

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**ESCUELA CIVIL**



**TESIS DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL**  
**TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

ANÁLISIS TEÓRICO COMPARATIVO DEL DISEÑO DE  
MEZCLAS ASFÁLTICAS CALIENTES POR LOS MÉTODOS  
RAMCODES (POLÍGONO DE VACÍOS), SUPERPAVE Y  
MODULO DINÁMICO, APLICADO EN SUPERFICIES DE  
RODADURA DE PAVIMENTOS FLEXIBLES.

**AUTORA:**

JULIA VERÓNICA AMENDAÑO IZA

**DIRECTOR**

ING. WILSON CANDO

QUITO, ECUADOR

2021

# CARTA DE AUTORIZACIÓN DEL DIRECTOR DE LA DISERTACIÓN



Facultad de Ingeniería  
Secretaría

Av. 12 de Octubre 3076 y Ramón Roca  
Apartado postal 17-01-2184  
Tel: (593) 2 299 17 00 ext. 1623  
Quito – Ecuador [www.puce.edu.ec](http://www.puce.edu.ec)

Quito 3 de diciembre de 2021

Sr. Dr. Freddy Proaño

Secretario Abogado de la Facultad de Ingeniería PUCE

Presente.

De mis consideraciones:

Por medio de la presente debo indicar a usted de la terminación de la tesis de disertación de grado de la JULIA VERÓNICA AMENDAÑO IZA, con cédula de identidad 1716979222, titulado "ANÁLISIS TEÓRICO COMPARATIVO DEL DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CALIENTES POR LOS MÉTODOS RAMCODES (POLÍGONO DE VACÍOS), SUPERPAVE Y MODULO DINÁMICO, APLICADO EN SUPERFICIES DE RODADURA DE PAVIMENTOS FLEXIBLES".

Se adjunta el informe de plagio TURNITIN, el cual es igual al 5%.

Por su amable atención a la presente reciba mis agradecimientos.

Atentamente



WILSON  
OSWALDO CANDO  
TIPAN

Ing. Wilson Cando

Director de la Disertación



## DEDICATORIA

*El presente trabajo de titulación deseo dedicar con mucho Amor a:*

*A Dios que siempre me dio fuerzas para alcanzar este gran sueño a pesar de las circunstancias, a mis padres y a mis hijos Dulce Julie y Julián Alberto que han sido el motor de mi vida para siempre seguir adelante, gracias hijos míos por la paciencia y darme la oportunidad de alcanzar una meta más en mi vida.*

**Julia Amendaño**

## AGRADECIMIENTOS

*A mi padre Manuel Amendaño, a mis hijos Dulce Julie y Julián Alberto, por ser mi apoyo y mi fuerza para salir adelante y construir una nueva etapa en nuestras vidas llenas de triunfos y logros.*

*A un gran ser humano y profesor ingeniero Wilson Cando, que su apoyo y buenos consejos me ayudó a sacar adelante este proyecto de tesis.*

*A mis amigos y familiares, que siempre estuvieron conmigo, apoyándome incondicionalmente en todo momento con sus consejos y buenos deseos, Belén, Rodrigo, Martha, Alberto.*

**Julia Amendaño**

## TABLA DE CONTENIDO

CARTA DE AUTORIZACIÓN DEL DIRECTOR DE LA DISERTACIÓN .....	ii
DEDICATORIA .....	iii
AGRADECIMIENTOS .....	iv
TABLA DE CONTENIDO .....	v
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	viii
ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS .....	ix
ÍNDICE DE ECUACIONES .....	x
INDICE DE TABLAS .....	xii
INDICE DE GRAFICOS .....	xiii
RESUMEN .....	xiv
ABSTRACT .....	xv
CAPÍTULO 1: GENERALIDADES .....	1
1.1 JUSTIFICACIÓN .....	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA: .....	1
1.3 OBJETIVOS .....	2
1.3.1. OBJETIVO GENERAL .....	2
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	2
1.4. ALCANCE.....	2
1.5 ANTECEDENTES O MARCO REFERENCIAL.....	2
1.5.1 ANTECEDENTE. -.....	3
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL .....	4
2.1 ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO.....	4
2.1.1 SUBRASANTE.....	4
2.1.2 SUBBASE.....	4
2.1.3 BASE.....	5

2.1.4 IMPRIMACIÓN.....	5
2.1.5 CAPA DE RODADURA .....	5
2.1.6 PAVIMENTO .....	5
2.1.6.1 PAVIMENTO RÍGIDO.....	6
2.1.6.2 PAVIMENTO FLEXIBLE.....	6
2.1.7. AGREGADO PÉTREO .....	7
2.1.8. ADITIVOS .....	7
2.1.9. ASFALTO.....	7
2.2 MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO.....	8
2.3 MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE.....	8
CAPÍTULO 3: MÉTODOS DE DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CALIENTES .....	10
3.1 MÉTODO DE RAMCODES (POLÍGONO DE VACÍOS).....	10
3.1.1 ¿Qué es RAMCODES? .....	10
3.1.2 POSTULADOS DE RAMCODES.....	11
3.1.3 ¿POR QUÉ USAR RAMCODES?.....	11
3.1.4 RAMCODES está compuesto por los siguientes módulos:.....	12
3.1.5 METODOLOGÍA.....	12
3.1.6. ELABORACIÓN DEL POLÍGONO DE VACÍOS. ....	21
3.1.7 Aplicación de la metodología RAMCODES.....	26
3.1.8 PROCEDIMIENTO DE APLICACIÓN DEL POLÍGONO DE VACÍOS AL DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE. ....	27
3.1.8.1 Polígono de Vacíos.....	27
3.2 METODO SUPERPAVE.....	34
3.2.1 Pruebas al agregado mineral.....	36
3.2.1.1 Propiedades de consenso.....	37
3.2.1.2 Propiedades de la fuente de Origen.....	38
3.2.3 Pruebas a las mezclas asfálticas.....	39

3.2.4	Susceptibilidad a la humedad.....	40
3.2.5	Desarrollo del Método de Diseño Asfáltico Superpave.....	40
3.2.6	Parámetros volumétricos.....	42
3.2.7	Descripción del experimento .....	47
3.2.8	Selección de los materiales .....	47
3.2.9	Características de la mezcla asfáltica.....	55
3.2.10	Elaboración de la mezcla asfáltica.....	56
3.2.11	APLICACIÓN DEL METODO SUPERPAVE.....	64
3.3	MÓDULO DINÁMICO .....	65
3.3.1	MÓDULO DINÁMICO DE DISEÑO DE MEZCLAS.....	65
3.3.2	Ensayo de módulo dinámico .....	67
3.3.3	Ensayo de módulo dinámico AASHTO T 342- 11.....	75
3.3.4	Equipo.....	75
3.3.5	Procedimiento.....	78
3.3.6	Análisis de resultados de ensayo de Módulo Dinámico.....	81
3.3.7	Aplicación:.....	89
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MÉTODOS RAMCODES (POLÍGONO DE VACÍOS), SUPERPAVE, MÓDULO DINÁMICO.....		90
CAPITULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....		95
CONCLUSIONES .....		95
RECOMENDACIONES.....		97
BIBLIOGRAFIA.....		98
ANEXOS .....		100
ANEXO 1.....		101
GLOSARIO.....		101

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 3.1.1: Fases Método Ramcodes .....	14
Ilustración 3.2.1 <b>Esquema de procedimiento de diseño de mezcla Superpave</b> .....	35
Ilustración 3.2.2: Parámetros de diseño volumétrico .....	41
Ilustración 3.2.3: Diagrama de los componentes de una mezcla asfáltica compactada	41
Ilustración 3.2.4: Mediciones de los esfuerzos de corte en el compactador giratorio, ejemplo .....	58
Ilustración 3.2.5: Panel de control principal del APA, ejemplo .....	60
Ilustración 3.2.6: Panel de control para el ensaye de deformación permanente en el APA, ejemplo .....	62
Ilustración 3.3.1: Requerimientos del sistema de medición de deformación .....	77

## ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 3.2.1: Viscosímetro rotacional .....	54
Fotografía 3.2.2a: Elaboración de la mezcla asfáltica, se dosifica el asfalto en peso con respecto a la mezcla total.....	56
Fotografía 3.2.2b: Elaboración de la mezcla asfáltica, cubrimiento del agregado pétreo totalmente .....	56
Fotografía 3.2.3a: Compactación de la mezcla asfáltica .....	57
Fotografía 3.2.3b: Compactación de la mezcla asfáltica .....	57
Fotografía 3.2.5: Calibración de las ruedas del APA .....	61
Fotografía 3.2.6a: Evaluación de la deformación permanente en el APA .....	63
Fotografía 3.2 6b: Evaluación de la deformación permanente en el APA .....	63
Fotografía 3.3.1: Espécimen con termocople para monitorear la temperatura del espécimen de ensayo. ....	79

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 3.1.1: Gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada.....	16
Ecuación 3.1.2: Gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada.....	16
Ecuación 3.1.3: Gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada.....	16
Ecuación 3.1.4: Gravedad específica bruta del agregado en estudio.....	17
Ecuación 3.1.5: Gravedad específica efectiva del agregado.....	18
Ecuación 3.1.6: Gravedad específica máxima de las mezclas del agregado .....	18
Ecuación 3.1.7: Asfalto absorbido.....	19
Ecuación 3.1.8: Contenido de asfalto efectivo en la mezcla .....	19
Ecuación 3.1.9: Porcentaje de vacíos en el agregado mineral de la mezcla.....	20
Ecuación 3.1.10: Porcentaje de vacíos de aire en la mezcla compactada .....	20
Ecuación 3.1.11: Porcentaje de vacíos rellenos de asfalto de la mezcla compactada ....	20
Ecuación 3.1.12: Porcentaje de polvo (relación filler-asfalto) .....	21
Ecuación 3.1.13: Porcentaje de cemento asfáltico óptimo .....	25
Ecuación 3.1.14: Gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada.....	25
Ecuación 3.1.15: Determinación del porcentaje de vacíos de aire para el porcentaje óptimo de asfalto de la mezcla, % .....	25
Ecuación 3.1.16: Gravedad específica teórica máxima.....	25
Ecuación 3.1.17: Vacíos de aire en el agregado mineral de diseño.....	25
Ecuación 3.1.18: Vacíos de aire llenos de asfalto de diseño, % .....	25
Ecuación 3.2.1: Gravedad específica neta para el agregado total .....	42
Ecuación 3.2.2: Gravedad específica efectiva del agregado.....	43
Ecuación 3.2.3: Vacíos en el agregado mineral.....	43
Ecuación 3.2.4: Vacíos en el agregado mineral.....	44
Ecuación 3.2.5: Vacíos de aire en la mezcla compactada, porcentaje del volumen total	44
Ecuación 3.2.6: Vacíos llenados con asfalto, porcentaje de VAM.....	45

Ecuación 3.2.9: Contenido de asfalto efectivo, porcentaje de la masa total de la mezcla .....	47
Ecuación 3.3.1: Módulo dinámico.....	66
Ecuación 3.3.2: Módulo dinámico.....	66
Ecuación 3.3.3: Módulo Dinámico.....	66
Ecuación 3.3.4: El módulo dinámico es una función de la frecuencia (tiempo) y la temperatura .....	72
Ecuación 3.3.5: $a_T$ es una función de la temperatura que es un indicador de la susceptibilidad térmica de la mezcla asfáltica .....	73
Ecuaciones: 33, 34, 35: Factor de traslación .....	74
Ecuación 3.3.6: Error estándar de la carga aplicada.....	75

## INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1.1 Características de la Subrasante .....	4
Tabla 3.2.1 Propósito de las pruebas de asfaltos Superpave Equipo.....	39
Tabla 3.2.2: Pruebas al agregado mineral Ensayos .....	48
Tabla 3.2.3: Materiales constitutivos de la mezcla de agregados en %.....	48
Tabla 3.2.4: Selección de los contenidos de asfalto .....	55
Tabla 3.2.5: Características de las probetas Superpave.....	55
Tabla 3.2.6: Características de las probetas Superpave.....	57
Tabla 3.2.7: Niveles de compactación de diseño para 10 millones de ESALs.....	59
Tabla 3.3.1: Exactitud y resolución del sistema de medición .....	76
Tabla 3.3.2: Esquema general de los puntos de medición (Sin escala).....	77
Tabla 3.3.3: Tiempos de equilibrio recomendados.....	79
Tabla 3.3.4: Niveles de esfuerzo dinámico típicos.....	80
Tabla 3.3.5: Número de ciclos para la secuencia de ensayo Frecuencia .....	81
Tabla 3.3.6: Condiciones de ensayo de modulo dinámico .....	83
Tabla 3.3.7: Evaluación de la calidad de la medición del ensayo a 54°C y 40° C.....	86
Tabla 3.3.8: Secuencia de ensayo para validar propuestas.....	86

## INDICE DE GRAFICOS

GRÁFICO 3.1.1: ISOLÍNEAS DE VACÍOS DE AIRE VA .....	22
GRÁFICO 3.1.2: ISOLÍNEAS DE VACÍOS EN EL AGREGADO MINERAL (VAM) .....	23
GRÁFICO 3.1.3: ISOLÍNEAS DE VACÍOS LLENADOS CON ASFALTO (VFA) ..	23
GRAFICO 3.1.4: POLÍGONO DE VACÍOS RAMCODES.....	24
GRAFICO 3.2.1: Curva granulométrica de la mezcla de agregados.....	49
GRAFICO 3.2.2: clasificación ligante de asfalto Superpave .....	52
Gráfico 3.2.3: Carta de viscosidad.....	54
Gráfico 3.2.4: Evolución de la deformación permanente en el APA, ejemplo .....	63
Gráfico 3.3.1: Gráfica esfuerzo-deformación durante un ensayo de módulo dinámico.	67
Gráfico 3.3.2 a: Curvas isotérmicas del módulo dinámico.....	69
Gráfico 3.3.2 b: Ángulo de Fase.....	69
Gráfico 3.3.3: Gráfica de plano de Cole-Cole.....	70
Gráfico 3.3.4: Gráfica de espacio de Black.....	71
Gráfico 3.3.5: Construcción de la curva maestra(a), (b). .....	73
Gráfico 3.3.6: Curva maestra de módulo dinámico.....	74
Gráfico 3.3.7: Granulometría de Diseño .....	81
Gráfico 3.3.8: Repetibilidad de un ensayo de modulo dinámico en 4 diferentes presentaciones.....	82
Gráfico 3.3.9: Resultados del ensayo de Módulo Dinámico .....	85
Gráfico 3.3.10: Valores aT a diferente temperatura con diferentes secuencias de ensayo .....	87
Gráfico 3.3.11: Resultados del ensayo de Módulo Dinámico con diferentes secuencias de ensayo. ....	88

## RESUMEN

La finalidad de la presente es analizar teóricamente semejanzas y diferencias entre los Métodos Módulo Dinámico, RAMCODES y Superpave en el diseño de mezclas asfálticas calientes para aplicar en la superficie de rodadura de pavimentos flexibles en el Ecuador.

Los métodos utilizados en el análisis comparativo son:

El Método RAMCODES estudia la relación entre la humedad, densidad y resistencia de la mezcla asfáltica; y, correlacionar el potencial de densificación y la resistencia a través de la clasificación cuantitativa.

Se puede decir que el Método Superpave, está iniciando el desarrollo de un nuevo sistema para especificar materiales asfálticos. Representa una tecnología provista de tal manera que pueda especificar cemento asfáltico y mineral agregado; desarrollar diseños de mezclas asfálticas; analizar y establecer predicciones del desempeño del pavimento

Por último el Módulo Dinámico, procedimiento que se le define como un valor absoluto del módulo complejo determinado las propiedades elásticas de un material de viscosidad lineal sometido a una carga sinusoidal (Alamilla & Flores, 2017)

El Módulo Dinámico es un número complejo que consta de dos partes y se describe a continuación: la parte real, la cual representa la rigidez o también la llamamos la parte elástica. (Alamilla & Flores, 2017) .

La parte imaginaria del módulo dinámico representa el amortiguamiento interno de los materiales o su parte viscosa, y está determinado como la relación de la amplitud del esfuerzo sinusoidal máximo y la amplitud de la deformación sinusoidal máxima. (Alamilla & Flores, 2017)

Se ha determinado que estos métodos servirán para el desarrollo integral de nuestro país a largo plazo con la creación y adaptación de esta tecnología, teniendo una visión al futuro de contar con una infraestructura de transporte que se refleje en menores costos para realizar esta actividad económica.

## ABSTRACT

The purpose of this document is to theoretically analyze similarities and differences between the Dynamic Modulus, RAMCODES and Superpave methods in the design of hot asphalt mixtures to apply on the rolling surface of flexible pavements in Ecuador.

The methods used in the comparative analysis are:

The Rancodes Method studies the relationship between moisture, density and resistance of the asphalt mix; and, correlate the densification potential and resistance through quantitative classification.

The Superpave Method can be said to be starting the development of a new system for specifying asphalt materials. Represents a technology provided in such a way that it can specify asphalt cement and mineral aggregate; develop asphalt mix designs; analyze and make predictions of pavement performance

Finally, the dynamic modulus of this procedure is defined as an absolute value of the complex modulus determined by the elastic properties of a material with linear viscosity subjected to a sinusoidal load (Alamilla & Flores, 2017)

The dynamic module is a complex number that consists of two parts and is described below: the real part, which represents the stiffness or we also call it the elastic part (Alamilla & Flores, 2017).

The imaginary part of the dynamic module represents the internal damping of materials or their viscous part, and is determined as the ratio of the amplitude of the maximum sinusoidal stress and the amplitude of the maximum sinusoidal deformation (Alamilla & Flores, 2017)

It is determined that these methods will serve for the comprehensive development of our country and in the long term with the creation and adaptation of this technology, having a vision of the future of having a transport infrastructure that is reflected in lower costs to carry out economic activity.

**TEMA:**

ANÁLISIS TEÓRICO COMPARATIVO DEL DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CALIENTES POR LOS MÉTODOS RAMCODES (POLÍGONO DE VACÍOS), SUPERPAVE Y MÓDULO DINÁMICO, APLICADO EN SUPERFICIES DE RODADURA DE PAVIMENTOS FLEXIBLES.

**CAPÍTULO 1: GENERALIDADES****1.1 JUSTIFICACIÓN**

Conocer diferentes métodos alternativos que vayan a la par con los avances tecnológicos del medio, en el diseño de mezclas asfálticas que se podrían emplear en concordancia con las características de los materiales y su respuesta frente a las diferentes condiciones climáticas en el Ecuador.

Se espera que esta investigación sea un aporte con las autoridades gubernamentales, consultores y constructores de la infraestructura del transporte para aplicar otros métodos innovadores de diseño de mezclas asfálticas calientes en el Ecuador.

**1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA:**

En el estudio de las mezclas asfálticas se ha determinado que la característica de los materiales (agregados) y asfalto son muy variables dependiendo de la localización de las zonas y regiones del Ecuador, es menester realizar estudios e investigación sobre los métodos de diseño de mezclas asfálticas; de tal manera que se pueda aplicar el método más idóneo en concordancia con sus distintas condiciones meteorológicas.

Se busca con esta investigación ofrecer al constructor, consultor y fiscalizador el uso de métodos alternativos que permitan que el diseño, fabricación, construcción y control de calidad de mezclas asfálticas dependan de la zonificación o sectorización a lo largo del proyecto en función de sus condiciones meteorológicas.

Por lo expuesto, amerita encontrar una respuesta a ¿Qué relación existe entre los métodos Modulo Dinámico, RAMCODES y Superpave en el diseño de mezclas asfálticas para aplicar en la superficie de rodadura de pavimentos flexibles en el Ecuador?

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1. OBJETIVO GENERAL**

Analizar teóricamente semejanzas y diferencias entre los métodos Módulo Dinámico, RAMCODES y Superpave en el diseño de mezclas asfálticas calientes para aplicar en la superficie de rodadura de pavimentos flexibles en el Ecuador.

### **1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar los materiales primarios a utilizarse en el diseño de mezclas asfálticas.
- Determinar los materiales primarios utilizados en cada uno de los métodos de diseño propuestos.
- Establecer semejanzas y diferencias entre los tres métodos de diseño propuestos.
- Determinar el método que más se adapte a las condiciones de nuestro país, de conformidad con el análisis realizado.

## **1.4. ALCANCE**

Con el análisis teórico realizado determinar las semejanzas y diferencias entre los métodos Modulo Dinámico, RAMCODES y Superpave en el diseño de mezclas asfálticas en caliente aplicado en superficies de rodadura de pavimentos flexibles en el Ecuador.

## **1.5 ANTECEDENTES O MARCO REFERENCIAL**

Con la metodología tradicional o también se podría decir convencional de diseño como de suelos, mezclas, y mezclas asfálticas, también llamadas geomateriales, conduciéndonos a diseños sobre dimensionados o bien sub dimensionados. dando como resultado pérdida de recursos. Por otra parte, en materiales como las mezclas asfálticas se ha constatado que los criterios de diseño se encuentran separados de los criterios de control. Como por ejemplo, al analizar los suelos compactados, el erróneo paradigma de a mayor densidad, mayor resistencia ha calado tanto que los ingenieros no se interesan más por la resistencia del suelo, sino por su densidad.(Sánchez-Leal, 2009)

Llegando a un punto de gran importancia, el criterio de economía, que se debe añadir a toda decisión de ingeniería, integrándose en este caso el diseño de mezclas asfálticas en caliente. Al realizar un análisis de costos unitarios algunas mezclas asfálticas se puede

determinar cuál es el de menor valor y el más conveniente para su ejecución, sin dejar a un lado los requisitos técnicos que debe cumplir nuestro diseño, para lo cual deben compararse cuál sería más conveniente a utilizar tanto los materiales locales como los importados de otras fuentes de suministro, todo esto será determinado en función del tipo de vía a pavimentar, también otras características que se debe tomar en cuenta es: distancias de transporte, volumen de tráfico que va a soportar la vía, tipo de mezcla, posición de la mezcla dentro de la estructura del pavimento, cumplimiento de las especificaciones de calidad, etc. (Ramcodes, 2011).

### **1.5.1 ANTECEDENTE. -**

En otros países son utilizados muchos métodos de diseño de mezclas asfálticas, se puede decir distintos al utilizado en el Ecuador, con los avances tecnológicos algunos países han desarrollado metodologías que han convertido en unas verdaderas soluciones técnicas y en la mayoría de los casos desde el punto de vista comercial, más rentables y poniendo de relieve el uso y aplicación del producto ofertado, de ahí la necesidad de encontrar soluciones propias que se adapten a nuestra realidad nacional.

Es muy importante para el usuario como se encuentran las condiciones de la superficie de rodadura, independientemente del diseño y construcción del paquete estructural del pavimento.

Contar con la superficie de rodadura de la infraestructura del transporte en buenas condiciones significa para el Estado un ahorro importante en los costos de mantenimiento vial y para el usuario un ahorro en su economía reflejado en movilización y mantenimiento de su vehículo.

El Estado al mantener en buenas condiciones la superficie de rodadura de la infraestructura del transporte, proporciona ahorro en los costos operativos, repuestos, mantenimiento vehicular, aumenta la vida del vehículo, reduce tiempos de viaje, brinda seguridad y comodidad a los usuarios.

