grandes cargas se acumula pequeñas deformaciones, lo que como resultado llamaremos el ahuellamiento en la carpeta de rodadura. El ahuellamiento, se presenta como una mezcla asfáltica “blanda”, el cual sucede normalmente en épocas de elevadas temperaturas, cuando la carpeta de

rodadura está expuesta a temperaturas superiores a los 60°C. Esto podría darnos una conclusión ligera de que las huellas son causadas por la elevada temperatura, pero es más idóneo mencionar que se origina por la poca o nula resistencia de la mezcla asfáltica a las deformaciones, que también depende de la calidad de los agregados y el ligante asfáltico utilizados. Asimismo, es menester mencionar que, para aumentar la resistencia a las deformaciones permanentes de la carpeta de rodadura, ésta debe tener un comportamiento a un sólido elástico a elevadas temperaturas. El objetivo es que, al ser sometido a cargas recupere su posición normal. Para evitar la falla en mención, es hacer uso de asfaltos más “duros” e ir por los agregados pétreos con forma cúbica que generalmente es producto de una chancadora por impacto y que las caras tenga una textura rugosa que brinda suficiente fricción interna generando resistencia al desplazamiento. En consecuencia, cuando la carpeta de rodadura sea sometida a la carga vehicular, los componentes de la mezcla se comportarán como un sólido elástico, lo que les permitirá recuperar su forma original pasado la carga. Con la indicación mencionada se prevendrá la formación de deformaciones permanentes. También mencionar que existen equipos de laboratorio y procedimientos de análisis que se puede hacer uso en la fase de diseño para examinar si un pavimento es susceptible al ahuellamiento. Huamán Guerrero & Chang Albitres (2012)

#### 2.2.6. Ensayo de rueda cargada de Hamburgo

La máquina de Hamburgo fue desarrollada por Helmut Wind Incorporated de Hamburgo, Alemania en 1970, tomando como idea principal un modelo de origen británico. Está normado en EE.UU. por la norma AASHTO T 324-04 Standard Method of test of Hamburg Wheel- Track Testing of Compacted Hot Mix Asphalt y en Europa por la norma UNE-EN 12697-22 Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente, Parte 22: Ensayo de rodadura, donde está catalogado como un dispositivo de tamaño pequeño y se caracteriza el ensayo bajo agua en el procedimiento B.

El ensayo de Hamburgo permite evaluar mezclas asfálticas en relación a su resistencia a la humedad y al ahuellamiento y permite el ensayo de dos muestras

simultáneamente, mediante dos ruedas paralelas. Las pruebas se realizan sobre losas de 260 milímetros de ancho y 320 milímetros de largo, el espesor es variable aunque típicamente se utiliza de 40 milímetros, las probetas hechas en laboratorio con estas dimensiones se compactan normalmente para poseer un índice de huecos de  $7 \pm 1$  % para mezclas densamente graduadas y 5% a 6% para mezclas tipo S.M.A. (compactadas por amasado), también se pueden realizar pruebas sobre probetas cilíndricas (de 15.2 cm o 25,4 cm de diámetro, 6.2 cm de espesor y densidad de 93%). La temperatura de ensayo de las probetas bajo agua es variable, y esta va desde los 25°C a los 70°C, pero la temperatura de ensayo más común es de 50°C.

Se aplica una carga de 705 N sobre una rueda de acero de 47 milímetros de ancho. La rueda se desplaza hacia adelante y hacia atrás a lo largo de la superficie de la losa. El ensayo tiene una duración de 20.000 pasadas o hasta que se obtienen 20 milímetros de deformación. La frecuencia de paso de la rueda es de 53 pasadas por minuto (26,5 ciclos por minuto) y a una velocidad de 34 cm/s.

El Método Hamburgo, conocido también como Sperbildungsgerat en Alemania, ha sido utilizado como una herramienta de especificación desde los años 70's en Hamburgo, Alemania. La prueba de Hamburgo (AASHTO T324) tiene el objetivo de medir la resistencia a las roderas y a los desgranamientos de una mezcla asfáltica compactada. La prueba de simulación permite identificar materiales con problemas de adherencia de asfalto en presencia de agua, así como estructuras minerales deficientes y materiales blandos que con la acción del tráfico pueden ocasionar desgranamientos y/o deformaciones permanentes (Noreña Valverde, 2008).



*Figura 9. Máquina de Hamburgo*

*Fuente: Noreña Valverde (2008)*

El criterio de falla en la especificación definida por la Ciudad de Hamburgo es de 4 mm de deformación máxima en autopistas y 2.5 mm en zonas industriales. En Estados Unidos de Norteamérica el Departamento de Transporte de Colorado utiliza el criterio de falla de 10 mm máximo para considerar una mezcla de buena calidad.

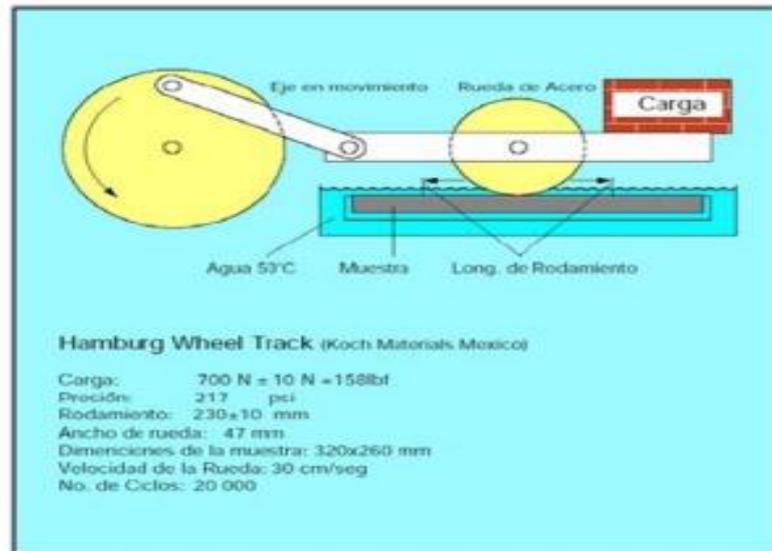


Figura 10: Máquina de Hamburgo

Fuente: Noreña Valverde (2008)

Los resultados del ensayo son ploteados en un gráfico (ver la siguiente figura) que indica el número de ciclos por deformación permanente. La curva de resultados del ensayo muestra una parte relativa a la consolidación de la muestra, otra región donde la inclinación de la curva es conocida como "Rutting Slope", y otro tramo donde la inclinación de la curva es denominada "Stripping slope" y el punto de inflexión conocido como "Stripping Inflection Point". La deformación medida en 1,000 ciclos es el tramo relativo a la consolidación de la muestra.

El punto "Stripping Inflection Point" es el número de pasadas correspondiente al punto de inflexión de la curva y ello representa el grado de resistencia de la mezcla al daño por humedad, siendo considerado además como el punto de inicio del stripping. En los pavimentos con buen desempeño en el que se refiere a la adhesividad o "Stripping Inflection Point" es superior a 10,000 ciclos, mientras en los pavimentos que presentan problemas de adhesividad en menos de 1 año, el "Stripping Inflection Point" han sido obtenidas valores inferiores a

3,000 ciclos, además se ha observado que los resultados del HWTD son sensibles a algunas propiedades del agregado, como, por ejemplo, la presencia de arcilla en la superficie de los agregados. (Noreña Valverde, 2008).

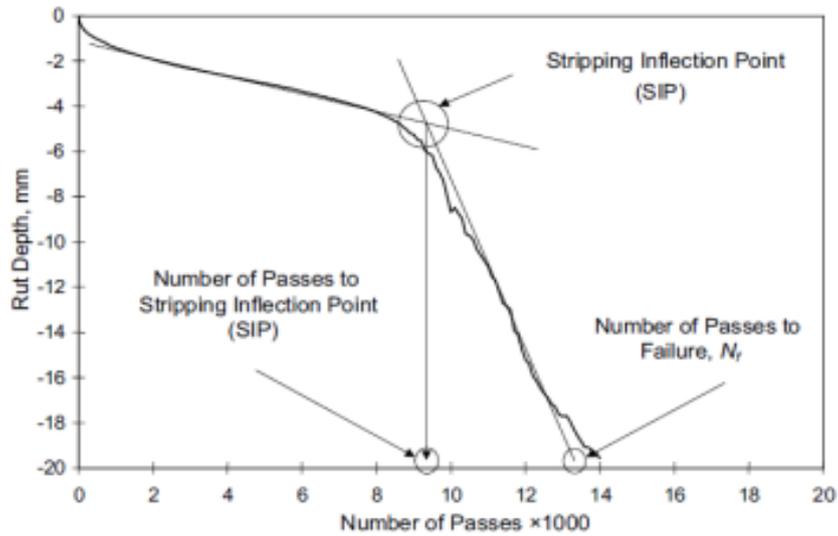


Figura 11. Gráfico esquemático de los resultados de HWTD

Fuente: AASTHO T 324

### 2.3. Definición de términos básicos

**Carpeta de rodadura:** Es la capa superior de un pavimento asfáltico. Instituto del asfalto MS1, (1991)

**Concreto asfáltico:** Es una mezcla asfáltica de alta calidad producida en caliente, compuesta de cemento asfáltico y agregados bien gradados de alta calidad, completamente compactada en una masa densa y uniforme. Instituto del asfalto MS1, (1991)

**Estructura del pavimento asfáltico:** Es una estructura de pavimento con todas sus capas de mezcla asfáltica o de una combinación de capas asfálticas y de capas de agregados no tratados colocadas encima de la sub rasante natural o mejorada. Instituto del asfalto MS1, (1991)

**Muestra:** Es un segmento de una población (lote) seleccionado para representar a toda la población. Instituto del asfalto MS1 (1991)

**Sub rasante:** Es el suelo preparado para soportar la estructura del pavimento. Es la cimentación de la estructura del pavimento. También es denominada suelo de basamento o suelo de cimentación. Instituto del asfalto MS1, (1991)

Suelo: Sedimentos u otras acumulaciones no consolidadas de partículas sólidas producidas por la desintegración física o química de rocas con o sin materia orgánica. ASTM D653

## CAPÍTULO III: SISTEMA DE HIPÓTESIS

### 3.1. Hipótesis

#### 3.1.1. Hipótesis principal

Las propiedades de las mezclas asfálticas inciden en el ahuellamiento.

#### 3.1.2. Hipótesis secundarias

- a) La propiedad de fluencia de la mezcla asfáltica incide en el ahuellamiento.
- b) La estabilidad de la mezcla asfáltica incide en el ahuellamiento.
- c) Los vacíos de aire de la mezcla asfáltica inciden en el ahuellamiento.
- d) Los vacíos llenos de asfáltico de la mezcla asfáltica inciden en el ahuellamiento.
- e) El volumen de vacíos de agregado mineral de la mezcla asfáltica incide en el ahuellamiento.

### 3.2. Variables

#### 3.2.1 Definición conceptual de las variables

- Propiedades de a mezcla asfáltica:

Son cualidades que posee una mezcla asfáltica a fin de resistir a los distintos tipos de esfuerzos y condiciones meteorológicas a los que se somete un pavimento asfáltico, este depende directamente del diseño considerado, donde se debe tomar en cuenta las consideraciones del lugar y parámetros técnicos.

- Ahuellamiento:

Son deformaciones permanentes que se presentan en la carpeta asfáltica producto de la consolidación de los movimientos laterales por causa del tránsito.