La superficie de rodadura de la infraestructura del transporte en pavimentos flexibles calientes es casi siempre una carpeta asfáltica, requiriendo un apropiado diseño de pavimentos. La durabilidad de la capa de rodadura, es muy importante para el estado y el dueño de la obra lo que se busca es un óptimo diseño de la mezcla asfáltica.

## CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

### 2.1 ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO

Las capas superpuestas que conforman una estructura del pavimento son las siguientes:

#### 2.1.1 SUBRASANTE

la subrasante actúa como la cimentación del pavimento, se tiene en cuenta que mientras de mayor calidad sea el material de la subrasante, tendrá un menor espesor es capaz de soportar las cargas que transmite el pavimento y darle sustentación, la calidad no se verá afectada ya que con estas características se considera un ahorro en costos, otra característica importante de la subrasante es evitar que el terraplén contamine al pavimento (REGISTRO, 2020).

La subrasante tiene las siguientes características:

f máximo	3"
expansión máxima	5%
grado de compactación mínimo	95%
espesor mínimo para caminos de bajo tránsito	30cm
espesor mínimo para caminos con un TPDA > de 2000 vehículos	50cm

*Tabla 2.1.1 Características de la Subrasante*  
*FUENTE(REGISTRO, 2020)*

#### 2.1.2 SUBBASE

La subbase y subrasante pueden tener un espesor equivalente con respecto a su material, además la subbase impide que el agua de las terracerías ascienda por capilaridad, evitando que el pavimento sea absorbido por la subrasante. La subbase permite que los esfuerzos sean transmitidos adecuadamente a las terracerías (REGISTRO, 2020).

### **2.1.3 BASE**

Esta capa es capaz de recibir la máxima parte de los esfuerzos producidos por los medios de transporte. La carpeta es puesta sobre ella porque la capacidad de carga del material friccionante es baja en la superficie por falta de confinamiento. Por lo general esta capa adicional a la compactación necesita otro tipo de mejoramiento (estabilización) que permite llegar las cargas del tránsito sin deformarse. La cantidad del valor cementante en una base es indispensable para asignar una sustentación adecuada a las carpetas asfálticas delgadas. En caso contrario, cuando las bases se construyen con materiales pétreos y se comienza a transitar por la vía, los medios de transporte provocan deformaciones transversales. Por otro lado, en el caso de la granulometría, es poco relevante que los granos tengan una fase semejante a la que marcan las líneas de las fronteras de las zonas, siendo de máxima consideración que el material tenga un  $V_{rs}$  (valor relativo de soporte) y una plasticidad mínima; igualmente se recomienda no compactar materiales en las bases que tengan una humedad semejante o máxima que su límite plástico (REGISTRO, 2020).

### **2.1.4 IMPRIMACIÓN**

Imprimación asfáltica es la aplicación a una superficie absorbente de un mineral asfáltico líquido de baja viscosidad siendo esta una capa impermeable como preparación para cualquier tratamiento en este caso para ligar a la superficie tratada y la capa de rodadura (Brante Lara, 2020).

### **2.1.5 CAPA DE RODADURA**

Es una mezcla asfáltica, es la capa superior de la calzada, su mayor particularidad es dar comodidad al tránsito. Debe mantener características antideslizantes, ser impermeable y resistir la erosión producto del tráfico y los impactos desintegrantes del ambiente (ESR, 2016).

### **2.1.6 PAVIMENTO**

Se denomina a una estructura firme, también este término se utiliza para denominar solo la capa de rodadura, especialmente cuando ella está constituida por una carpeta asfáltica (MOP-001-F-2002, 2002).

El pavimento es el conjunto de capas con material seleccionado, este recibe en forma directa las cargas transmitidas del tránsito y las transfiere a los estratos inferiores en forma disipada, proporcionando una superficie de rodamiento, la cual debe funcionar de manera eficiente. Los requisitos necesarios para un adecuado funcionamiento del pavimento son las siguientes: anchura, trazo horizontal y vertical, resistencia que permite a las cargas prevenir las fallas y los agrietamientos, además de una adherencia adecuada entre el vehículo y el pavimento aún en condiciones de humedad. El pavimento deberá mostrar que resiste los esfuerzos destructivos del tránsito, las inclemencias del medio ambiente como la intemperie y el agua. La visibilidad de la vía debe ser adecuada y el paisaje agradable para evitar la fatiga del conductor (REGISTRO, 2020).

#### **2.1.6.1 PAVIMENTO RÍGIDO**

El pavimento rígido se basa en la composición de losas de concreto hidráulico que en ciertas ocasiones presenta un armado de acero, la construcción de este tipo de pavimento tiene un costo inicial más elevado que el flexible, su ciclo de vida varía entre 20 y 40 años; el mantenimiento requerido de esta estructura es mínimo y generalmente se efectúa en las juntas de las losas (REGISTRO, 2020).

#### **2.1.6.2 PAVIMENTO FLEXIBLE**

Es una estructura que se compone por una capa o carpeta asfáltica es decir el pavimento flexible utiliza una mezcla de agregados de diferentes dimensiones grueso o fino (piedra machacada, grava o arena) también cuenta con material bituminoso obtenido del asfalto o petróleo, y de los productos del carbón mineral como la hulla. Esta combinación es compacta, llegando a absorber grandes golpes y soportar un elevado volumen de tránsito debido que es bastante plástica (ESR, 2016).

La estructura de pavimento flexible es la unión de un conjunto de capas, colocadas una a continuación de otra sobre la subrasante, en el siguiente orden: subbase, base y capa de rodadura. Esta estructura soporta las cargas del tránsito y reparte los esfuerzos en la plataforma de la vía (Rodríguez, Téllez, Paul, et al., 1998).

Los criterios básicos a tenerse en cuenta en el comportamiento de la superficie de rodadura de un pavimento flexible, es que ésta sufrirá con el tiempo daños y deterioro incluso sabiendo que su diseño es el más eficiente y construido tomando en cuenta todas las especificaciones y normas de calidad que existen. Se puede afirmar que la superficie

de rodadura (mezcla asfáltica) tiene una vida prácticamente definida; incluso dándole un mantenimiento óptimo, en algún momento alcanzará un punto de falla (Rodríguez, Téllez, Paul, et al., 1998).

### **2.1.7. AGREGADO PÉTREO**

Aproximadamente el 94% de agregados pétreos componen las mezclas asfálticas en caliente. Los agregados son de gran importancia en el comportamiento y resistencia de la estructura del pavimento, estos pueden ser gruesos y finos (Montoya Tovar & David, 2017).

En el caso de mezclas asfálticas en caliente, los agregados típicos incluyen arena, grava, piedra triturada y polvo de roca. El agregado constituye entre el 90 y 95 por ciento, en peso, y entre el 75 y 85 por ciento, en volumen. El comportamiento de un pavimento se ve altamente influenciado por la selección apropiada del agregado, debido a que el agregado mismo proporciona la mayoría de las características de capacidad portante (Montoya Tovar & David, 2017).

### **2.1.8. ADITIVOS**

Es una sustancia que se mezcla con la masa de concreto, con productos áridos o asfálticos, la importancia de utilizar esta sustancia es para proporcionar una o varias características para una mejor trabajabilidad de la mezcla asfáltica (MOP-001-F-2002, 2002).

Un aditivo se le puede utilizar como retardador de fraguado permitiendo obtener un plazo adecuado de trabajabilidad del hormigón, a la temperatura a convenir y más condiciones ambientales previstas en su colocación en la vía, permitiendo adaptarse a las características especiales de cada obra (MOP-001-F-2002, 2002).

### **2.1.9. ASFALTO**

Asfalto es un betún de diferentes características como sólido, semisólido o líquido, de color entre negro o pardo oscuro, se puede encontrar en depósitos naturales u obtenerlos artificialmente como un residuo del petróleo. En el Ecuador, la gran parte del asfalto empleado en las mezclas asfálticas se obtiene del petróleo (MOP-001-F-2002, 2002).

Normalmente los productos asfálticos y bituminosos por lo general son bastante viscosos para que puedan adherirse de manera directa a los suelos; por ello deben ser usados calientes, emulsificadores en agua (llamados emulsiones) o rebajados con un solvente,

por lo general es volátil, como la gasolina. Se puede afirmar que todos los tipos de suelos se estabilizan con asfalto, incluyendo a los suelos arcillosos siendo estos más compresibles y activos, pero se puede afirmar que los mejores resultados se obtienen con arenas y con gravas arenosas, materiales a los que el asfalto le da características de cohesión e impermeabilidad (Garnica Anguas et al., 2002).

## **2.2 MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO**

Estas mezclas son fabricadas con emulsiones asfálticas, se puede decir que su principal campo de aplicación es en la construcción y en la conservación de vías secundarias. Su envejecimiento se puede desacelerar utilizando el sellado por medio de lechadas asfálticas (Padilla Rodríguez & Asfálticas, 2020).

Su mayor característica es permitir la trabajabilidad tras la fabricación incluso durante semanas, esto se debe a que el ligante permanece un periodo de tiempo prolongado con una viscosidad baja debido a que se utilizan emulsiones con asfalto fluidificado: el incremento de la viscosidad es muy lento en los acopios, haciendo factible el almacenamiento, cosa que no sucede puesta en obra en una capa de espesor pequeño, el endurecimiento es relativamente rápido en las capas ya colocadas y extendidas debido a la evaporación del fluidificante. Hay un grupo de mezclas en frío, el cual se elabora con una emulsión de rotura lenta, sin ningún tipo de fluidificante, pero es poco usual, y pueden compactarse después de haber roto la emulsión. El proceso de incremento gradual de la resistencia por lo general se lo llama maduración, que consiste prácticamente en la evaporación del agua procedente de la rotura de la emulsión con el consiguiente incremento de la cohesión de la mezcla (Padilla Rodríguez & Asfálticas, 2020).

## **2.3 MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE**

La mezcla asfáltica o bituminosa en caliente se denomina a la combinación de áridos incluido el polvo mineral con un ligante. Las cantidades concernientes de ligante y áridos permiten determinar las propiedades físicas de la mezcla. El proceso de fabricación consiste en calentar el agregado pétreo y el ligante a alta temperatura, muy superior a la ambiental. Para luego rápidamente esta mezcla ser colocada en la obra (FRAPIAL, 2020).

El tipo más generalizado de mezcla asfáltica en caliente es la composición formada de un ligante hidrocarbonado, agregados incluido el polvo mineral y eventualmente aditivo,

dando como resultado una película homogénea de ligante y esto se lo logra incorporando bien todos los materiales (Padilla Rodríguez & Asfálticas, 2020).

## **CAPÍTULO 3: MÉTODOS DE DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CALIENTES**

Las mezclas asfálticas también son conocidas como aglomerados, están conformadas por una combinación de agregados pétreos de diferentes diámetros y un bitumen viscoso, de manera que aquellos quedan cubiertos por una película continua y uniforme.

Los métodos de mezclas asfálticas a analizar son las siguientes:

- MÉTODO DE RAMCODES (POLÍGONO DE VACÍOS)
  
- MÉTODO SUPERPAVE
  
- MÉTODO MÓDULO DINÁMICO

### **3.1 MÉTODO DE RAMCODES (POLÍGONO DE VACÍOS)**

#### **3.1.1 ¿Qué es RAMCODES?**

RAMCODES, en inglés Rational Methodology for Compacted geomaterial's Density and Strength Analysis (Metodología Racional para la Densidad de Geomateriales Impactados y Análisis de fuerza), es una metodología para diseñar suelos y mezclas asfálticas. Esta es una metodología que ha sido estudiada y desarrollada por FJ Sánchez-Leal desde 1998 en siete fases que se explicarán más adelante (Sánchez-Leal et al., 2002).

La Metodología Ramcodes, estudia cómo se relaciona la humedad, densidad y resistencia de la mezcla asfáltica; y, la correlación que existe entre el potencial de densificación y la resistencia a través de la clasificación cuantitativa, obtenida según el factor característico (Sánchez-Leal et al., 2002).

Este método permite conocer las propiedades mecánicas de los materiales que son utilizados.

El objetivo principal de RAMCODES es establecer un desarrollo confiable entre la teoría y la práctica en el proceso de diseño y control de colocación de geomateriales compactados (subrasante, subbase, base), manteniendo un control recurrente y continuo en la obra (Sánchez-Leal et al., 2002).

### **3.1.2 POSTULADOS DE RAMCODES**

Es importante analizar los siguientes postulados filosóficos de RAMCODES:

“1) Un geomaterial compactado puede ser suelo, suelo-cemento, mezcla asfáltica o mezcla de cemento hidráulico (suelo cementado). De manera que los conceptos y criterios desarrollados para cada material podrían ser aplicados al resto.

2) Cualquier sistema de clasificación para geomateriales debe considerar al menos la gradación y la cantidad de superficie específica de los finos (indirectamente cuantificada por el concepto de plasticidad) como los principales factores inherentes que influyen su comportamiento mecánico e hidráulico.

3) Para optimizar la interpretación, la recolección de información y el diseño, un sistema de clasificación debería no sólo ser cualitativo, sino también cuantitativo. Esto es, debería producir un número relacionado a una escala continua con el fin de correlacionar los parámetros de respuesta con la clasificación.

4) Para optimizar el diseño de un geomaterial compactado se utilizarán experimentos factoriales, a fin de evaluar la interacción entre variables en la respuesta deseada.”  
(Sánchez-Leal, 2009).

### **3.1.3 ¿POR QUÉ USAR RAMCODES?**

Las razones por las que se sugiere usar RAMCODES como método para diseñar mezclas asfálticas son:

- Económicas, ya que este método de diseño permite la optimización y el uso racional de los materiales, obteniendo productos más confiables (Sánchez-Leal, 2009).
- Este método también se lo puede utilizar en el análisis de los geomateriales usados en la construcción de rellenos y pavimentos.
- Las empresas e instituciones que han empleado RAMCODES manifiestan que utilizaron de manera satisfactoria materiales que, al ser analizados con la metodología clásica, seguramente hubieran sido desechados.

- La mayor resistencia se lo puede alcanzar durante la construcción, con un menor número de pasadas del equipo de compactación, con una notable reducción del tiempo de diseño
- La clasificación cuantitativa de RAMCODES permite a las compañías y laboratorios coleccionar resultados de análisis sobre materiales por medio de correlaciones que se van incrementando en el tiempo. Estas correlaciones son muy convenientes en las etapas de prediseño y licitación de proyectos pues se puede disponer la utilización de un préstamo a partir de ensayos rutinarios de clasificación, lo que ahorra tiempo y recursos (Sánchez-Leal, 2009).

#### **3.1.4 RAMCODES está compuesto por los siguientes módulos:**

a) CLASIFICACIÓN. – describe a un geomaterial como una combinación de su proporción granulométrica y la superficie específica de su parte fina (Sánchez-Leal, 2009).

b) MARCO DE ANÁLISIS. – descripción matemática que representa las condiciones de diseño y regiones de control de compactación (Sánchez-Leal, 2009).

c) DISEÑO. - Es un método que se fundamenta en experimentos factoriales, para una utilización optimiza del geomaterial (Sánchez-Leal, 2009).

d) CONTROL utiliza un método estadístico de control de calidad de compactación que evita la aceptación de lotes defectuosos o el rechazo de lotes satisfactorios (Sánchez-Leal, 2009).

e) SOFTWARE de graficación y análisis estadísticos para la implementación de los experimentos factoriales, la representación de las regiones de control, ajustes de tendencias e inferencias estadísticas durante el control (en desarrollo).

#### **3.1.5 METODOLOGÍA.**

RAMCODES Es una metodología basada en experimentos factoriales, este método combina la experiencia práctica de diseño y el control para análisis de densificación y resistencia de geomateriales compactados (Jhonny Javier Pincay Bermello et al., 2018).

Esta metodología Ramcodes se basa en siete fases que a continuación se describe:

- 1.- Clasificación de geomateriales (suelos y mezclas asfálticas) a utilizarse. Con esto se consigue determinar la clasificación del suelo subrasante, granulometría, límites y humedad de la mezcla asfáltica.
- 2.- Relación de manera efectiva entre humedad, densidad y resistencia (CBR). En las demás capas.
- 3.- Análisis de la resistencia de la mezcla con equipo sofisticado. Determinar el CBR en las demás capas de la estructura.
- 4.- Cambio volumétrico bajo hidratación, esta etapa todavía en estudio
- 5.- Análisis de mezclas asfálticas haciendo una comparación entre el control de compactación y el análisis de diseño
- 6.- Utilización de un sencillo Software para facilitar la implementación de RAMCODES.
- 7.- Desarrollo de una metodología estadística de control de calidad, pudiendo ser utilizada en los siguientes proyectos

La Metodología de RAMCODES ha sido desarrollada, en cinco módulos y siete fases:

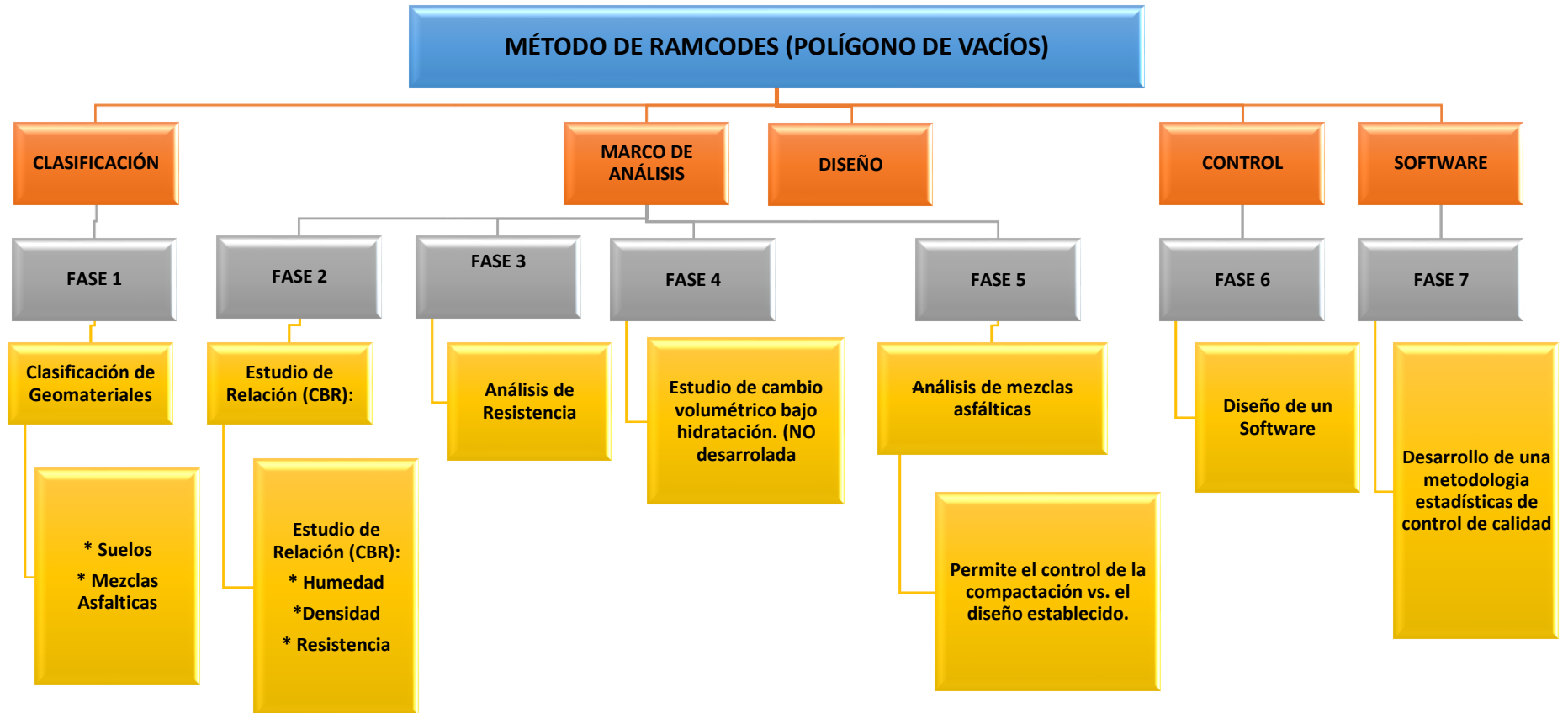


Ilustración 3.1.1: Fases Método Ramcodes

Fuente: (Sánchez-Leal et al., 2002)

La presente tesis abarca únicamente el análisis teórico de la fase cinco de RAMCODES.

La fase cinco de RAMCODES está dedicada al análisis de mezclas asfálticas, comparando entre el control de compactación y el análisis de diseño; para su desarrollo, F.J. Sánchez-Leal se basó en un experimento factorial de dos niveles o factores, que son:

- El contenido de asfalto (%CA), y
- El peso específico bulk ( $G_{mb}$ ).

La selección de ambos parámetros se da debido a que como geomaterial, RAMCODES, puede considerar que la conducta de la resistencia y deformabilidad de una mezcla asfáltica puede ser ilustrada bajo la concepción de Coulomb, cohesión y fricción; el  $G_{mb}$  permite medir la fricción o trabazón entre partículas; y el %CA mide la cohesión. Además estas variables son utilizadas con frecuencia en el diseño y control de mezclas asfálticas (Jhonny Javier Pincay Bermello et al., 2018).

La metodología RAMCODES en mezclas asfálticas enlaza las especificaciones de diseño principalmente de vacíos (VFA, vacíos rellenos de asfalto; VAM, porcentaje de vacíos en el agregado mineral;  $V_a$ , vacíos en la mezcla compactada, % del volumen total) con los criterios de control en campo.

Los vacíos son función del %CA, contenido de asfalto y  $G_{mb}$ , gravedad específica bruta de la mezcla asfáltica compactada del peso específico bulk y se representan estos datos en un mapa con isolíneas para los valores de especificación, la intersección que se forma entre líneas produce una construcción gráfica en el espacio. La construcción de la gráfica %CA - $G_{mb}$ , da lugar a una figura geométrica llamada “polígono de vacíos” (Jhonny Javier Pincay Bermello et al., 2018).

Las fórmulas utilizadas por RAMCODES para el trazado de las isolíneas se indican a continuación:

**1) Isolíneas de vacíos ( $V_a$ )**, sirve para determinar el  $G_{mb}$  en función del  $V_a$  de las especificaciones de diseño y del %CA, interviene adicionalmente el  $G_b$  y el  $G_{se}$  (Jhonny Javier Pincay Bermello et al., 2018).

$$\text{ECUACIÓN: } G_{mb} = \frac{1 - \frac{V_a}{100}}{\frac{\%CA}{100} + \frac{1 - \frac{\%CA}{100}}{G_{se}}} \quad (\text{Jhonny Javier Pincay Bermello et al., 2018})$$

Ecuación 3.1.1: Gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada

Donde:  $G_{mb}$  = peso específico bulk

$V_a$  = vacíos en la mezcla compactada, % del volumen total

**2) Isolíneas de vacíos en el agregado mineral (VAM)**, sirve para encontrar el  $G_{mb}$  en función del VAM de las especificaciones de diseño y del %CA, interviene también el  $G_{sb}$  (Jhonny Javier Pincay Bermello et al., 2018).

$$\text{ECUACIÓN: } G_{mb} = \left( \frac{1 - \frac{VAM}{100}}{1 - \frac{\%CA}{100}} \right) * G_{sb} \quad (\text{Jhonny Javier Pincay Bermello et al.,}$$

2018)

Ecuación 3.1.2: Gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada

Donde:  $G_{mb}$  = peso específico bulk

VAM = porcentaje de vacíos en el agregado mineral

**3) Isolíneas de vacíos llenados con asfalto (VFA)**, se utiliza para determinar el  $G_{mb}$  en función del VFA de las especificaciones de diseño y del %CA, intervienen adicionalmente el  $G_b$ ,  $G_{se}$  y el  $G_{sb}$ . (Jhonny Javier Pincay Bermello et al., 2018)

$$\text{ECUACIÓN: } G_{mb} = \frac{\frac{VFA}{100}}{\frac{\%CA}{100} + \frac{1 - \frac{\%CA}{100}}{G_{se}} - \left(1 - \frac{VFA}{100}\right) * \left(\frac{1 - \frac{\%CA}{100}}{G_{sb}}\right)} \quad (\text{Jhonny Javier Pincay}$$

Bermello et al., 2018).