### 3.2.2 Operacionalización de las variables

Tabla 1:

#### Operacionalización de variables

VARIABLE	DEF. CONCEPTUAL	DEF. OPERACIONAL	DIMENSIÓN	INDICADORES	INDICE DE MEDICIÓN	UNIDAD DE MEDIDA	ESCALA	INSTRUMENTOS	HERRAMIENTAS
V.I: Propiedades de la mezcla asfáltica	Son cualidades que posee una mezcla asfáltica a fin de resistir a los distintos tipos de esfuerzos y condiciones meteorológicas a los que se somete un pavimento, este depende directamente del diseño considerado, en donde se debe tomar en cuenta las consideraciones del lugar y parámetros técnicos.	Para considerar una mezcla asfáltica en caliente óptima y con una correcta resistencia, las propiedades más relevantes deben ser la Estabilidad, que aporta la resistencia a la deformación y otros signos de desplazamiento, junto con la Durabilidad, la cual es una propiedad que describe su capacidad para resistir los efectos perjudiciales del clima, tránsito y, finalmente la Flexibilidad, propiedad por la que la mezcla pueda amoldarse, sin sufrir agrietamientos o fisuración	FLUENCIA	FLUJO	DEFORMACIÓN	mm	Cuantitativa continua		Ensayo Marshall
			ESTABILIDAD	CARGA MÁXIMA	CARGA APLICADA	Kg	Cuantitativa continua		Ensayo Marshall
			VACIOS DE AIRE	CONTENIDO DE VACIOS	VOLUMEN	%	Cuantitativa continua		Ensayo Marshall
			VACIOS LLENOS DE ASFALTO	CONTENIDO DE ASFALTO EFECTIVO	VOLUMEN	%	Cuantitativa continua	Información de primera fuente, documentos como tesis, artículos informativos, normas, investigaciones previas e informes	Ensayo Marshall
			VOLUMEN DE VACIOS DE AGREGADO MINERAL	CONTENIDO DE VACIOS DE AGREGADO MINERAL	VOLUMEN	%	Cuantitativa continua		Ensayo Marshall
Ahuellamiento	Son deformaciones permanentes que se presentan en la carpeta asfáltica producto de la consolidación de los movimientos laterales por causa del tránsito.	Es un tipo de falla que se produce a consecuencia de la huella de circulación de vehículos.	DEFORMACIONES	Permanentes	Índice de huella	mm	Cuantitativa continua		AASHTO 93

Fuente: Propia

## **CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO**

### **4.1. Tipo y nivel**

#### 4.1.1. Método de investigación

El método de estudio de esta investigación es deductivo, debido a que mediante información de investigaciones anteriores se analizó las conclusiones de la investigación, respecto de la influencia de las propiedades de la mezcla asfáltica que replica en el ahuellamiento.

#### 4.1.2. Orientación de investigación

Esta tesis esta direccionada a una investigación aplicada, debido a que con el análisis de la información recopilada se determinó su aplicación para exponer las propiedades de las mezclas asfálticas influidas al ahuellamiento.

#### 4.1.3. Enfoque de investigación

El enfoque de la presente es cuantitativo, porque los indicadores de la investigación son medibles y/o cuantificables.

#### 4.1.4. Fuente de información

En esta investigación la fuente de información es recolectivo, ya que se recopiló información de fuentes secundarias existentes como tesis, libros y/o artículos con fines similares al estudio.

#### 4.1.5. Tipo de la investigación

La investigación es de tipo descriptivo y correlacional, debido a que hizo basada en investigaciones anteriores, con la finalidad de compendiar información acerca de los resultados obtenidos y no es experimental, con las referencias de las propiedades de la mezcla asfáltica que incide en la deformación permanente.

#### 4.1.6. Nivel de la investigación

La presente es descriptiva, debido a que está direccionada a explicar las propiedades de las mezclas asfálticas que estén relacionadas con las deformaciones permanentes.

En ese sentido, es una tesis explicativa, ya que se especifican los datos obtenidos de las propiedades de la mezcla asfáltica por las distintas investigaciones a analizar.

#### 4.1.7. Diseño de la investigación

La investigación tiene un diseño no experimental, transversal y prospectivo, debido a que se utilizaron datos de investigaciones anteriores relacionadas a las propiedades de mezclas asfálticas y el ahuellamiento.

#### 4.1.8. Población de estudio

La población son todos los pavimentos flexibles diseñados en caliente (MAC) susceptible al ahuellamiento.

#### 4.1.9. Diseño muestral

La muestra de nuestra investigación son los ensayos Marshall y Rueda cargada de Hamburgo.

### **4.2. Relación entre variables**

#### 4.2.1. Identificación de variables

Variable Independiente: Propiedades de la mezcla asfáltica

Variable Dependiente: El ahuellamiento

### **4.3. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

En esta investigación se han utilizado recopilación de datos basados en tesis anteriores entre los años 2018 al 2022, libros teóricos, papers, manuales y normas nacionales.

### **4.4. Procedimientos para la recolección de datos**

El proceso para la recolección de datos fue las referencias bibliográficas, tesis, papers, libros acerca de la teoría en donde se exponen las propiedades mecánicas que tiene una mezcla asfáltica, de ello se ha seleccionado las que influyen en el ahuellamiento.

#### **4.5. Técnicas de procesamiento y análisis de datos**

Las técnicas de procesamiento y análisis de datos de la investigación están basadas en recopilar, clasificar y analizar la información, determinando, de todas las propiedades de las mezclas asfálticas que diferentes autores exponen, las que intervengan en el ahuellamiento.

## **CAPÍTULO V.**

### **PRESENTACIÓN Y ANALISIS DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN**

En este capítulo nos enfocaremos en analizar ensayos pasados referentes al “Diseño de mezcla asfáltica con método Marshall”, y con lo que respecta al fenómeno del ahuellamiento nos basamos en el “Ensayo de Rueda de Hamburgo”. Con lo mencionado se procede a realizar los análisis, por lo cual, se han recolectado datos y resultados de ensayos de laboratorio, ejemplificando los que tienen mayor sintonía con nuestra investigación y que demuestran, en la práctica, la incidencia de la elección de los parámetros de diseño de mezcla en el fenómeno del ahuellamiento. Para este efecto se han analizado 03 investigaciones, como primer caso tenemos la tesis: “Análisis de la estabilidad Marshall y la deformación permanente mediante el ensayo de Rueda cargada de Hamburgo de una mezcla asfáltica modificada en caliente con Fibras de Tereftalato de Polietileno reciclado en la Ciudad del Cusco-2018”, como segundo caso se tiene: “Análisis del comportamiento de una mezcla asfáltica modificada con polímeros SBS Betutec IC y una mezcla asfáltica convencional 60/70” y finalmente como tercer caso se ha tomado la investigación: “Reducción de la deformación permanente en pavimentos diseñados con mezclas asfálticas en caliente a través de la incorporación de polvo de caucho proveniente de neumáticos usados”.

#### 5.1. Materiales.

A continuación, se presentan las características principales de los materiales con los que se han realizaron los ensayos de las investigaciones analizadas.

##### 5.1.1. Materiales: Primer caso.

###### **Agregados pétreos.**

Los agregados pétreos de la investigación estudiada fueron extraídos de la Cantera Morro Blanco, la cual se ubica a 52.8 km de la ciudad del Cusco.

En el siguiente cuadro se exponen las características de la cantera donde se ha extraído los agregados.

Tabla 2:

Características de la cantera

<b>Ubicación</b>	A 52,800 km. L.D. de la ciudad del Cusco
<b>Acceso</b>	52.8 Km. (nivel de asfaltado) más 0.5 Km. (nivel de afirmado)
<b>Propietario</b>	Municipalidad de Pisac
<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	25,000
<b>Profundidad Exploración. (m)</b>	1.2
<b>Limpieza (m)</b>	0.10 m
<b>Nivel Freático. (m)</b>	Se encontró a 1.50 m
<b>Vol. Bruto (m<sup>3</sup>)</b>	30,000
<b>Rendimiento. (%)</b>	85%
<b>Vol. Útil (m<sup>3</sup>)</b>	30,000 x 85% = 25,500
<b>Tipo de Material</b>	Fluvial
<b>Usos y Tratamientos</b>	Mezcla Asfáltica : Procesado (Chancado y zarandeado)
<b>Usos y Rendimientos</b>	Mezcla Asfáltica : 85%
<b>Equipo de Explotación</b>	Excavadora, Cargador, Volquete
<b>Época de Explotación</b>	Época de estiaje

Fuente: Corbacho Chipana, (2018)

De acuerdo a la norma peruana, se ha realizado diversos ensayos donde muestran la aceptación y/o validación para el uso de los materiales la mezcla asfáltica.

Tabla 3:

Análisis de resultados de control de calidad de agregado grueso

<b>Ensayos</b>	<b>Norma</b>	<b>Requisitos</b>	<b>Resultados</b>	<b>Validación</b>
Durabilidad (al Sulfato de Magnesio)	MTC E 209	15 % máx.	0.95 %	Si cumple
Abrasión Los Ángeles	MTC E 207	35 % máx.	23.17 %	Si cumple
Adherencia	MTC E 517	+95	+95	Si cumple
Índice de Durabilidad	MTC E 214	35 % min.	95.75 %	Si cumple
Partículas chatas y alargadas	ASTM 4791	10% máx.	2.77 %	Si cumple
Caras fracturadas	MTC E 210	90/70	100/100	Si cumple
Sales Solubles Totales	MTC E 219	0.5 % máx.	0.05 %	Si cumple
Absorción	MTC E 206	1.0 % máx.	0.77 %	Si cumple

Fuente. Corbacho Chipana, (2018)

Tabla 4:

Análisis de resultados de control de calidad de agregado fino

Ensayos	Norma	Requisitos	Resultados	Validación
Equivalente de Arena (Chancada)	MTC E 114	70 % mín.	78 %	Si cumple
Equivalente de Arena (Arena natural de río)	MTC E 114	70 % mín.	77 %	Si cumple
Angularidad de agregado fino	MTC E 222	40% mín.	48.02 %	Si cumple
Azul de metileno	AASTHO TP 57	8 máx.	6	Si cumple
Índice de Plasticidad (malla N°40)	MTC E 111	NP	NP	Si cumple
Durabilidad ( al Sulfato de Magnesio)	MTC E 209	18 % máx.	7.53 %	Si cumple
Índice de Durabilidad	MTC E 214	35 % mín.	35.02 %	Si cumple
Índice de Plasticidad (malla N°200)	MTC E 111	NP	NP	Si cumple
Sales Solubles Totales (Arena Chancada)	MTC E 219	0.5 % máx.	0.06 %	Si cumple
Sales Solubles Totales (Arena natural de río)	MTC E 219	0.5 % máx	0.07 %	Si cumple
Absorción	MTC E 206	0.5 % máx	0.50 %	Si cumple
Adhesividad de los ligantes Bituminosos a los agregados finos (Método Redel Weber)	MTC E 220	4 min	10	Si cumple

Fuente. Corbacho Chipana, (2018)

### Comparativa de Gradaciones establecidas en la norma EG-2013 para mezcla asfáltica

Se presentan las gradaciones que muestran ambas mezclas comparándolas con lo indicado en la normativa peruana:

Huso Granulométrico

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

Figura 12: Husos granulométricos

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

Mezclas asfálticas convencionales:

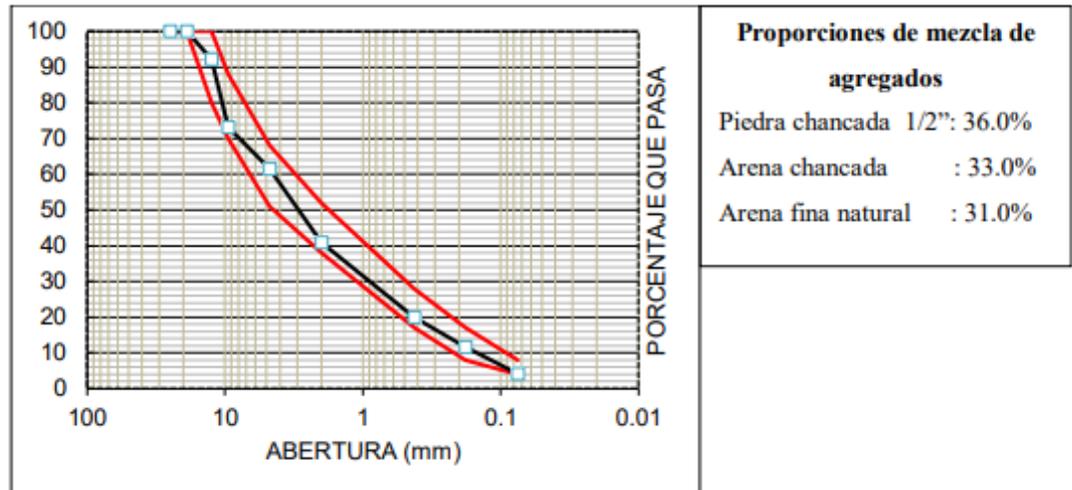


Figura 13: Curva granulométrica para mezcla asfáltica convencional

Fuente. Corbacho Chipana, 2018

Mezclas asfálticas modificadas

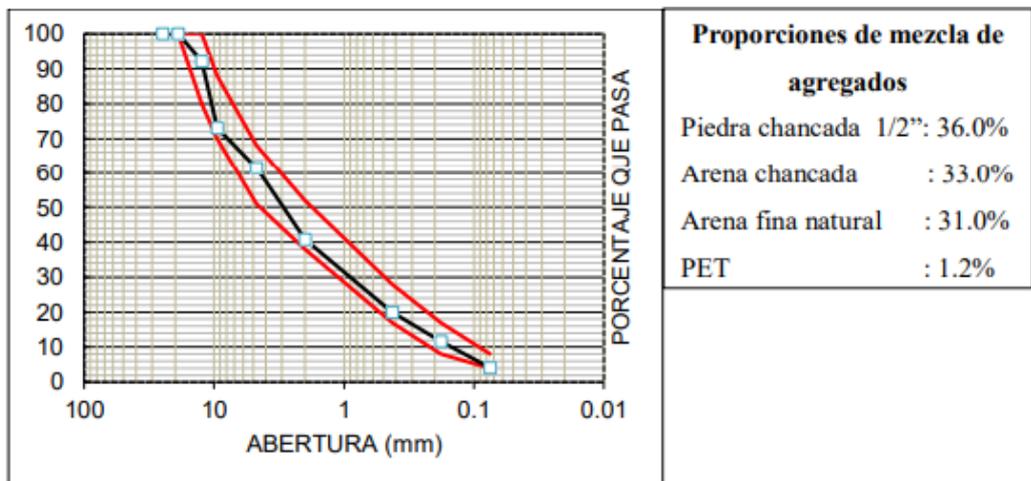


Figura 14: Curva granulométrica para mezcla asfáltica modificada con PET

Fuente. Corbacho Chipana, 2018

### Ligante Asfáltico

El ligante asfáltico que ha sido utilizado para ambas mezclas en la investigación fue PEN 120/150.

Se presenta el reporte control de calidad del ligante utilizado.

Tabla 5:

*Reporte de control de calidad del bitumen asfáltico PEN 120-150*

<b>Ensayos</b>	<b>Norma</b>	<b>Resultados</b>
Penetración de Materiales Bituminosos	MTC E 304	141.67
Ductilidad de Materiales Bituminosos	MTC E 306	75

*Fuente. Corbacho Chipana, 2018*

### **Fibras de tereftalato de polietileno (PET)**

Análisis granulométrico de agregados pétreos y fibras PET

El procedimiento que ha utilizado el investigador, es similar al de un agregado, se inició con el cuarteo y posterior extracción de una cierta cantidad de muestra de cada uno de los agregados (grueso, arena chancada y arena fina natural).

Para las proporciones de fibras PET, se ha realizado un diseño de mezcla asfáltica empleando el método Marshall. Estos fueron realizados con los mismos agregados y la misma cantidad optima de asfalto PEN 120-150, variando solo la sustitución parcial de fibras PET por agregado fino.

El reemplazo realizado fue proporcional a los porcentajes tanto para la arena chancada como para la arena natural, ya que la mezcla de ambas produce el agregado fino.

#### 5.1.2. Materiales: Segundo caso

##### **Agregados pétreos**

Los agregados pétreos de la investigación estudiada fueron extraídos de las Canteras Rumi y Crushing.

De acuerdo a la norma peruana, se ha realizado diversos ensayos donde muestran la aceptación y/o validación para el uso de los materiales la mezcla asfáltica.

Tabla 6:  
Análisis de resultados de control de calidad de agregado grueso

Ensayos	Norma	Requerimiento		Resultados	
		Altitud (msnm)			
		≤ 3000	> 3000		
Durabilidad (al Sulfato de Magnesio)	MTC E 209	18% máx.	15% máx.	4.89	Cumple
Abrasión Los Ángeles	MTC E 207	40% máx.	35% máx.	10.8	Cumple
Adherencia	MTC E 517	95	95	95	Cumple
Índice de Durabilidad	MTC E 214	35% min.	35% min.	59.33	Cumple
Partículas Chatas y Alargadas	ASTM4791	10% máx.	10% máx.	4.5	Cumple
Caras Fracturadas	MTC E 210	85/50	90/70	98.6/90	Cumple
Sales Solubles Totales	MTC E 219	0.5% máx.	0.5% máx.	0.124	Cumple
Absorción	MTC E 206	1.0% máx.	1.0% máx.	0.93	Cumple

Fuente. (Villafana Huamán & Ramírez Villanueva, 2019)

Tabla 7:  
Análisis de resultados de control de calidad de agregado fino

Equivalente de Arena	MTC E 114	60% min.	70% min.	68	Cumple
Angularidad del agregado Fino	MTC E 222	30%min.	40% min.	41.8	Cumple
Azul de metileno	AASHTO TP 57	8 máx.	8 máx.		
Índice de Plasticidad (N° 40)	MTC E 111	NP	NP	N.P.	Cumple
Durabilidad (al Sulfato de Magnesio)	MTC E 209	-	18% máx.	7.23	Cumple
Índice de Durabilidad	MTC E 214	35 min.	35 min.	58	Cumple
Índice de Plasticidad (N°200)	MTC E 111	4 máx.	NP	N.P.	Cumple
Sales Solubles Totales	MTC E 219	0.5% máx.	0.5% máx.	0.446	Cumple
Absorción	MTC E 205	1.0% máx.	1.0% máx.	0.8	Cumple

Fuente. (Villafana Huamán & Ramírez Villanueva, 2019)

## Comparativa de Gradaciones establecidas en la norma EG-2013 para mezcla asfáltica

Alternativamente en esta tesis se ha tomado las gradaciones especificadas en la ASTM D 3515 e Instituto del Asfalto.

Figura 15: Husos granulométricos para mezclas asfálticas en caliente según ASTM D3515

Tamiz	Mezcla Densa								
	Tamaño máximo nominal de agregados								
	2"	1 ½"	1"	¾"	½"	3/8"	Nº4	Nº8	Nº16
Gradación de agregados (grava; fino y Filler si se requiere)									
Porcentaje en peso									
2 ½" (63mm)	100	-	-	-	-	-	-	-	-
2" (50mm)	90-100	100	-	-	-	-	-	-	-
1 ½" (37.5mm)	-	90-100	100	-	-	-	-	-	-
1" (25.0mm)	60-80	-	90-100	100	-	-	-	-	-
¾" (19.0mm)	-	56-80	-	90-100	100	-	-	-	-
½" (12.5mm)	35-65	-	56-80	-	90-100	100	-	-	-
3/8" (9.5mm)	-	-	-	56-80	-	90-100	100	-	-
Nº4 (4.75mm)	17-47	23-53	29-59	35-65	44-74	55-85	80-100	-	100
Nº8 (2.36mm)	10-36	15-41	19-45	23-49	28-58	32-67	65-100	-	95-100
Nº16 (1.18mm)	-	-	-	-	-	-	40-80	-	85-100
Nº30 (600µm)	-	-	-	-	-	-	25-65	-	70-95
Nº50 (300µm)	3-15	4-16	5-17	5-19	5-21	7-23	7-40	-	45-75
Nº100 (150µm)	-	-	-	-	-	-	3-20	-	20-40
Nº200 (75µm)	0-5	0-6	1-7	2-8	2-10	2-10	2-10	-	9-20

Fuente: Manual ASTM – 2014

## Granulometría - Mezclas asfálticas modificadas

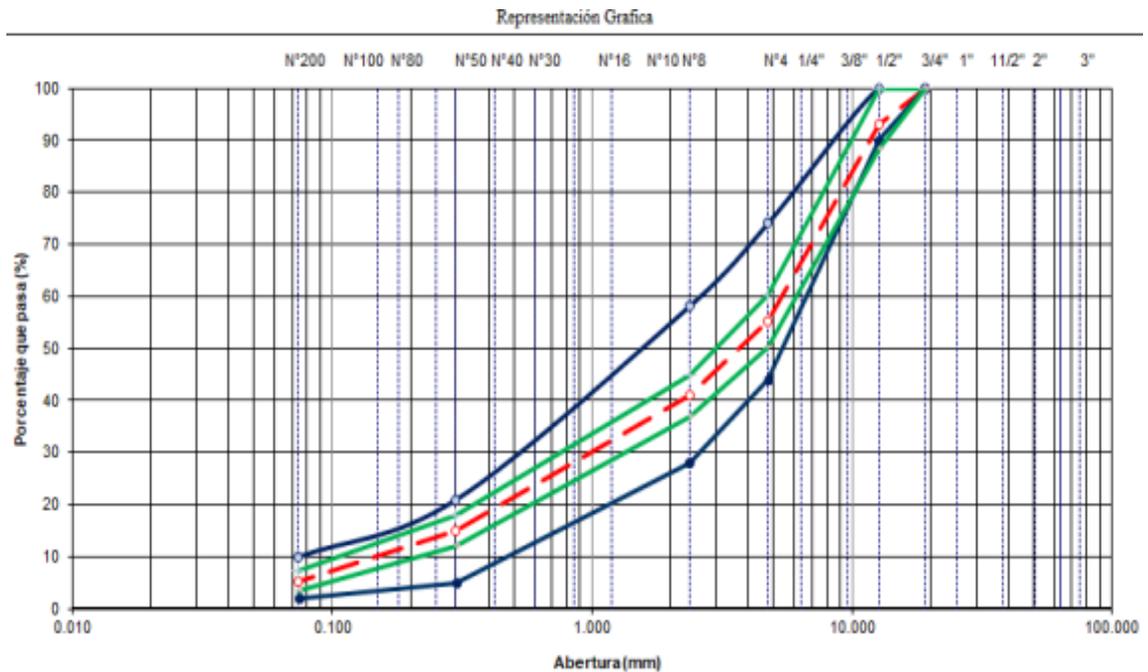


Figura 16: Curva granulométrica para mezcla asfáltica modificada

Fuente. (Villafana Huamán & Ramírez Villanueva, 2019)

### Ligante Asfáltico para MAC convencional

El ligante asfáltico que ha sido utilizado para la mezcla convencional en la investigación fue PEN 60/70.

### Ligante Asfáltico para MAC modificada

El asfalto que ha sido utilizado para la mezcla modificada en la investigación fue BETUTEIC, este es un asfalto modificado con polímeros elastoméricos, como el SBS u otros. Los asfaltos modificados con polímeros poseen mejor comportamiento que los convencionales, tanto en bajas como elevadas temperaturas, dando así una vida útil mayor al pavimento. (Betutec – TDM Asfaltos).

### 5.1.3. Materiales: Tercer caso

#### Agregados pétreos

Los agregados granulares, como los finos y gruesos utilizados en esta tesis fueron de la planta procesadora de agregados, “T y R Construcciones y Servicios SAC”, ubicada en el departamento de Lima, distrito de Ate, altura del Km 14.8 de la carretera central.