Ecuación 3.1.3: Gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada

Donde:

%CA = porcentaje de cemento asfáltico con respecto a la mezcla total

Va = porcentaje de vacíos de aire

VAM = vacíos de aire en el agregado mineral

VFA = vacíos de aire llenos de asfalto, %  $G_{mb}$

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

$G_{sb}$  = gravedad específica total de la combinación de agregados

$G_{se}$  = gravedad específica efectiva de la combinación de agregados

$G_b$  = gravedad específica del asfalto

Los siguientes parámetros y expresiones, posibilitan la obtención y se describe a continuación:

#### **Gravedad específica bruta del agregado, $G_{sb}$**

ECUACIÓN: 
$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_N}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_N}{G_N}}$$
 (Jhonny Javier Pincay Bermello et al.,

2018)

Ecuación 3.1.4: Gravedad específica bruta del agregado en estudio

Donde:

$G_{sb}$  = gravedad específica bruta de la combinación de agregados

$P_1, P_2, P_N$  = porcentajes individuales de las masas de la combinación de agregados

$G_1, G_2, G_N$  = gravedad específica bruta de las fracciones de agregados individuales

Gravedad.

#### **Gravedad específica aparente, $G_{sa}$**

Esta gravedad representa la relación **medida** a una misma temperatura, entre la masa en el aire de un volumen unitario de agregado y la masa de igual volumen de agua; incluye únicamente el volumen del sólido del agregado, de acuerdo a la normativa por ASTM C 127 o ASTM C 128 (Jhonny Javier Pincay Bermello et al., 2018).

Se considera las fracciones separadas de agregados que conforman la mezcla final, cada una con sus distintas gravedades específicas, se obtiene con la misma expresión para obtener el  $G_{sb}$ , obviamente utilizando las gravedades específicas aparentes de cada componente (Jhonny Javier Pincay Bermello et al., 2018).

**Gravedad específica efectiva del agregado,  $G_{se}$**

ECUACIÓN: 
$$G_{se} = \frac{P_{mm} - CA}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} - \frac{CA}{G_b}} \text{ (Jhonny Javier Pincay Bermello et al., 2018).}$$

Ecuación 3.1.5: Gravedad específica efectiva del agregado

Donde:

$G_{se}$  = gravedad específica efectiva del agregado

$G_{mm}$  = gravedad específica teórica máxima

$P_{mm}$  = porcentaje del peso de la mezcla total suelta = 100

$G_b$  = gravedad específica del asfalto

CA = contenido de asfalto con respecto a la masa

**Gravedad específica máxima de las mezclas del agregado del método,  $G_{mm}$**

ECUACIÓN: 
$$G_{mm} = \frac{P_{mm}}{\frac{P_s}{G_{se}} + \frac{CA}{G_b}} \text{ (Jhonny Javier Pincay Bermello et al., 2018)}$$

Ecuación 3.1.6: Gravedad específica máxima de las mezclas del agregado

Donde:

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

$P_{mm}$  = porcentaje del peso de la mezcla total suelta = 100

$G_{se}$  = gravedad específica efectiva del agregado

$G_b$  = gravedad específica del asfalto

CA = contenido de asfalto con respecto a la masa

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

### **Asfalto absorbido, $P_{ba}$**

**ECUACIÓN:**  $P_{ba} = 100 * \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{se} * G_{sb}} * G_b$  (Jhonny Javier Pincay Bermello et al., 2018).

Ecuación 3.1.7: Asfalto absorbido

Donde:

$P_{ba}$  = asfalto absorbido, % por masa de agregado

$G_{sb}$  = gravedad específica bruta de la combinación de agregados

$G_{se}$  = gravedad específica efectiva de la combinación de agregados

$G_b$  = gravedad específica del asfalto

### **Contenido de asfalto efectivo en la mezcla, $P_{be}$**

**ECUACIÓN:**  $P_{be} = CA - \frac{P_{ba}}{100} * P_s$  (Jhonny Javier Pincay Bermello et al., 2018)

Ecuación 3.1.8: Contenido de asfalto efectivo en la mezcla

Donde:

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

$P_{ba}$  = asfalto absorbido, % por masa de agregado

CA = contenido de asfalto con respecto a la masa

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

Porcentaje.

### **Porcentaje de vacíos en el agregado mineral de la mezcla, VAM**

ECUACIÓN:  $VAM = 100 - \frac{G_{mb} * P_s}{G_{sb}}$  (Jhonny Javier Pincay Bermello et al., 2018).

Ecuación 3.1.9: Porcentaje de vacíos en el agregado mineral de la mezcla

Donde:

VAM = vacíos en el agregado mineral (% del volumen aparente)

$G_{sb}$  = gravedad específica bruta de la combinación de agregados.

$P_s$  = contenido del agregado, % del total de la masa de la mezcla.

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

### **Porcentaje de vacíos de aire en la mezcla compactada, Va**

ECUACION:  $V_a = 100 * \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}}$  (Jhonny Javier Pincay Bermello et al., 2018).

Ecuación 3.1.10: Porcentaje de vacíos de aire en la mezcla compactada

Donde:

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

$G_{mm}$  = gravedad específica teórica máxima

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

### **Porcentaje de vacíos rellenos de asfalto de la mezcla compactada, VFA**

ECUACIÓN:  $VFA = \frac{VAM - V_a}{VAM} * 100$  (Jhonny Javier Pincay Bermello et al., 2018)

Ecuación 3.1.11: Porcentaje de vacíos rellenos de asfalto de la mezcla compactada

Donde:

VFA = vacíos rellenos de asfalto, porcentaje del VAM

VAM = porcentajes de vacíos en el agregado mineral

Va = vacíos en la mezcla compactada, % del volumen total

**Porcentaje de polvo (relación filler-asfalto), DP**

$$\text{ECUACIÓN: } DP = \frac{P_{0.075}}{P_{be}} \text{ (Jhonny Javier Pincay Bermello et al., 2018)}$$

Ecuación 3.1.12: Porcentaje de polvo (relación filler-asfalto)

Donde:

DP = proporción de polvo de la mezcla asfáltica

$P_{0.075}$  = porcentaje del material que pasa la malla 200 (0.075mm)

$P_{be}$  = porcentaje de asfalto efectivo del total de la mezcla.

### **3.1.6. ELABORACIÓN DEL POLÍGONO DE VACÍOS.**

Para la elaboración del polígono de vacíos, se deberá realizar los siguientes pasos que da la norma

**Paso 1.-** Definir las especificaciones de Vacíos

Va, (Cero, Mínimo y Máximo) – VAM (Mínimo) y VFA (Mínimo y Máximo), no especifica un límite superior en el VAM, sin embargo, muchos autores estudiosos de este método consideran evitar valores muy altos si se desea que la mezcla presente resistencia a deformación permanente (Garnica Amguas et al., 2005).

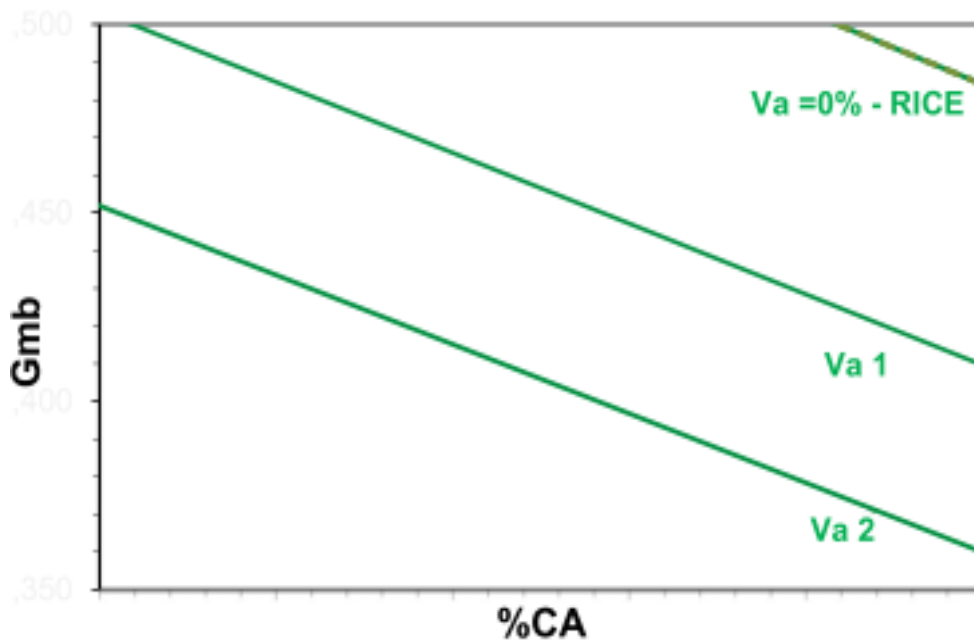
Al seguir las recomendaciones de varios autores se tomó un máximo de 2 puntos adicionales al mínimo, como rango del VAM.(Jhonny Javier Pincay Bermello et al., 2018)

**Paso 2.-** Trazado de las isolíneas de vacíos de aire ( $V_a$ )

Se determina en este análisis un rango teórico de %CA a emplear en el cálculo, los valores de densidades  $G_b$  y  $G_{se}$  son datos característicos de los materiales utilizados y  $V_a$ ,

depende de las especificaciones definidas en el paso 1 (Jhonny Javier Pincay Bermello et al., 2018).

Se determina que para cada valor de %CA definido y de vacío especificado se calcular el Gmb. La siguiente gráfica en el espacio %CA-Gmb, indica a las tres isolíneas de vacíos de aire, como se muestra en el gráfico 3.1.1 (Jhonny Javier Pincay Bermello et al., 2018)



*GRÁFICO 3.1.1: ISOLÍNEAS DE VACÍOS DE AIRE VA*  
*FUENTES(Jhonny Javier Pincay Bermello et al., 2018)*

**Paso 3.-** Trazado de las isolíneas de vacíos en el agregado mineral (VAM)

Siguiendo las especificaciones se toma el mismo rango de %CA definido en el paso 2, con el rango de VAM definido y Gb conocido, se procede a calcular el Gmb (Jhonny Javier Pincay Bermello et al., 2018).