#### Caracterización y ensayos de los agregados pétreos utilizados para la mezcla convencional y modificada.

REQUERIMIENTOS PARA LOS AGREGADOS GRUESOS				
ENSAYOS	NORMA	REQUERIMIENTO		RESULTADOS
		ALTITUD ( msnm)		
		≤ 3000	> 3000	
Durabilidad ( al sulfato de magnesio)	MTC E 209	18% máx.	15% máx.	2.33%
Abrasión de los ángeles	MTC E 207	40% máx.	35% máx.	16.89%
Partículas chatas y alargadas	ASTM 4791	10% máx.	10% máx.	8.10%
Caras fracturadas	MTC E 210	(1 cara) 85/50 (2 caras)	(1 cara) 90/70 (2 caras)	56.19% / 60.40%
Absorción	MTC E 206	1% máx.	1% máx.	0.64%

Figura 17: Resultado de los ensayos del agregado grueso.  
Fuente: Contreras Martínez & Mamani Vilcatoma, (2019)

REQUERIMIENTOS PARA LOS AGREGADOS FINOS				
ENSAYOS	NORMA	REQUERIMIENTO		RESULTADOS
		ALTITUD ( msnm)		
		≤ 3000	> 3000	
Equivalente de arena	MTC E 114	60% min	70% min	71.00%
Índice de plasticidad ( malla N°40)	MTC E 111	NP	NP	NP
Índice de plasticidad ( malla N°200)	MTC E 111	4 máx.	NP	NP
Durabilidad ( al sulfato de magnesio)	MTC E 209	-	18% máx.	5.45%
Absorción	MTC E 206	1% máx.	1% máx.	0.27%

Figura 18: Resultado de los ensayos del agregado fino.  
Fuente: Contreras Martínez & Mamani Vilcatoma, (2019)

## Granulometría para mezcla Convencional

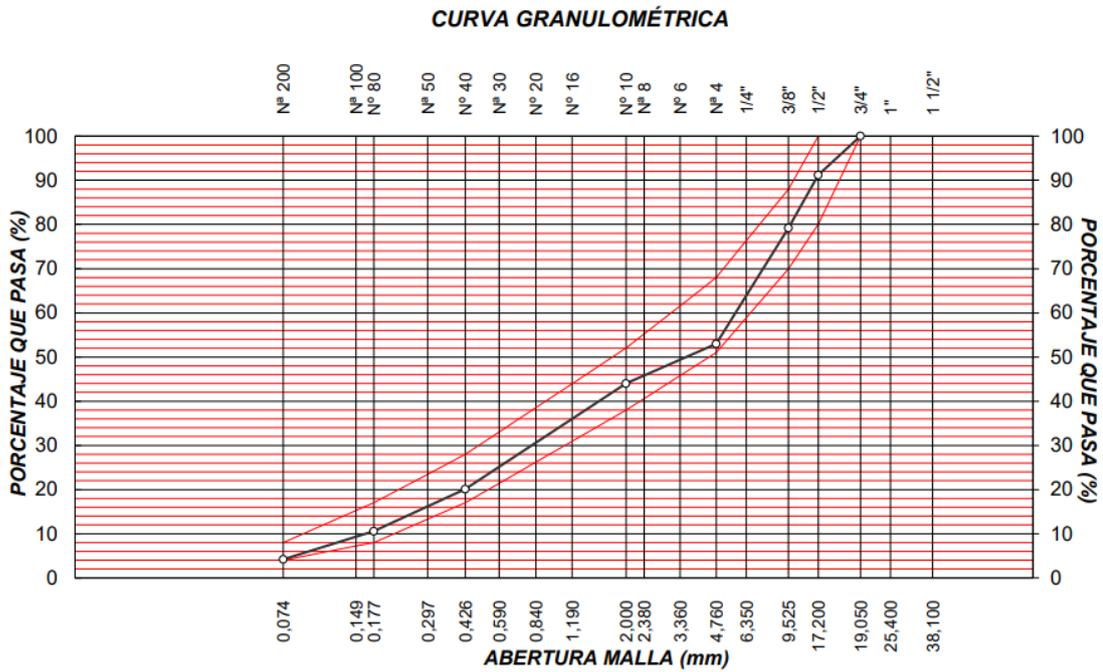


Figura 19: Curva granulométrica para la mezcla convencional.  
Fuente: Contreras Martínez & Mamani Vilcatoma, (2019)

## Granulometría para mezcla modificada con 1% de caucho reciclado

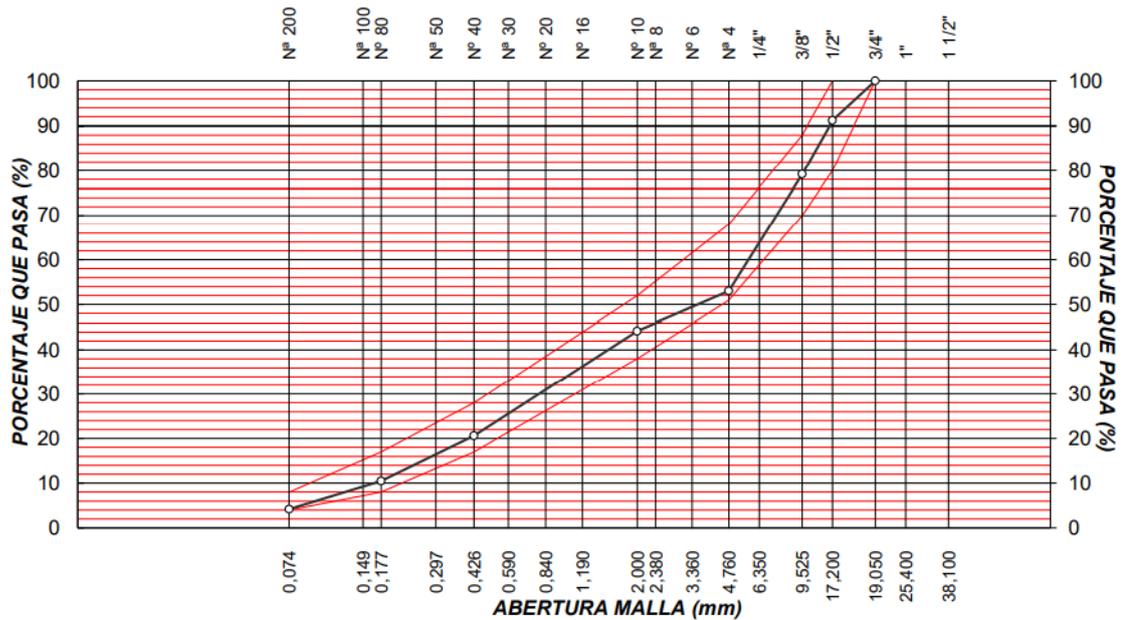


Figura 20: Curva granulométrica para la mezcla modificada con caucho al 1%.  
Fuente: Contreras Martínez & Mamani Vilcatoma, (2019).

## Ligante

En esta investigación se trabajó con un cemento asfáltico de penetración PEN 120/150, esta elección debido a que se proyecta para climas de temperaturas bajas de 5 a 15 grados Celsius, en el cual cumple con la especificación de la norma MTC\_ EG 2013, como se muestra en la siguiente figura.

ENSAYOS REALIZADOS A LA MUESTRA ORIGINAL	NORMA	RESULTADOS	RESULTADO
PENETRACION, 25 C, 100 g, 5s, (0.1mm)	MTC E - 304	142	CUMPLE
PUNTO DE ABLANDAMIENTO, Anillo y bola (° C)	MTC E - 307	44	CUMPLE
VISCOSIDAD CINEMATICA a 135 °C	MTC E - 310	201.8	CUMPLE
PUNTO DE INFLAMACION, copa abierta Cleveland (° C)	MTC E - 303	290	CUMPLE
DUCTILIDAD, 25 °C, 5 cm/min (cm)	MTC E - 306	+ 100	CUMPLE
SOLUBILIDAD EN TRICLOROETILENO (%)	MTC E - 302	99.87	CUMPLE
ENSAYO DE LA MANCHA	MTC E - 314	NEGATIVO	CUMPLE
Solvente Nafta Standard			
INDICE DE SUSCEPTIBILIDAD TERMICA	Heukelom	+ 0.1	CUMPLE
<b>ENSAYOS REALIZADOS DESPUES DE PELICULA FINA, 3.2 mm, 163 °C, 5h</b>			
PERDIDA DE MASA (%)	MTC E - 315	0,09	CUMPLE
PENETRACION, 25 C, 100 g, 5s, (% de la penetración original)	MTC E - 304	59	CUMPLE
DUCTILIDAD, 25 °C, 5 cm/min (cm)	MTC E - 306	+ 100	CUMPLE

Figura 21: Resultado de los ensayos al Asfalto PEN 120/150.  
Fuente: Contreras Martínez & Mamani Vilcatoma, (2019)

## Caucho

En esta presente referencia, se utilizó caucho producto de la trituración de los neumáticos reciclados, de la empresa Caucho Perú. Para ser utilizado como modificante el caucho reciclado, necesariamente tiene que pasar por el proceso de trituración, luego eliminar los alambres metálicos. Posteriormente se continúa con la trituración hasta obtener partículas muy finas. En el presente trabajo de investigación, las partículas finas del caucho tuvieron que pasar por el tamiz de abertura 0.84 mm (N°20), cumpliendo, ya que pasa en totalidad por el tamiz de 2.38 mm (N°8).

### 5.2. Ensayo Marshall y las propiedades de la MAC

Para entender exactamente cuáles son las propiedades que influyen en una deformación permanente se expone la relación que existe entre el Ensayo Marshall y las propiedades de una mezcla asfáltica. El objetivo de Marshall es determinar el contenido óptimo de asfalto para una mezcla específica de agregados, sin embargo,

este a su vez también provee información sobre las propiedades de la mezcla asfáltica en caliente, establece densidades y contenidos óptimos de vacío que deben ser cumplidos. Son estas las mediciones que nos permiten medir las propiedades de la mezcla. Cáceres Morales, (2007)

Para nuestra investigación es de mucha importancia analizar los resultados de las propiedades volumétricas que puede proveernos este ensayo, así como también el flujo y estabilidad.

### 5.2.1. Parámetros volumétricos que inciden en el ahuellamiento

Un importante factor que debe ser muy considerado al pensar en el comportamiento de la mezcla asfáltica, es el de las proporciones volumétricas del asfalto y de los componentes del agregado; o parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica. (Alejandro, 2004)

Las propiedades volumétricas de una mezcla de pavimento compactado (vacíos de aire ( $V_a$ ); vacíos en el agregado mineral (VMA); vacíos llenados con asfalto (VFA), y contenido de asfalto efectivo ( $P_{be}$ ) proporcionan una estimación del funcionamiento probable de una mezcla asfáltica especialmente frente al ahuellamiento.

#### **Contenidos de vacíos**

Muchas investigaciones, así como textos de estudio, coinciden que el contenido de vacíos es el parámetro de desempeño más relevante de una mezcla asfáltica. (Guillermo Thenoux & Hector Carrillo, 2015)

Existe un consenso en que el rango recomendado de desempeño de una mezcla se consigue para contenidos de vacíos de 3 a 8 % (Brown, 1990; Asphalt Institute, 1997). Para contenidos de vacíos bajo 3 %, la mezcla es propensa a exudar y/o ahuellarse. (Guillermo Thenoux & Hector Carrillo, 2015)

Es importante resaltar que el rango de los vacíos de aire (3 a 5 %) es el nivel deseado después de varios años de carga vehicular. Este objetivo no varía con el tránsito; se entiende que el esfuerzo de compactación de laboratorio es escogido para el tráfico esperado. Esta determinación del rango de los vacíos de aire, usualmente se obtiene si la mezcla se diseña con un óptimo esfuerzo de compactación y si el porcentaje de los vacíos después construido se

encuentre entre 6 y 8 %, ya que se estima un poco de consolidación con el tránsito. (Anguas, Delgado Alamilla, Gómez López, Alonso Romero, & Alarcón Orta, 2004)

Existen mezclas que consolidan con el 3 % de vacíos, pero puede esperarse ahuellamiento si se coloca en situaciones de tránsito pesado.