El gráfico en el espacio %CA-Gmb, representa y da lugar a las dos isolíneas de vacíos en el agregado mineral, como se muestra en el gráfico 3.1.2 (Jhonny Javier Pincay Bermello et al., 2018)

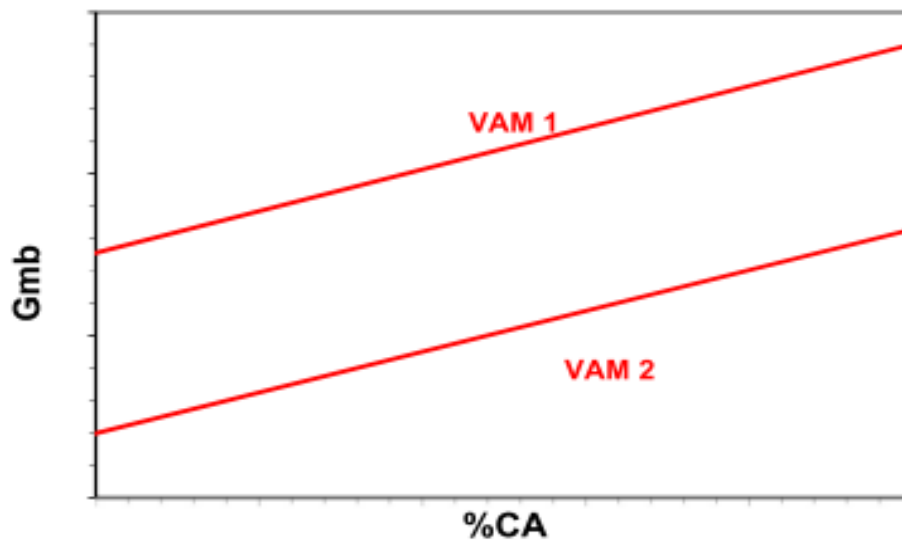


GRÁFICO 3.1.2: ISOLÍNEAS DE VACÍOS EN EL AGREGADO MINERAL (VAM)  
 FUENTE:(Jhonny Javier Pincay Bermello et al., 2018)

**Paso 4.-** Determinación del trazado de las isolíneas de vacíos llenados con asfalto (VFA)

Siguiendo con los pasos se utiliza para el mismo rango de %CA definido en el paso 2, con el rango de VFA definido en el paso 1 y Gb, Gsb y Gse conocidos, se procede a calcular el Gmb aplicando la ecuación 3.1.3. La representación gráfica en el espacio %CA-Gmb, da lugar a las dos isolíneas de vacíos llenados con asfalto, como se muestra en el gráfico 3.1.3 (Jhonny Javier Pincay Bermello et al., 2018).

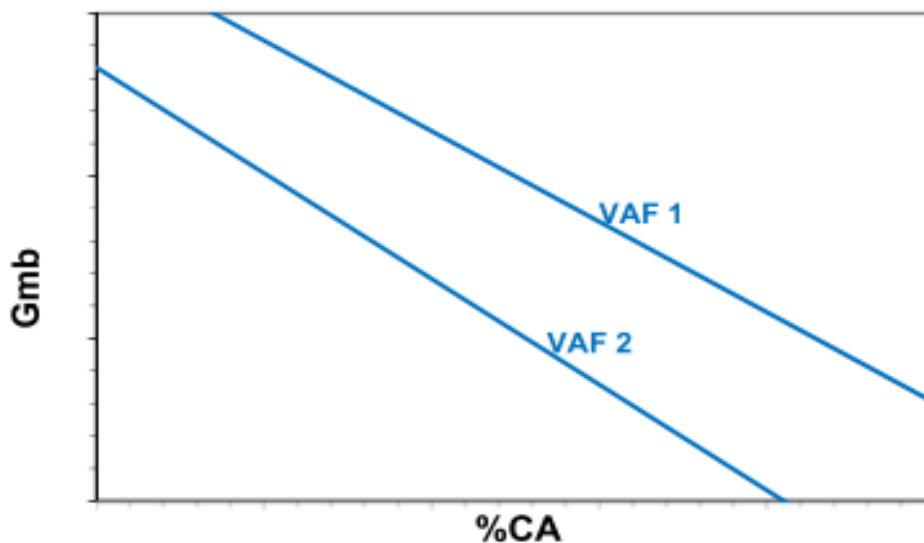
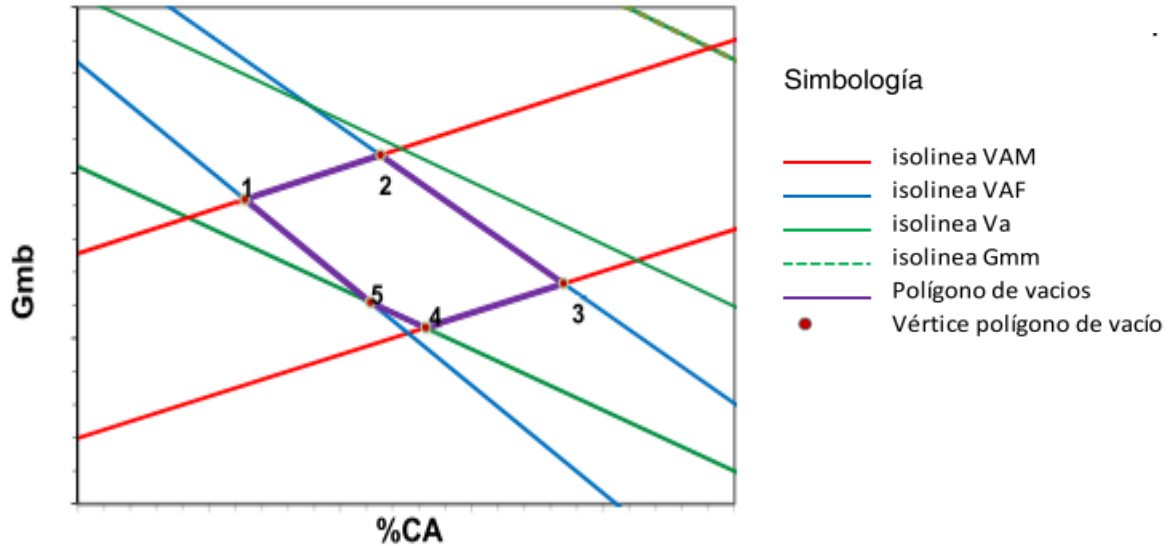


GRÁFICO 3.1.3: ISOLÍNEAS DE VACÍOS LLENADOS CON ASFALTO (VFA)  
 FUENTE:(Jhonny Javier Pincay Bermello et al., 2018)

**Paso 5.-** Finalmente el trazado del polígono de vacíos por el Método de Ramcodes

La superposición de todos los mapas de respuesta devuelve una visión de la variación de las propiedades mecánicas dentro de un área que se debe cumplir las especificaciones de vacíos, lo que da lugar al polígono de vacíos, como se muestra en el gráfico 3.1.4



*GRAFICO 3.1.4: POLÍGONO DE VACÍOS RAMCODES*

*FUENTE:(Jhonny Javier Pincay Bermello et al., 2018)*

RAMCODES propone la implementación del polígono de vacíos obtenido mediante la conformación de la intersección de las isólineas ya antes mencionadas y que define el área donde se cumplen todas las especificaciones de vacíos; a sabiendas de lo anterior el autor de esta metodología determina el punto central del polígono de vacíos como el valor del porcentaje óptimo de asfalto y su correspondiente densidad bulk; es imprescindible entonces determinar las coordenadas de cada punto que lo conforma. Estas varían en función de cada uno de los parámetros ya antes mencionados. (Jhonny Javier Pincay Bermello et al., 2018)

El autor del polígono de vacíos también resuelve el problema con la creación de una hoja de cálculo programada, en la que intervienen las ecuaciones para calcular  $G_{mb}$ ,  $\%CA_{opt}$ ,  $V_a$ ,  $G_{mm}$ , VAM, VFA.

Conocidas las coordenadas del polígono de vacíos, se obtiene el centroide que básicamente es correspondiente al valor promedio de los porcentajes de asfalto y de los pesos específicos bulk de cada vértice. Para determinarlos se emplean las ecuaciones 13 y 14 respectivamente (Jhonny Javier Pincay Bermello et al., 2018).

ECUACIÓN:  $\%CA_{opt} = \sum_{i=1}^n \frac{(\%CA)_i}{n}$  (Jhonny Javier Pincay Bermello et al., 2018)

Ecuación 3.1.13: Porcentaje de cemento asfáltico óptimo

ECUACIÓN:  $G_{mb} = \sum_{i=1}^n \frac{(G_{mb})_i}{n}$  (Jhonny Javier Pincay Bermello et al., 2018)

Ecuación 3.1.14: Gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada

Donde:

$(\%CA)_i$  = Porcentaje de asfalto de cada vértice

$(G_{mb})_i$  =Peso específico bulk de la muestra de cada vértice, y “n”, es el número de vértices

Para la Determinación del  $\%Ca_{opt}$  y su correspondiente  $G_{mb}$  se debe calcular los parámetros  $V_a$ ,  $VAM$  y  $VFA$  finales de diseño mediante las ecuaciones respectivas, dadas por RAMCODES.

ECUACIÓN:  $V_a = 100 - \left[ \left( \frac{G_{mb}}{G_{mm}} \right) * 100 \right]$  (Jhonny Javier Pincay Bermello et al., 2018)

Ecuación 3.1.15: Determinación del porcentaje de vacíos de aire para el porcentaje óptimo de asfalto de la mezcla, %

ECUACIÓN  $G_{mm} = \frac{100}{\frac{100 - \%CA_{opt}}{G_{se}} + \frac{\%CA_{opt}}{G_b}}$ : (Jhonny Javier Pincay Bermello et al., 2018)

Ecuación 3.1.16: Gravedad específica teórica máxima

ECUACIÓN:  $VAM = 100 - \frac{G_{mb} * (100 - \%CA_{opt})}{G_{sb}}$  (Jhonny Javier Pincay Bermello et al., 2018)

Ecuación 3.1.17: Vacíos de aire en el agregado mineral de diseño

ECUACIÓN:  $VFA = \left( \frac{VAM - V_a}{VAM} \right) * 100$  (Jhonny Javier Pincay Bermello et al., 2018)

Ecuación 3.1.18: Vacíos de aire llenos de asfalto de diseño, %

Donde:

$\%CA_{opt}$  = Porcentaje de cemento asfáltico óptimo

$V_a$  = porcentaje de vacíos de aire para el porcentaje óptimo de asfalto de la mezcla

VAM = vacíos de aire en el agregado mineral de diseño

VFA = vacíos de aire llenos de asfalto de diseño

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

$G_{sb}$  = gravedad específica total de la combinación de agregados

$G_{se}$  = gravedad específica efectiva de la combinación de agregados

$G_b$  = gravedad específica del asfalto

Todo este proceso se simplifica utilizando herramientas tecnológicas como el ejemplo Excel, se puede utilizar un proceso se simplifica, basta únicamente basta determinar las especificaciones de vacíos de diseño y las gravedades de cada uno de los materiales que intervienen  $G_b$ ,  $G_{se}$  y  $G_{sb}$  para calcular el porcentaje óptimo de asfalto (Jhonny Javier Pincay Bermello et al., 2018).

La metodología convencional de diseño de geomateriales se fundamenta en experimentos de variación de un solo factor obteniéndose diseños sobre dimensionados o bien subdimensionados, para ambos casos lleva a la pérdida de recursos. Por otra parte, en materiales como las mezclas asfálticas se ha comprobado que los criterios de diseño están separados de los criterios de control. Muchas falencias presentan como por ejemplo en suelos compactados, el erróneo paradigma de mayor densidad, mayor resistencia ha penetrado tanto que los ingenieros no se preocupan más por la resistencia del suelo, sino por su densidad (SANCHEZ LEAL, 2009).

### **3.1.7 Aplicación de la metodología RAMCODES**

La metodología de RAMCODES basa su técnica en la estadística de análisis (experimento factorial) que toma como estudio la influencia de dos factores ( $G_{mb}$  y  $\%CA$ ) en el comportamiento de la mezcla asfáltica. Este planteamiento, que utiliza la metodología resulta de gran beneficio en las acciones de control de calidad para la mezcla asfáltica compactada (Anguas et al., 2005).

### **3.1.8 PROCEDIMIENTO DE APLICACIÓN DEL POLÍGONO DE VACÍOS AL DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE.**

A continuación, trataremos acerca de la aplicación de la herramienta de análisis llamada “polígono de vacíos” para el diseño y análisis de mezclas asfálticas en caliente, que puede ser aplicado a mezcla de granulometría continua y discontinua. El polígono de vacíos produce un contenido de asfalto considerado óptimo tentativo, basado únicamente en las especificaciones de vacíos y sus definiciones, y se puede traducir en importantes ahorros en el tiempo de respuesta del diseño de mezcla asfáltica en laboratorio (Sánchez-leal, 2018).