### **Contenido de Asfalto**

El contenido asfáltico está relacionado con el contenido de vacíos. La estabilidad Marshall, expone en qué medida afecta el contenido de asfalto al comportamiento mecánico de las mezclas. Hasta cierto valor, la estabilidad es directamente proporcional con el contenido asfáltico. Después del óptimo contenido de asfalto, la estabilidad de la mezcla disminuye (Alejandro, 2004). Esto es debido a que el efecto lubricante que produce un exceso de asfalto reduce el contacto entre las partículas de agregado y por ello disminuye la fricción interna de la mezcla. (Guillermo Thenoux & Hector Carrillo, 2015). Respecto al efecto del contenido asfáltico sobre el ahuellamiento, investigaciones y estudios concluyen que el contenido asfáltico incide en la susceptibilidad al ahuellamiento más el grado asfáltico, aunque es de menor importancia que el contenido de vacíos (Brown Cross, 1992)

### **Volumen de vacíos de agregado mineral (VMA)**

El contenido de vacíos de agregado mineral o VMA es una propiedad que depende del agregado (forma y granulometría) y del contenido asfáltico. Los valores de VMA muy pequeños podrían indicar que en campo el asfalto no tendrá suficiente espacio y por ende es susceptible a ahuellarse y/o exudar. Los valores de VMA muy elevados también se han asociado con las deformaciones permanentes, ya que se requerirá un mayor contenido asfáltico para cumplir las especificaciones de diseño (FHWA, 2001) (Guillermo Thenoux & Hector Carrillo, 2015).

### **Vacíos llenados con asfalto (VFA)**

El criterio VFA ayuda a prevenir el diseño de mezclas con un VMA de marginal a aceptable. El principal efecto del criterio de VFA es limitar los

niveles máximos de VMA y por ende, los niveles máximos de contenido de asfalto.

Así mismo, el VFA restringe el contenido de aire permitido para mezclas cercanas al criterio mínimo de VMA. Mezclas para volúmenes de tráfico bajos, no cumplirán con el criterio de VFA con un porcentaje de vacío relativamente alto (5%) a pesar que la cantidad de vacíos de aire se cumpla. El objetivo será evitar mezclas poco durables en niveles altos de tráfico. (Anguas, Delgado Alamilla, Gómez López, Alonso Romero, & Alarcón Orta, 2004)

### 5.2.2. Estabilidad y Fluencia

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

#### **Valor de Estabilidad Marshall**

La estabilidad Marshall no ser un parámetro incidente en el comportamiento de la MAC frente al ahuellamiento, sin embargo, esta muestra en qué grado el contenido asfáltico afecta al comportamiento mecánico de las mezclas. Hasta un cierto valor, la estabilidad aumenta al incrementar el contenido asfáltico. Después de este valor, la estabilidad de la mezcla decrece con mayores incrementos asfálticos. (Guillermo Thenoux & Hector Carrillo, 2015).

Debido a que la estabilidad Marshall cuantifica la resistencia de la mezcla frente a la deformación, suele pensarse que, si un valor de estabilidad es bueno, entonces un valor más alto será mucho mejor.

Para varios materiales dentro de la ingeniería, la resistencia del material es, idealmente la cuantificación de su calidad, pero esto no es necesariamente aplicable para las mezclas asfálticas en caliente. (Alejandro, 2004)

#### **Valor de Fluencia Marshall**

La fluencia Marshall, medida en centésimas de pulgada, muestra la deformación de la briqueta en el laboratorio.

Las mezclas con valores pequeños de fluencia y valores muy elevados de estabilidad Marshall suelen ser muy frágiles y rígidas para un pavimento en

servicio. Aquellas con valores elevados de fluencia pueden ser demasiado plásticas, y ser susceptibles a deformarse con facilidad frente a la carga vehicular. (Alejandro, 2004)

### 5.2.3. Parámetros de diseño Marshall según normativa peruana

El manual de carreteras, especificaciones técnicas generales para construcción (EG 2013) menciona los requisitos de diseño para una MAC, de los cuales es importante señalar, la estabilidad, el flujo, el porcentaje de vacíos y los vacíos en el agregado mineral (VMA) como se puede ver en la siguiente figura.

Figura 22: Requisitos para mezcla de *concreto* bituminoso

Parámetro de Diseño	Clase de Mezcla		
	A	B	C
<b>Marshall MTC E 504</b>			
1. Compactación, número de golpes por lado	75	50	35
2. Estabilidad (mínimo)	8.15 kN	5.44 kN	4.53 kN
3. Flujo 0,01" (0,25 mm)	8-14	8-16	8-20
4. Porcentaje de vacíos con aire (1) (MTC E 505)	3-5	3-5	3-5
5. Vacíos en el agregado mineral	Ver Tabla 3.23-10		
<b>Inmersión – Compresión (MTC E 518)</b>			
1. Resistencia a la compresión Mpa mín.	2,1	2,1	1,4
2. Resistencia retenida % (mín.)	75	75	75
Relación Polvo – Asfalto (2)	0,6-1,3	0,6-1,3	0,6-1,3
Relación Estabilidad/flujo (kg/cm) (3)	1.700-4.000		
Resistencia conservada en la prueba de tracción indirecta AASHTO T 283	80 Min.		
<p>1) A la fecha se tienen tramos efectuados en el Perú que tienen el rango 2% a 4% (es deseable que tienda al menor 2%) con resultados satisfactorios en climas fríos por encima de 3.000 m.s.n.m. que se recomienda en estos casos.</p> <p>2) Relación entre el porcentaje en peso del agregado más fino que el tamiz 0,075 mm y el contenido de asfalto efectivo, en porcentaje en peso del total de la mezcla.</p> <p>3) Para zonas de clima frío es deseable que la relación Est. /flujo sea de la menor magnitud posible.</p> <p>4) El Índice de Compactabilidad mínimo será 5. El Índice de Compactabilidad se define como: <math>\frac{1}{GEB\ 50 - GEB\ 5}</math></p> <p>siendo GEB50 y GEB5, las gravedades específicas bulk de las briquetas a 50 y 5 golpes.</p>			

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

Tamiz	Vacíos mínimos en agregado mineral %	
	Marshall	Superpave
2,36 mm (N.º 8)	21	-
4,75 mm (N.º 4)	18	-
9,50 mm (3/8")	16	15
12,5 mm (½")	15	14
19,0 mm (3/4")	14	13
25,0 mm (1")	13	12
37,5 mm (1 ½")	12	11
50,0 mm (2")	11,5	10,5

Figura 23: Vacíos mínimos en el agregado mineral (VMA)  
Fuente. Manual de Carreteras – Especificaciones Técnicas Generales para Construcción – EG-2013

### 5.3. Ensayo de ahuellamiento en mezcla asfáltica

#### 5.3.1. Rueda cargada de Hamburgo

Método utilizado para determinar la susceptibilidad a la falla prematura del ahuellamiento en las mezclas asfálticas en caliente debido a la debilidad de la estructura de agregado, una rigidez inadecuada del ligante asfáltico o por daño inducido por humedad. Lanamme UCR, (2018)

A continuación, un esquema de los resultados de la prueba.

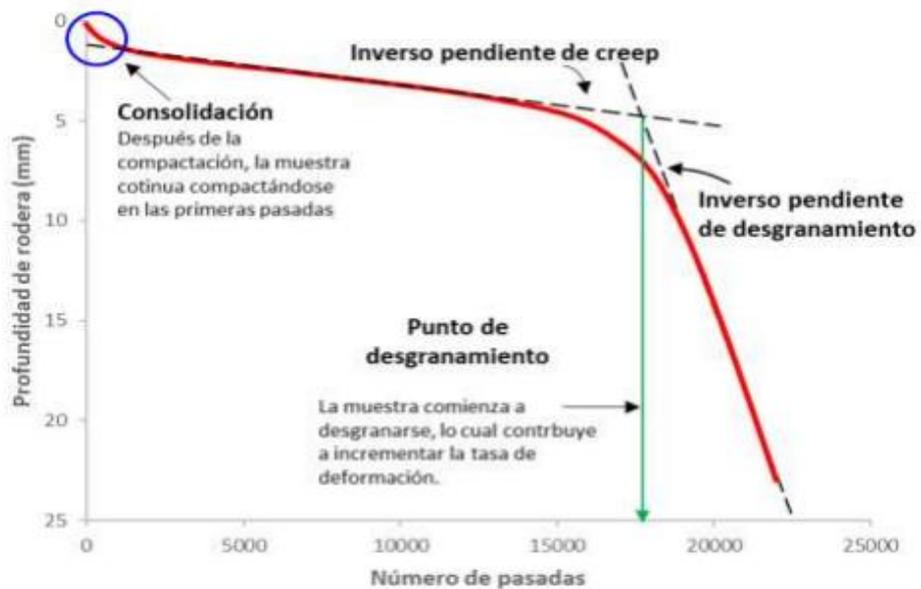


Figura 24: Esquema de los resultados de un ensayo en la rueda cargada de Hamburgo.

Fuente: Pavementinteractive.org

Se debe tener en claro que cada país que adoptó el ensayo de Rueda de Hamburgo tiene diferentes criterios de análisis que están en función a sus componentes de sus mezclas asfálticas y diseño. A su vez, en Perú no hay normativa que establezca ensayo de ahuellamiento, es por ello nos basamos en la norma AASHTO de Ensayo de Rueda Cargada de Hamburgo. Lanamme UCR, 2018.

En cuanto a los requerimientos de aceptación de la mezcla, la ciudad de Hamburgo en Alemania, en donde se desarrolló este ensayo, indica una deformación permanente de 4 mm con 20 000 pasadas como mínimo.

#### 5.4. Resultados de ensayos

En este apartado se presentan los resultados del ensayo Marshall y del ensayo de Rueda cargada de Hamburgo, para cada tesis de referencia.

##### 5.4.1. Resultados: Primer caso

#### **Resultados Marshall para MAC convencional**

En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos tras el ensayo Marshall, también si estos cumplen de acuerdo a normativa peruana.

*Tabla 7:*

*Resultados del diseño de mezcla asfáltica convencional*

<b>Parámetros</b>	<b>Requisitos</b>	<b>Resultados</b>	<b>Validación</b>
% Contenido óptimo de asfalto	-----	6.15	Si cumple
% Vacíos en mezcla	3-5	3.05	Si cumple
Peso específico (gr/cm <sup>3</sup> )	-----	2.358	Si cumple
% Vacíos en el agregado mineral (VMA)	15 min	15	Si cumple
% Vacíos llenos con asfalto (VFA)	65 - 75	78	Si cumple
Flujo (0.25mm)	8 - 14	13.8	Si cumple
Estabilidad (kg)	830.05 min	938	Si cumple

Fuente. Corbacho Chipana, (2018)

### Resultados Marshall para MAC modificada

En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos tras el ensayo, también si estos cumplen de acuerdo a normativa peruana.

Tabla 8:  
Análisis de resultados de mezcla modificada

Parámetros	Requisitos	Resultados	Validación
% C. óptimo de asfalto	6.15	6.15	Si cumple
% C. óptimo de fibras PET	-----	1.2	Si cumple
% Vacíos en mezcla	3 - 5	4.85	Si cumple
Peso específico (gr/cm <sup>3</sup> )	-----	2.298	Si cumple
% Vacíos en el agregado mineral (VMA)	15 min	16.3	Si cumple
% Vacíos llenos con asfalto (VFA)	65 - 75	70.2	Si cumple
Flujo (0.25mm)	8 - 14	14.7	Si cumple
Estabilidad (kg)	830.05 min	856.3	Si cumple

Fuente. Corbacho Chipana, (2018)

### Resultado de la Rueda de Hamburgo

En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos tras el ensayo de Rueda cargada de Hamburgo.

Tabla 9:  
Reporte de resultados del ensayo de rueda cargada de Hamburgo

Parámetros	Mezcla asfáltica convencional	Mezcla asfáltica modificada
Densidad Máxima Teórica (gr/cm <sup>3</sup> )	2.436	2.415
Contenido de asfalto (%)	6.15	6.15
Vacíos (%)	7.3	7.5
# Pasadas alcanzadas	6166	7660
Profundidad de huella (mm)	12.50	12.50

Fuente: Corbacho Chipana, 2018

#### 5.4.2. Resultados: Segundo caso

##### Resultados Marshall

En la siguiente tabla se presentan los resultados del ensayo Marshall para ambas mezclas.

Tabla 10:

Resultados de los Diseños de Mezcla

	PEN 60/70	BETUTEC IC	TOLERANCIA
NUMERO DE GOLPES	75	75	75
CONTENIDO DE ASFALTO (%)	5.4	5.3	
ESTABILIDAD (kgf)	1373	1964	831 (mínimo)
FLUJO (mm)	3.47	3.33	2 - 4
PESO ESPECIFICO BULK	2.433	2.427	
RICE	2.529	2.525	
PORCENTAJE DE VACIOS	3.8	3.9	3 - 5
V.M.A	14.7	14.8	14
RELACION POLVO/ASFALTO	1.08	1.11	0.6 - 1.3

Fuente. (Villafana Huamán & Ramírez Villanueva, 2019)

##### Resultado de la Rueda de Hamburgo

En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos tras el ensayo de Rueda cargada de Hamburgo para ambas mezclas.

Tabla 11:

Resultados de los ensayos de Rueda de Hamburgo

DATOS DE ENSAYO	PEN 60/70	BETUTEC IC	TOLERANCIA
PIEDRA CHANCADA	45.00%	45.00%	
ARENA CHANCADA	33.00%	33.00%	
ARENA ZARANDEADA	22.00%	22.00%	
OPTIMO DE ASFALTO	5.40%	5.30%	
RICE (Kg/cm <sup>3</sup> )	2.529	2.525	
% DE VACIOS	6.80%	6.70%	6.0% - 8.0%
T° DE ENSAYO	50.0°C	50.0°C	
N° MAXIMO PASADAS	20,000	20,000	
N° PASADAS RECIBIDAS	20,000	20,000	
PROFUNDIDAD FINAL (mm)	7.77	1.8	<12.5 mm
PUNTO DE INFLEXIÓN	9500 pasadas	No existe	

Fuente: (Villafana Huamán & Ramírez Villanueva, 2019)

### 5.4.3. Resultados: Tercer caso

Resultados Marshall.

Para el análisis comparativo nos enfocaremos solo en los resultados de la MAC convencional y MAC modificado con caucho al 1.0%, esta elección debido a un mayor contenido de asfalto sin estar al límite de los requisitos normados, la decisión debido a que está proyectada para un clima de bajas temperaturas de 5 a 15 grados Celsius.

CUADRO COMPARATIVO DE ENAYO MARSHALL CON MEZCLA ASFALTICA CONVENCIONAL Y MARSHALL CON MEZCLA ASFALTICA MODIFICADA					
	Mezcla Asfáltica con Asfalto 120-150	Mezcla Asfáltica con Asfalto 120-150 + 0.5 % Caucho	Mezcla Asfáltica con Asfalto 120-150 + 1 % Caucho	Mezcla Asfáltica con Asfalto 120-150 + 1.5 % Caucho	RANGO
75 golpes por cara	75	75	75	75	-
Contenido óptimo de cemento asfáltico, %	5.3	5.5	5.5	5.5	-
Peso específico bulk (Gr/cm <sup>2</sup> )	2.448	2.427	2.398	2.338	-
Vacios, %	3.3	3.4	3.6	5.7	[3% - 5%]
Vacios llenos con cemento asfáltico %	75.5	74.5	73.1	63.2	-
V.M.A, %	13.4	13.8	14.3	15.9	-
Estabilidad, kg (KN)	1312	1090	1060	697	800 Kg (Min)
Flujo, mm (0.01 pulg)	3.1	3.3	3.3	3.4	[2mm - 3.6mm]

Figura 25: Comparación de los ensayos Marshall para la MAC convencional y modificada.  
Fuente: Contreras Martínez & Mamani Vilcatoma, (2019)

### Resultado de la Rueda de Hamburgo

En esta figura presentan los resultados del ensayo de Rueda Cargada de Hamburgo para la MAC convencional y modificada con caucho al 1.0%

CUADRO COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO DE LA RUEDA DE HAMBURGO		
PARAMETROS	Mezcla Asfáltica con Asfalto 120-150	Mezcla Asfáltica con Asfalto 120-150 + 1 % Caucho
Contenido de Asfalto (%)	5.3	5.5
Vacios (%)	7.1	7.1
# Pasadas alcanzadas	20000	20000
Profundidad de huella (mm)	12.53	12.53
Deformación Permanente (mm)	10.5	8.9

Figura 26: Comparación del ensayo de Rueda de Hamburgo para la MAC convencional y modificada.  
Fuente: Contreras Martínez & Mamani Vilcatoma, (2019)

## 5.5. Cuadro comparativo para el análisis de resultados

### 5.5.1. Comparativo primer caso

Para esta investigación se analizaron los resultados obtenidos de los ensayos anteriormente referenciados de la tesis “Análisis de la estabilidad Marshall y la deformación permanente mediante el ensayo de rueda cargada de Hamburgo de una mezcla asfáltica modificada en caliente con fibras de Tereftalato de Polietileno reciclado en la ciudad del Cusco-2018”, en donde se prestará énfasis en los resultados del ensayo Marshall y de la rueda cargada de Hamburgo, obtenido bajo las características de una mezcla asfáltica convencional y modificada con PET.

A continuación, un cuadro comparativo de los resultados obtenidos.

**Tabla 12:**  
**Cuadro comparativo resumen de los resultados obtenidos de MAC convencional y modificada con PET al 1.2%**

PARÁMETROS	UNIDADES	MEZCLA AS F. CONVENCIONAL	MEZCLA AS F. MODIFICADA	DIFERENCIA	%	NORMA PERUANA (EG - 2013)
<b>RESULTADOS</b>						
<b>MARSHALL</b>						
Óptimo contenido de asfalto	%	6.15%	6.15%	0.00%	0.00%	---
% C. óptimo de fibras PET (Modificador)	%		1.20%			---
% Vacíos en mezcla	%	3.05%	4.85%	1.80%	59.02%	3-5
Peso específico	gr/cm <sup>3</sup>	2.358	2.298	-6.00%	-2.54%	---
Vacíos de agregado mineral (V.M.A.)	%	15.00%	16.30%	1.30%	8.67%	15 mínimo
% Vacíos llenos de asfalto (V.F.A.)	%	78.00%	70.20%	-7.80%	-10.00%	65-75
Flujo (0.25mm)	(0.25mm)	13.8	14.7	0.90	6.52%	8-14
Estabilidad	Kg	938	856.3	-81.70	-8.71%	830.05 mínimo
<b>RESULTADOS RUEDA DE HAMBURGO</b>						
Densidad Máxima Teórica	gr/cm <sup>3</sup>	2.436	2.415	-0.02	-0.86%	---
Vacíos	%	7.3	7.5	20.00%	2.74%	---
# Pasadas alcanzadas	#	6166	7660	1494.00	24.23%	---
Profundidad de huella	mm	12.5	12.5			

*Fuente: Propia*

### 5.5.2. Comparativo segundo caso

Así mismo, también se han analizados los resultados obtenidos de los ensayos de la tesis “Análisis del comportamiento de una mezcla asfáltica modificada con polímeros SBS Betutec IC y una mezcla asfáltica convencional 60/70”

A continuación, un cuadro comparativo de los resultados obtenidos.

**Tabla 13:**  
*Cuadro comparativo resumen de los resultados obtenidos*

PARÁMETROS	UNIDADES	MEZCLA ASF. CONVENCIONAL (PEN 60/70)	MEZCLA ASF. MODIFICADA (BETUTEC IC)	DIFERENCIA	%	TOLERANCIA
<b>RESULTADOS MARSHALL</b>						
Óptimo contenido de asfalto	%	5.40%	5.30%	-0.10%	▼ -1.85%	----
% Vacíos en mezcla	%	3.80%	3.90%	0.10%	▼ 2.63%	3-5
Peso específico BULK	gr/cm <sup>3</sup>	2.433	2.427	-0.60%	▼ -0.25%	----
Vacios de agregado mineral (V.M.A)	%	14.70%	14.80%	0.10%	▼ 0.68%	14.00%
Flujo	mm	3.47	3.33	-0.14	▼ -4.03%	2-4
Estabilidad	Kg	1373	1964	591.00	▼ 43.04%	830.05 mínimo
<b>RESULTADOS RUEDA DE HAMBURGO</b>						
RICE	gr/cm <sup>3</sup>	2.529	2.525	0.00	▼ -0.16%	----
Vacios	%	6.8	6.7	-10.00%	▼ -1.47%	----
# Máximo Pasadas	#	20000	20000	0.00	▼ 0.00%	----
# Pasadas recibidas	#	20000	20000	0.00	▼ 0.00%	----
Profundidad final	mm	7.77	1.8	-5.97	▼ -76.83%	<12.5 mm
Punto de Inflexión	#	9500 pasadas	No existe			

*Fuente: Propia*

### 5.5.3. Comparativo tercer caso

Finalmente se han analizado los resultados obtenidos de la tesis “Reducción de la deformación permanente en pavimentos diseñados con mezclas asfálticas en caliente a través de la incorporación de polvo de caucho proveniente de neumáticos usados”.

Se presenta un cuadro comparativo de los resultados obtenidos.

Tabla 14:  
Cuadro comparativo, resumen de los resultados obtenidos de MAC convencional y modificada con caucho al 1.0%

PARÁMETROS	UNIDADES	MEZCLA ASF. CONVENCIONAL	MEZCLA ASF. MODIFICADA	DIFERENCIA	%	NORMA PERUANA (EG - 2013)
<b>RESULTADOS MARSHALL</b>						
Óptimo contenido de asfalto	%	5.30%	5.50%	0.20%	3.77%	----
% C. óptimo de Caucho en polvo (Modificador)	%		1.00%			----
% Vacíos en mezcla	%	3.30%	3.60%	0.30%	9.09%	3-5
Peso específico	gr/cm <sup>3</sup>	2.448	2.398	-5.00%	-2.04%	----
Vacíos de agregado mineral (V.M.A)	%	13.40%	14.30%	0.90%	6.72%	15 mínimo
% Vacíos llenos de asfalto (V.F.A)	%	75.50%	73.10%	-2.40%	-3.18%	65-75
Flujo	(0.25mm)	12.4	13.2	0.80	6.45%	8-14
Estabilidad	Kg	1312	1060	-252.00	-19.21%	830.05 mínimo
<b>RESULTADOS RUEDA DE HAMBURGO</b>						
Contenido de asfalto	%	5.3	5.5	0.20	3.77%	----
Vacíos	%	7.1	7.1	0.00%	0.00%	----
# Pasadas alcanzadas	#	20000	20000	0.00	0.00%	----
Profundidad de huella	mm	10.5	8.9	-1.60	-15.24%	

Fuente: Propia

## 5.6. Análisis de los resultados

- Frente a los resultados de ahuellamiento o rueda de Hamburgo en la tesis del primer caso, tenemos que la mezcla modificada presenta una mayor resistencia a ahuellarse que la convencional, esto se ve, ya que resiste una mayor cantidad de pasadas que la convencional, sin embargo, analizando resultados globales, ninguna de las dos mezclas sobre pasa las 20000 pasadas admisibles de este ensayo. Así mismo, mencionar que ambas tuvieron un valor elevado de fluencia casi 14 para la convencional y sobre los 14 para la modificada. Para el segundo caso, notamos que ambas mezclas han cumplido con las 20000 pasadas que indica en el ensayo de Rueda de Hamburgo, vemos también, que la mezcla modificada posee una menor profundidad final que la convencional, estos nos indica que es más resistente frente al ahuellamiento. Adicionalmente comentar que ambas tuvieron un valor intermedio de fluencia, aunque la modificada tuvo una menor fluencia casi de un 4% menos respecto de la convencional. Finalmente, para el tercer caso, observamos que ambas muestras sometidas a la prueba de ahuellamiento resistieron las 20 000 pasadas antes de llegar a los 12.5 mm., la que mejor desempeño tuvo frente al ensayo de Hamburgo fue la mezcla modificada con caucho como se muestra en el cuadro correspondiente.