#### **3.1.8.1 Polígono de Vacíos**

El polígono de vacíos, trata de una construcción gráfica realizada en el espacio contenido de asfalto ( $P_b$ ) versus la densidad de la mezcla asfáltica ( $G_{mb}$ ) que representa el área más grande donde se cumplen todas las especificaciones de vacíos requeridos como vacíos de aire, vacíos en el agregado mineral, y vacíos llenados con asfalto. La coordenada que está en sentido horizontal del centroide de esta área es el contenido de asfalto óptimo tentativo. Este polígono se lo traza a partir de la intersección de las diferentes curvas de vacíos halladas, que se grafican con las funciones correspondientes a cada definición de vacíos, valoradas de manera respectiva, en cada uno de las estimaciones especificadas ( $V_a=3\%$ ,  $V_{AM}=13\%$ ,...). Para realizar la aplicación del polígono de vacíos se puede usar una hoja de cálculo en MS Excel que fue creada por RAMCODES, con el propósito de hacer un análisis mucho más rápido usando herramientas tecnológicas (Sánchez-leal, 2018).

En el procedimiento de diseño a nivel de volumetría con el polígono de vacíos es necesario la determinación de las siguientes gravedades específicas de la combinación de agregado pétreo de la fórmula de trabajo como: gravedad específica bulk ( $G_{sb}$ ), gravedad específica aparente ( $G_{sa}$ ), y gravedad específica efectiva ( $G_{se}$ ), todos estos datos se obtienen en ensayo de densidad máxima teórica con el cemento asfáltico escogido, cuya densidad relativa es  $G_b$ , además es necesario conocer los rangos de las especificaciones de vacíos (Sánchez-leal, 2018).

Por ejemplo,  $V_a$ : 3-5 %,  $VFA$ : 65 (mín.)-75(máx.) %, y  $VMA$ : 13(mín.)-16(máx.)%.

En este procedimiento de diseño volumétrico con el polígono de vacíos, se detalla como obtiene un contenido óptimo de asfalto tentativo con la hoja de cálculo, se emplean los datos de gravedades específicas del agregado y rangos de las especificaciones de vacíos. Como siguiente paso, se elaboran tres pastillas (especímenes) hermanas con ese contenido de asfalto, siendo compactadas con la misma energía y método, según el requerimiento del diseño, y registrando en cada una el  $G_{mb}$  obtenido tras la compactación. Si los valores promedio de propiedades de vacíos  $V_a$  (Vacíos en la mezcla compactada, % del volumen total), VMA (porcentaje de vacíos en el agregado mineral) y VFA (vacíos rellenos de asfalto), se encuentran dentro de las especificaciones, entonces la mezcla del agregado pétreo elegida cumple con el análisis volumétrico. En caso contrario, es preciso probar con una nueva mezcla de agregado pétreo. Nótese que por cada intento es necesario solo tres especímenes, en vez de los 12, 16 o 15 especímenes que se utilizan en los procedimientos de diseño de Protocolo AMAAC, Superpave o Marshall, y que se necesitan para llegar a la misma conclusión que con el polígono de vacíos (Sánchez-leal, 2018).

En el procedimiento de revisión o análisis que se basa en un diseño de mezclas, obteniendo múltiples resultados de ensayos de control sobre la producción que se realiza diariamente, con simples tronzados se puede obtener el polígono de vacíos con la hoja de cálculo, los datos de gravedades específicas y especificaciones de vacíos, y hacer la comparación de los valores de contenido óptimo de asfalto y densidad ( $G_{mb}$ ) de diseño con el polígono de vacíos (Sánchez-leal, 2018).

A continuación, se presenta un ejemplo práctico de cómo se obtiene el polígono de vacíos

Ejemplo 3.1.1: Mezcla de granulometría densa (Sánchez-leal, 2018).

Obra: Rincón de Romos — Ciénega Grande, 0+000 a 8+300 (TS-001)

Fecha: 10/12/11

Gravedades específicas

$G_{sa}$	2.766
$G_{sb}$	2.553
$G_{se}$	2.675
$G_b$	1.035

## Granulometría

Tamiz		%Pas.
U. S.	(mm)	
1 ”	25	100
3/4 “	19	98.5
1/2 “	12.5	76.5
3/8 “	9.5	57.5
N° 4	4.75	50.0
N° 8	2.36	37.0
N° 16	1.18	22.0
N° 30	0.600	12.5
N° 50	0.300	10.5
N° 100	0.150	6.5
N° 200	0.075	4.5

## Especificaciones de Vacíos

Definición	Rango mín.	Rango Máx.
Va	3%	5 %
VAM	12 %*	14 %
VFA	65 %	75 %

Según el análisis, cuando se traza el polígono de vacíos en mezclas densas, se utiliza un valor mínimo de VAM igual al correspondiente al especificado para  $V_a=3\%$  (que en el presente caso es  $VAM = 12\%$ ). Para la obtención del valor máximo del rango, se le suma entre 2 y 3 % al valor mínimo. En este caso se obtiene, el valor máximo es  $12 + 2 = 14\%$ . Teniendo en cuenta casos en los que el valor del contenido óptimo de asfalto resultante del polígono de vacíos se encontrará muy bajo, por ejemplo, menor que

4.5%, entonces es conveniente sumarle 3% en vez de 2% al valor mínimo para así obtener el valor máximo del rango de VAM (Sánchez-leal, 2018).

Paso 1: Se verifica las gravedades específicas.

En el caso de no llegar a cumplir el objetivo, habrá que revisar los ensayos y/o repetirlos.

$$G_{sa} > G_{se} > G_{sb}$$

$$2.766 > 2.675 > 2.553 \text{ Ok.}$$

Paso 2: Se obtiene el rango de contenido de asfalto óptimo según la relación Filler- betún (DP).

Este paso es muy práctico y útil para obtener el rango en el que puede variar el contenido óptimo de asfalto (Sánchez-leal, 2018).

La relación filler-betun (DP), representada por la ecuación siguiente:

$$DP = \frac{P_{0.075}}{6e}$$

Se establece la siguiente ecuación, realizando las transformaciones necesarias:

$$A = \frac{\frac{P_{0.075}}{DP} + P_{ba}}{1 + \frac{P_{ba}}{100}}$$

Donde:

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

Se utilizaron ecuaciones para determinar cuáles serían los valores límites de Pb (contenido de asfalto), además cumpliendo el rango de valores de DP establecidos en la norma, que este caso es de:

DP: 0.8 a 1.2

La tabla siguiente se resumen los resultados

DP	Pb (%)
0.8	7.3
1.2	5.5

De tal manera que el contenido de asfalto óptimo debe estar en el rango 5.5 a 7.3%.

se realiza el empleo en el siguiente paso la técnica de polígono de vacíos

GRAVEDADES ESPECIFICAS	
Gb, Gravedad específica del asfalto	1.035
Gsb, Gravedad específica bruta de la combinación de agregados	2.553
Gse, Gravedad específica efectiva de la combinación de agregados	2.675

ESPECIFICACION DE VACIOS		
	Min	Max
Va, porcentaje de vacíos de aire para el porcentaje óptimo de asfalto de la mezcla, %	3	5
VFA, vacíos de aire llenos de asfalto de diseño, %	65	75
VAM, vacíos de aire en el agregado mineral de diseño	12	14

Paso N°4: en este paso se elabora tres especímenes hermanos con igual energía y método de compactación, mezclando con el contenido de asfalto óptimo del polígono de vacíos. Determinación de  $G_{mb}$  promedio y para finalmente graficar el polígono de vacíos.

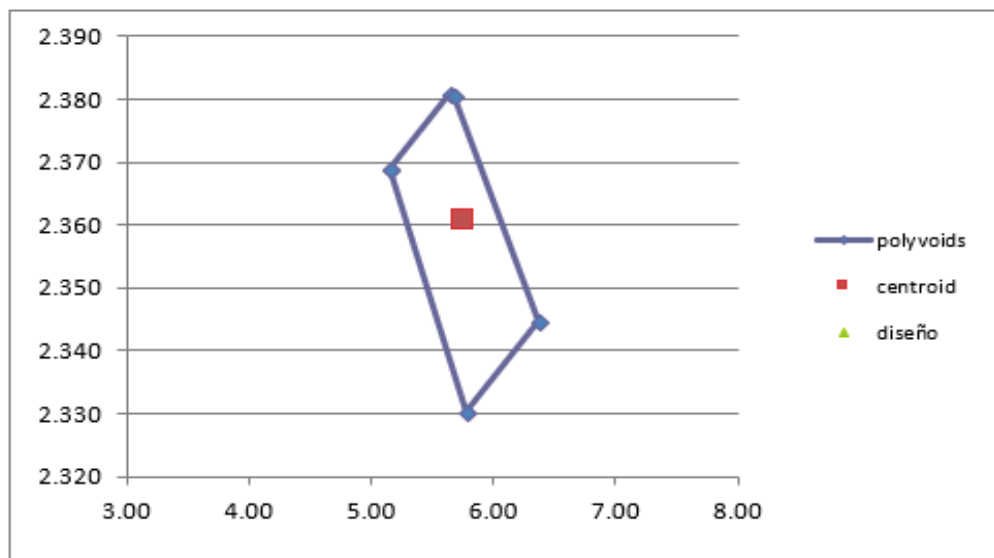
Se realizaron tres especímenes con  $P_b=5.7\%$ . Con un promedio de  $G_{mb}$  de los mismos resultantes de 2.347. Al realizar la representación de este punto (diseño, triángulo verde) en el gráfico, se notó que este se encuentra dentro del polígono de vacíos, y también manteniéndose dentro del rango de  $P_b$  dado por la relación filler-betun (DP), lo que podemos llegar a la conclusión que al realizar esta verificación que esta combinación de agregados si cumple con el diseño volumétrico.(Sánchez-leal, 2018)

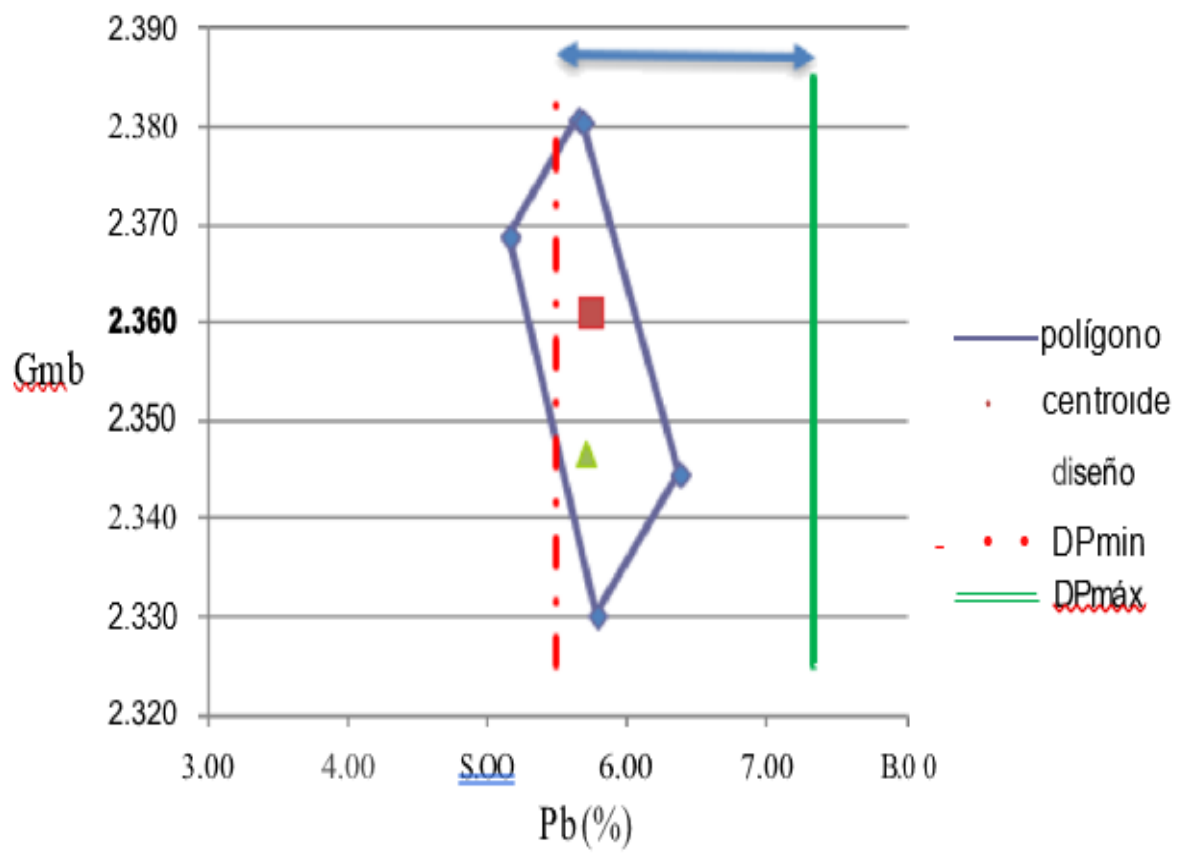
Puntos	Pb (%)	Gmb
5	5.16	2.369
2	5.64	2.381
9	5.67	2.381
7	6.37	2.345
8	5.78	2.330
5	5.16	2.369
0	_____	_____