- Para el primer caso, respecto de la estabilidad, se ve que la MAC modificada resiste una menor carga frente a la convencional, preliminarmente esto nos podría indicar que la convencional tendría un mejor comportamiento frente a la modificada, sin embargo, la modificada se ahuella con un mayor número de pasadas que la convencional. En el segundo caso, se aprecia que la MAC modificada, la cual posee un mejor comportamiento a la resistencia frente al ahuellamiento, tiene una mayor estabilidad la que convencional, casi de un 76% más, esto puede suponer que a mayor estabilidad se tendrá una mayor resistencia, sin embargo, esto no es exactamente cierto para mezclas asfálticas y se detallará en las conclusiones. Para el tercer caso, notamos un comportamiento similar al primer caso, donde la estabilidad para la MAC modificada es menor que la MAC convencional, pero al ser sometido al ensayo de Hamburgo el modificado presenta un mejor desempeño en un 15.24% más resistente que el convencional.

- En el primer caso, respecto al contenido de vacíos de aire, se aprecia que la MAC modificada presenta un mayor volumen de aire que la convencional, esta variación es de casi un 60%, esta propiedad volumétrica incide mucho en esta investigación como expondrá en las conclusiones. Para el segundo caso, se aprecia que la MAC modificada tiene un mayor porcentaje de vacíos en mezcla que la convencional, aunque la diferencia es tan solo de un 2.63%. Finalmente, para el tercer caso se aprecia que en la MAC modificada la cantidad de vacíos de aire se incrementa en un 9.09% con respecto a la MAC convencional, el cual es un comportamiento idéntico las demás investigaciones referenciadas.

- Para la cantidad de vacíos llenos de asfalto en el primer caso se tiene que la MAC convencional presenta un VFA mayor que la modificada, esta variación, aunque no tan amplia, relaciona muy interesantemente el fenómeno del ahuellamiento con el contenido efectivo de asfalto en una MAC. Con respecto al tercer caso, los Vacíos llenos de asfalto tiene un comportamiento idéntico a la primera tesis, en el que al ser modificada se observa una disminución en 3.18% con respecto a la MAC convencional.

- Para el primer caso y respecto de la propiedad de vacíos de agregado mineral (VMA) se aprecia que ambas mezclas no tienen una amplia diferencia, la convencional está cumpliendo como mínimo, es decir posee un valor bajo de VMA. El valor de VMA en la MAC modificada es 8.67% superior que la convencional. En el segundo caso se ve que ambas tienen un valor de VMA muy pegado al mínimo, aunque la modificada tiene un 0.68% más que la convencional. Por último, para el tercer caso, la MAC modificada presenta un aumento en el VMA, dicho incremento es de un 6.72% superior a la MAC convencional, siendo idéntico el comportamiento de este parámetro a las dos tesis anteriores.

## 5.7. Constatación de hipótesis

### Hipótesis específica 1

H11. La fluencia de la mezcla asfáltica incide en el ahuellamiento.

H01. La fluencia de la mezcla asfáltica no incide en el ahuellamiento.

Realizando la comparación de los tres casos referenciados, como detallamos en el análisis de resultados, apreciamos un incremento de la fluencia al modificar la MAC y en el mismo sentido un incremento en la resistencia a la deformación en el ensayo de Rueda de Hamburgo como se detalló en las tablas de análisis de resultado.

De la investigación realizada por Alarcón y Hidalgo (2022), Se determinó la incidencia del PET reciclado en la fluencia del ensayo Marshall, del cual se obtuvo valores superiores a los 10.30 de fluencia de la MAC convencional; al añadir el PET reciclado en 1%, 3% y 5%; se obtuvo fluencias de 11.1(0.25mm), 12.6(0.25mm) y 14.5(0.25mm) respectivamente, por ello concluyen que con un 3% de PET es óptimo y estando dentro de los parámetros normados según EG MTC 2013, conociendo que en esta investigación no realizaron el ensayo de ahuellamiento, pero rescatamos el comportamiento de las propiedades de la MAC idéntico a nuestras tres referencias.

Se concluye que la fluencia de la mezcla asfáltica mantiene una relación consistente con el ahuellamiento, debido a que al ser sometido al ensayo de Rueda de Hamburgo tiene mayor resistencia como se menciona en los tres análisis de resultados, así como lo citado anteriormente. Por tal motivo, se rechaza la hipótesis nula (H01) y se acepta la hipótesis alternativa (H11).

### Hipótesis específica 2

H12. La estabilidad de la mezcla asfáltica incide en el ahuellamiento.

H02. La estabilidad de la mezcla asfáltica no incide en el ahuellamiento.

Al comparar la estabilidad los tres casos de las investigaciones, resultando una variación, el cual no precisa una relación estable con el ensayo de Rueda de Hamburgo, como se detalló en el cuadro comparativo, para unos la estabilidad presenta relación directa con el ahuellamiento y para otras una relación inversamente proporcional, el cual nos trae resultados que no mantienen el mismo sentido.

Además, de acuerdo a la tesis de Alarcón y Hidalgo (2022)., Se estableció cómo influye el porcentaje de PET y PVC en los ensayos de Estabilidad Marshall, ya que contribuyeron en el incremento de Estabilidad; Con respecto al PET, teniendo como referencia la estabilidad MAC convencional de 866.8 kg, en la modificada con PET se incrementó hasta 913.2 kg para un óptimo contenido de PET 1.0%, pero a medida que se incrementó el contenido de PET decayó la estabilidad. De este antecedente, debido a lo voluble que es esta propiedad en cada investigación y no brinda con certeza como indicador para definir la incidencia en el ahuellamiento, es un sustento más para rechazar la hipótesis alternativa, siendo ésta nuestra única hipótesis del que no guarda coherencia.

Por lo mencionado, concluimos que la estabilidad no incide necesariamente en el fenómeno del ahuellamiento. Por lo tanto, se acepta la hipótesis nula (H02) y se rechaza la hipótesis alternativa (H12).

### Hipótesis específica 3

H13. Los vicios de aire de la mezcla asfáltica inciden en el ahuellamiento.

H03. Los vicios de aire de la mezcla asfáltica no inciden en el ahuellamiento.

De los cuadros mostrados en las tablas comparativas, para los casos mencionados, muestra la variación de los porcentajes de vacíos de aire para la mezcla convencional y modificada, presentando un incremento dentro del parámetro bromado, así mismo, para las tres investigaciones hubo una mejora en la resistencia a la deformación permanente.

De acuerdo a la investigación de L. Cabrera (2021)., En la resistencia a la deformación plástica de la MAC. Presentó resultado positivo frente a la deformación con el uso del PET, a pesar de contar con un inadecuado control de los vacíos de aire en el proceso de elaboración de la briqueta. En la mezcla con 4.0% PET (13.27% de vacíos) y 6%

PET (15.73% de vacíos) resultó una mejora a la resistencia de deformación plástica en 46.0% y 82.0% respectivamente, con relación a la mezcla de control (13.76% de vacío).

Con lo argumentado, deducimos que la cantidad de vacíos de aire en una mezcla asfáltica es uno de los pilares fundamentales que determina el comportamiento de la mezcla asfáltica ante el fenómeno del ahuellamiento. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula (H03) y se acepta la hipótesis alternativa (H13).

#### Hipótesis específica 4

H14. Los vacíos llenos de asfáltico de la mezcla asfáltica inciden en el ahuellamiento.

H04. Los vacíos llenos de asfáltico de la mezcla asfáltica no inciden en el ahuellamiento.

De acuerdo a los cuadros comparativos de los tres casos, la propiedad volumétrica de Vacíos Llenos de Asfalto (VFA) de la mezcla asfáltica convencional y modificada presenta un descenso en ese orden, pero una mejor resistencia ante las deformaciones permanentes realizados con Ensayo de Rueda de Hamburgo, o sea, para cada caso mencionado presenta una ruta idéntica en los VFA, así como en el ensayo de Hamburgo.

Con lo argumentado anteriormente, deducimos que la cantidad de los Vacíos Llenos de Asfalto en una mezcla asfáltica es un indicador que tiene bastante incidencia en el fenómeno del ahuellamiento. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula (H04) y se acepta la hipótesis alternativa (H14).

#### Hipótesis específica 5

H15. El volumen de Vacíos de Agregado Mineral (VMA) de la mezcla asfáltica incide en el ahuellamiento.

H05. El volumen de Vacíos de Agregado Mineral (VMA) de la mezcla asfáltica no incide en el ahuellamiento

De acuerdo a los cuadros comparativos detallados en la sección de resultados, en cada caso, al ser modificada la mezcla asfáltica en caliente presenta un incremento en la propiedad del VMA (Incremento); de manera similar, dentro del ensayo de la Rueda de Hamburgo presentas una misma ruta de resultado (mejor desempeño).

Con lo argumentado anteriormente y basados en los cuadros comparativos de la sección de análisis de resultados, deducimos que la cantidad de los vacíos de agregado mineral (VMA) en una mezcla asfáltica incide en el fenómeno del ahuellamiento. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) y se acepta la hipótesis alternativa ( $H_1$ ).

## CONCLUSIONES

1. Tras los resultados de fluencia Marshall de la tesis del primer caso, vemos que ambas mezclas tienen un valor alto de flujo. Así mismo, ambas tuvieron resultados muy pobres en la rueda de Hamburgo. En el segundo caso, el valor del flujo es intermedio y no tan elevado como el primer caso, con un mejor comportamiento al ahuellamiento, incluso se cumplen con las 20000 pasadas que indica el ensayo. Para el tercer caso el valor del flujo posee un valor intermedio superior, pero no se acerca tanto como en el primer caso. Ambas muestras completaron satisfactoriamente las 20 000 pasadas en el ensayo de Hamburgo. Para los tres casos se ve una similitud en el comportamiento del flujo y resistencia al ahuellamiento, al compararlas todas, se ve una reducción a la resistencia al ahuellamiento al grupo de MAC con un valor alto de flujo, con esto vemos que la propiedad de fluencia de la MAC incide en las deformaciones permanentes.
2. Para el primer caso observamos que al modificar la MAC con el polímero (PET) se obtiene una estabilidad menor con respecto a la MAC convencional, pero al ser sometida al ensayo de Rueda de Hamburgo la que tuvo mejor desempeño fue la mezcla modificada. En el segundo caso vemos que la estabilidad es mayor para la MAC modificada que la convencional y que la modificada tiene un mejor comportamiento al ahuellamiento. Finalmente, en el tercer caso la estabilidad decrece al ser modificada, con esto se podría decir que este es un parámetro voluble a comparación de las dos tesis anteriores, por ello no es un buen indicador frente al fenómeno del ahuellamiento y tampoco influye en este, concluyendo así mismo, que a mayor estabilidad de una MAC no necesariamente se tendrá una mejor resistencia.
3. En el primer caso, se vio que la MAC convencional posee un menor contenido de vacíos que la mezcla modificada. Aunque la MAC modificada no ha presentado óptimos resultados respecto al ensayo de Rueda cargada de Hamburgo, sí presenta una mayor resistencia casi de un 24.23% más que la mezcla convencional. Para el segundo caso vemos que el contenido de vacíos es menor en la MAC convencional, sin embargo, la diferencia no es muy grande. Vemos que ambas han tenido un buen comportamiento frente al ahuellamiento, sin embargo, la modificada, que tiene un

mayor valor de porcentaje de vacíos, ha presentado mejores resultados en el ahuellamiento. En el tercer caso, el contenido de vacíos de aire es menor en la MAC convencional, este parámetro sigue el mismo patrón de comportamiento que las tesis anteriores. Se verifica entonces que la propiedad de contenido de vacíos incide en el ahuellamiento ya que las modificadas tuvieron un mayor volumen, teniendo así mismo un mejor comportamiento frente a la aparición de deformaciones permanentes.

4. Del primer caso, vemos que la mezcla convencional ha presentado un valor elevado de VFA, incluso esta fuera del rango establecido por la norma peruana EG-2013, y es mayor al de la modificada, consecuentemente vemos que la MAC modificada ha tendido un mejor desempeño en la resistencia al ahuellamiento. Para el tercer caso, el contenido de vacíos llenos de asfalto presenta un valor elevado, incluso pasando, por poco, el límite de la norma, resultando un comportamiento idéntico a la primera investigación referenciada. En vista que el VFA tiene el mismo comportamiento en ambas investigaciones, así como en el resultado de ensayo de ahuellamiento, comprobamos que esta propiedad volumétrica incide en la aparición de deformaciones permanentes, un valor elevado de VFA será susceptible al ahuellamiento.
  
5. En el primer caso, se aprecia para la mezcla convencional un valor de VMA muy cercano al mínimo normado, al comparar este parámetro en ambas mezclas, vemos que la modificada tiene un valor de VMA 8.67% mayor a la convencional. Para el segundo, vemos que la MAC convencional ha tenido un menor porcentaje de VMA, y que la modificada presenta mejores resultados frente al ahuellamiento. Por último, para el tercer caso, al igual que las investigaciones referenciadas presenta el mismo patrón de comportamiento, con esto se concluye que el VMA es una propiedad que incide directamente en la resistencia frente al ahuellamiento, siendo que, una MAC con (VMA) bajo, es susceptible a ahuellarse.

## RECOMENDACIONES

1. Se recomienda hacer un estudio minucioso de los componentes de la MAC, como son los agregados, el filler y el cemento asfáltico a fin de poder obtener una mezcla resistente al tráfico.
2. Con respecto al diseño Marshall, se recomienda tener en cuenta la adición de contenido de asfalto para cada grupo de briquetas en estudio, a fin de obtener una mezcla asfáltica resistente.
3. Se recomienda estudiar el fenómeno del ahuellamiento, porque en zonas lluviosas, las depresiones longitudinales serán susceptibles a la formación de charcos, en el cual se formaría una película de agua entre el pavimento y el neumático que podría acabar en un hidropneumático, afectando la seguridad e integridad de los usuarios.
4. Se recomienda realizar la aplicación de una mezcla asfáltica modificada con PET en alguna vía para el tipo de diseño ensayado (tráfico pesado), la recomendación de la aplicación in situ surge debido a que en los ensayos mencionados hubo mejoras en la resistencia al ahuellamiento con respecto a la mezcla asfáltica convencional.
5. Además de obtener resultados del ensayo Marshall para la MAC, se recomienda el uso de otros ensayos que están en la vanguardia tecnológica, con ello estudiar con más precisión las propiedades y su desempeño.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alejandro, p. (2004). Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya.
- Arellano Loayza, I. L., & Cáceres Candia, C. S. (2018). Importancia de la evaluación a las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas en caliente a más de 3000 msnm para el proyecto carretera desvío imperial-pampas. Lima.
- Castillo Neyra, D. G. (2018). Mitigación del ahuellamiento, usando el método Marshall y granulometría Superpave en la carpeta asfáltica, del tramo: la oroya – jauja, 2018. Lima: tesis de grado Universidad Cesar Vallejo.
- Contreras Martínez, C., & Mamani Vilcatoma, D. P. (2019). Reducción de la deformación permanente en pavimentos diseñados con mezclas asfálticas en caliente a través de la incorporación de polvo de caucho proveniente de neumáticos usados. Lima: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.
- Córdova Carbajal, J. J., & Sánchez Llontop, D. O. (2021). Evaluación de la resistencia mecánica a la deformación permanente de una mezcla asfáltica convencional con gradación MAC tipo II y ASTM 3515, Tarapoto 2021. Tarapoto: universidad científica de Perú - UCP.
- Correa Vásquez, M. A., & del Carpio Molero, I. G. (2019). Evaluación PCI y propuesta de intervención para el pavimento flexible del jirón los incas de Piura. Piura: Universidad de Piura.
- Garnica Anguas, P., Flores Flores, M., Gómez López, J. A., & Delgado Alamilla, H. (2005). Caracterización geomecánica de mezclas asfálticas. México: Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT) - Instituto Mexicano del Transporte.
- Garnica Anguas, P., Gómez López, J. A., & Sesma Martínez, J. A. (2002). Mecánica de materiales para pavimentos. Ciudad de México: Secretaría de Comunicaciones y Transporte SCT - Instituto Mexicano del Transporte.

- Góchez Rivas, t. L., Monroy Gonzales, x. E., & ventura lima, m. E. (2012). Diseño de mezclas asfálticas para prevenir el fenómeno de ahuellamiento. Santa ana: universidad de el salvador.
- Hernández cabrera, g. H., & Ramírez rodríguez, f. (2016). Análisis de la influencia del grado de compactación de una mezcla asfáltica en su deformación permanente y la susceptibilidad a la humedad. Bogotá: universidad católica de Colombia.
- Huamán guerrero, n., & Chang Albitres, c. (2012). La deformación permanente en las mezclas asfálticas y el consecuente deterioro de los pavimentos asfálticos en el Perú. Paradigmas, 6-7.
- Invias. (2013). Especificaciones generales de construcción de carreteras. Bogotá: invias.
- Jaramillo Briceo, j. (2015). “estudio del comportamiento de las capas asfálticas ante las deformaciones plásticas en las diferentes regiones del ecuador”. Guayaquil: universidad católica de Santiago de guayaquil.
- Minaya González, s., & Ordóñez Huamán, a. (2006). Diseño moderno de pavimentos. Lima: UNI.
- Montejo Fonseca, a. (2002). Ingeniería\_de\_pavimentos. Bogotá: universidad católica de Colombia ediciones y publicaciones.
- Olarte Riaño, b. N., & soler Sánchez, r. D. (2018). Efecto del grano de caucho en el ahuellamiento de una mezcla asfáltica tipo md-12. Cali - Colombia: universidad pedagógica y tecnológica de Colombia.
- Padilla Rodríguez, a. (2004). Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista. Cataluña: universidad politécnica de Catalunya · Barcelonatech.
- Pineda Morales, r. J., & rodríguez, y. J. (2020). Efecto de las cargas dinámicas desarrolladas en la interfaz llanta – pavimento, en la vida por fatiga y ahuellamiento en pavimentos flexibles. Barranquilla - Colombia: universidad de la costa
- Quispe Castro, e. D., & Torres Meza, D. A. (2020). Diseño de mezcla asfáltica auto reparable mediante inducción de calor, para controlar fallas superficiales de

tráfico pesado en vías metropolitanas de lima. Lima: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.

Tapia Carpio, p. C., & Valderrama lozano, w. E. (2018). Análisis de las propiedades físico-mecánicas de una mezcla asfáltica SMA. Con fibra de celulosa comercial, con respecto a una mezcla asfáltica SMA. Con celulosa elaborada de papel bond. Cusco: universidad andina del cusco.

Delbono, h., & rebollo, o. R. (2017). Ahuellamiento en pavimentos asfálticos utilizando geo sintéticos. Xix CILA, 2.

Loma, j. (s.f.). Métodos de ensayo. Une-en 12697- 34:2013. Ensayo Marshall.

Officials, a. A. (2001). Guide for design of pavement structures. Washington D.C.

Corbacho Chipana, j. (2018). Análisis de la estabilidad Marshall y la deformación permanente mediante el ensayo de rueda cargada de Hamburgo de una mezcla asfáltica modificada en caliente con fibras de tereftalato de polietileno reciclado en la ciudad del cusco-2018. Cusco: universidad nacional de san Antonio abad del cusco.

Dedky Antonella, a. (2019). Análisis de desempeño por humedad de una mezcla asfáltica convencional con gradación Marshall y Superpave. Arequipa: UNSA.

Hadi Abedali, a. (2014). Ms-2 Asphalt mix design methods. Usa: Mustansiriyh University.

Huamán guerrero, n. W. (2022). Clases propedéuticas de pavimento para metodología. Lima.

Instituto del asfalto. (1991). Usa: instituto del asfalto.

Alejandro, p. (2004). Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista. Barcelona: universidad politécnica de Catalunya.

Anguas, p., Delgado Alamilla, h., Gómez López, j., alonso romero, s., & Alarcón Orta, h. (2004). Aspectos del diseño volumétrico de mezclas volumétrico de mezclas. Sanfadil: instituto mexicano del transporte.

Corbacho Chipana, j. E. (2018). Análisis de la estabilidad Marshall y la deformación permanente mediante el ensayo de rueda cargada de Hamburgo de una mezcla asfáltica modificada en caliente con fibras de tereftalato de polietileno reciclado en la ciudad del cusco-2018. Cuzco: universidad nacional de san Antonio abad.

Sequeira rojas, w., & cervantes calva, v. (s.f.). Consistencia de los diseños de mezcla según la metodología Marshall. Costa rica: universidad de costa rica.

## **ANEXO**

Anexo 1: Matriz de Consistencia

Tabla 15:  
Matriz de consistencia

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIÓN	INDICADORES	METODOLOGÍA
<u>Problema general</u>	<u>Objetivo general</u>	<u>Hipótesis general</u>	<u>Variable Independiente</u>			
¿En qué medida las propiedades de las mezclas asfálticas tienen incidencia en el <b>ahuellamiento</b> ?	Determinar las propiedades de las mezclas asfálticas y su incidencia en el <b>ahuellamiento</b> .	Las propiedades de las mezclas asfálticas inciden en el <b>ahuellamiento</b> .	Propiedades de la mezcla asfáltica.	Deformaciones	Permanentes	
<u>Problemas específicos</u>	<u>Objetivos específicos</u>	<u>Hipotesis específicas</u>	<u>Variable dependiente</u>			
1. ¿En qué medida la propiedad de fluencia de la mezcla asfáltica influye en el ahuellamiento?	1. Determinar la fluencia de la mezcla asfáltica y su incidencia ahuellamiento.	1. La fluencia de la mezcla asfáltica incide en el ahuellamiento		Fluencia	Flujo	<b>TIPOLOGÍA:</b> Metodo: Deductivo Orientación: Aplicada Enfoque: Cuantitativo Recolección de datos: Prolectivo Tipo: <b>Descriptivo y correlacional</b> Nivel: <b>Descriptivo y explicativo</b> Diseño: <b>No experimental, transversal, prospectivo</b>  <b>POBLACIÓN Y MUESTRA</b> Población: Todos los pavimentos flexibles susceptibles al ahuellamiento Muestra: Ensayos Marshall, granulometría de agregados, selección de cemento asfáltico  <b>TECNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS:</b> Información de primera fuente, documentos como tesis, artículos informativos, investigaciones previas e informes
2. ¿Cómo incide la estabilidad de la mezcla asfáltica en el ahuellamiento?	2. Determinar la estabilidad de la mezcla asfáltica y su influencia ahuellamiento.	2. La estabilidad de la mezcla asfáltica incide en el ahuellamiento		Estabilidad	Carga máxima	
3. ¿Cómo incide los vacíos de aire de la mezcla asfáltica en el ahuellamiento?	3. Determinar los vacíos de aire de la mezcla asfáltica y su influencia ahuellamiento.	3. El contenido de vacíos de la mezcla asfáltica incide en el ahuellamiento		Contenido de vacíos	% Vacíos	
4. ¿En qué medida los vacíos llenos de asfalto de la mezcla asfáltica inciden en el ahuellamiento?	4. Determinar los vacíos llenos de asfalto de la mezcla asfáltica y su influencia ahuellamiento.	4. Los vacíos llenos de asfalto de la mezcla asfáltica incide en el ahuellamiento		Vacíos llenos de asfalto	Contenido de asfalto efectivo	
5. ¿En qué medida el volumen de vacíos de agregado mineral de la mezcla asfáltica interviene en el ahuellamiento?	5. Determinar el volumen de vacíos de agregado mineral de la mezcla asfáltica y su influencia ahuellamiento.	5. El volumen de vacíos de agregado mineral de la mezcla asfáltica incide en el ahuellamiento		Volumen de vacíos de agregado mineral	Contenido de vacíos de agregado mineral	

Fuente: Propia