Centroide

n	5.000
Pb	5.73
Gmb	2.361

GRÁFICO





### **3.2 METODO SUPERPAVE**

En 1987, el Programa de Investigación de Carreteras Estratégicas fue establecido por el Congreso de los Estados Unidos con un presupuesto de 150 millones de dólares en programas de investigación, con el propósito de mejorar el desempeño y duración de las carreteras convirtiéndolas más seguras tanto para automovilistas como para los trabajadores de estas (Jhonny Javier Pincay Bermello et al., 2018).

Las tres cuartas partes de este presupuesto se empleó en el desarrollo de especificaciones de desempeños basados en asfalto, directamente con análisis de laboratorio y con aplicaciones en campo (Jhonny Javier Pincay Bermello et al., 2018).

Este programa tuvo como fin desarrollar un nuevo sistema para especificar materiales asfálticos, el producto final del programa es un nuevo e innovador sistema llamado Superpave (Superior Performing Asphalt Pavement, Pavimento de Asfalto de rendimiento Superior). Representa una tecnología que permita especificar el cemento asfáltico y mineral agregado; desarrollar diseños de mezclas asfálticas; analizar y obtener predicciones del desempeño del pavimento (Jhonny Javier Pincay Bermello et al., 2018).

El sistema Superpave reúne la caracterización de materiales asfálticos basada en el rendimiento con las condiciones ambientales de diseño para mejorar el rendimiento mediante el control de la formación de surcos, el agrietamiento a baja temperatura y el agrietamiento por fatiga. Los tres componentes principales de Superpave son la especificación del aglutinante de asfalto, el diseño de mezcla y el sistema de análisis y un sistema de software de computadora.

Un diseño de mezcla Superpave implica seleccionar asfalto y materiales agregados que cumplan con las especificaciones de Superpave y luego realizar un análisis volumétrico de muestras de HMA compactadas con el compactador giratorio Superpave.

## Proceso de Diseño METODO SUPERPAVE



*Ilustración 3.2.1 Esquema de procedimiento de diseño de mezcla Superpave*

*Fuente: (CAPITULO 3 Desarrollo Del Método de Diseño Superpave, 2020)*

### **3.2.1 Pruebas al agregado mineral**

Las propiedades del agregado mineral son sumamente importantes para el buen desempeño de mezclas asfálticas. El concepto de agregados está directamente integrado en el procedimiento Superpave. Se determinó que hay dos tipos de propiedades de agregados se especifican en el sistema Superpave y son: propiedades de consenso y propiedades de origen (Anguas et al., 2005).

el agregado debe proporcionar suficiente resistencia al corte para resistir aplicaciones de carga repetidas. Para tomar en cuenta cuando se sobrecarga una masa de agregado, se desarrolla un plano de corte y las partículas de agregado se deslizan o se cortan entre sí.

Los agregados cúbicos de textura rugosa proporcionan más resistencia que los agregados redondeados de textura suave, cuando se aplica una carga, el agregado también tiende a ser más fuerte porque el esfuerzo de carga mantiene el agregado más apretado y aumenta la resistencia al corte. Aunque una pieza cúbica y una pieza redondeada de agregado pueden poseer la misma resistencia inherente, las partículas de agregados cúbicos tienden a unirse, lo que da como resultado una masa de material más fuerte. Las partículas de agregado redondeadas tienden a deslizarse unas a otras. La fricción interna proporciona la capacidad del agregado para entrelazarse y crear una masa que es casi tan fuerte como las piezas individuales. Para asegurar una mezcla de agregado fuerte para HMA, generalmente se especifican las propiedades de los agregados.

El HMA debe ser internamente fuerte y resistente al esfuerzo de compresión y cortante para evitar la deformación permanente dentro de la mezcla.

El material también debe tener suficiente resistencia a la tracción para resistir el esfuerzo de tracción en el inicio de la grieta de la base, por lo tanto, el agrietamiento por fatiga después de muchas aplicaciones de carga. La mezcla de asfalto también debe resistir el estrés impartido por temperaturas que disminuyen rápidamente y temperaturas extremadamente frías.

Los tipos principales de deterioro del pavimento asfáltico y que se deben evitar son:

- deformación permanente,
- agrietamiento por fatiga y
- agrietamiento por baja temperatura.

las mejores formas de superar el agrietamiento por fatiga son:

1. Tener en cuenta adecuadamente el número de cargas pesadas durante el diseño.
2. Utilice pavimentos más gruesos.
3. Mantenga seca la subrasante.
4. Utilice materiales de pavimento que no estén excesivamente debilitados por la humedad.
5. Utilice HMA que sea lo suficientemente resistente para soportar deflexiones normales.
6. La selección de materiales resilientes, puede abordarse estrictamente mediante la selección de materiales y el diseño de mezcla.

En el sistema Superpave se especifican dos tipos de propiedades de agregados: propiedades de consenso y propiedades de origen

#### **3.2.1.1 Propiedades de consenso**

Las propiedades de consenso son aquellas que los investigadores de SHRP creían que eran críticas para lograr HMA de alto rendimiento. Estas propiedades deben cumplirse en varios niveles según el volumen de tráfico y la posición dentro del pavimento. Los altos niveles de tráfico y las mezclas de superficies (es decir, la posición del pavimento poco profundo) requieren valores más estrictos para las propiedades de consenso

Se ha determinado que las propiedades de consenso del Superpave son angularidad del agregado grueso, angularidad del agregado fino (partículas alargadas y aplanadas) y equivalente de arena.

Propiedades de la fuente de origen, teniendo en cuenta de donde se obtienen los agregados, se podrían usar como un control de aceptación (Anguas et al., 2005).

Las propiedades que se consideraron para el estudio fueron las siguientes: la tenacidad mediante la prueba de desgaste de Los Ángeles; la durabilidad basándose en la prueba de intemperismo acelerado;

Muchas agencias ya utilizan estas propiedades como requisitos de calidad para los áridos utilizados en HMA. Las propiedades de consenso identificadas en Superpave son:

- Angularidad agregada gruesa
- Angularidad agregada fina
- Partículas planas y alargadas
- Contenido de arcilla

Al especificar la angularidad agregada gruesa y fina, Superpave busca lograr HMA con un alto grado de fricción interna y, por lo tanto, alta resistencia al corte para la resistencia a la formación de surcos. Limitar las piezas alargadas asegura que el HMA no será tan susceptible a la rotura de agregados durante la manipulación y construcción y bajo tráfico. Limitar la cantidad de arcilla mejora la unión adhesiva entre el aglutinante de asfalto y el agregado.

Como primera etapa de las pruebas realizadas en el asfalto original figuran la transportación, el almacenamiento y manejo (Anguas et al., 2005).

La segunda etapa se basa en la simulación de las especificaciones mediante el envejecimiento del asfalto en el Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO), representando al asfalto durante la producción, mezcla y construcción (Anguas et al., 2005).

La tercera etapa se desarrolla cuando envejece el cemento asfáltico desde que se coloca en la mezcla asfáltica, y carpeta asfáltica, hasta el fin de su vida de diseño para la cual fue planificado. En esta etapa se realiza la simulación en la vasija de envejecimiento a presión (PAV), obteniéndolo mediante la exposición de muestras de asfalto a calor y presión, para obtener el envejecimiento del pavimento con el transcurso de los años de servicio (Anguas et al., 2005).

### **3.2.1.2 Propiedades de la fuente de Origen**

Las propiedades de la fuente son aquellas que las agencias utilizan a menudo para calificar las fuentes locales de agregado. Si bien estas propiedades son importantes, los valores críticos no se especifican en la especificación Superpave ya que son específicos de la fuente. Las propiedades de la fuente identificadas en Superpave son: A Dureza A Solidez A Materiales perjudiciales

En la Tabla 3.2.1 se pueden observar las pruebas utilizadas en el Superpave y el propósito de las mismas.

Equipo	Propósito
Horno rotatorio de película delgada (RTFO) Vasija de envejecimiento a presión (PAV)	Simula las características del envejecimiento del asfalto
Reómetro de corte dinámico (DSR)	Mide las propiedades del asfalto a temperaturas altas e intermedias
Viscosímetro rotacional (RV)	Mide las propiedades del asfalto a altas temperaturas
Reómetro de viga en flexión (BBR) Ensaye de tensión directa (DTT)	Mide las propiedades del asfalto a bajas temperaturas.

*Tabla 3.2.1 Propósito de las pruebas de asfaltos Superpave Equipo*  
*FUENTE(Anguas et al., 2005)*

### **3.2.3 Pruebas a las mezclas asfálticas**

Los requerimientos del diseño de mezclas asfálticas por el Método Superpave se basa en los requerimientos volumétricos de la mezcla (Anguas et al., 2005).

Los requerimientos volumétricos de la mezcla se fundamentan en la obtención de todo tipo de vacíos que tenga la mezcla y esta son: vacíos de aire; vacíos del agregado mineral y vacíos llenos de asfalto. Una propiedad importante que se utiliza como base para la selección del contenido del cemento asfáltico es la obtención del contenido de vacíos de aire (Anguas et al., 2005).

La suma del volumen de vacíos de aire y del asfalto efectivo en una muestra compactada en el Método Superpave define los vacíos que tiene el agregado mineral (VAM), representando a los vacíos entre las partículas del agregado (Anguas et al., 2005).

Los vacíos llenos de asfalto (VFA) son el porcentaje de VAM que contiene cemento asfáltico. Por consiguiente, VFA es el volumen de cemento asfáltico efectivo, refiriéndose como el porcentaje de VAM (Anguas et al., 2005).

Otro de los requerimientos de una mezcla es la determinación de la proporción de polvo; se calcula como la relación del porcentaje en peso del agregado más fino que el tamiz 0.075 mm y el contenido de asfalto efectivo en porcentaje de peso total en la mezcla, menos el porcentaje de asfalto absorbido (Anguas et al., 2005).

### **3.2.4 Susceptibilidad a la humedad**

la Norma AASHTO T-283, es la que se utiliza para determinar La sustentabilidad a la humedad. Este ensayo de susceptibilidad a la humedad evalúa una HMA, es la resistencia de mezclas bituminosas compactadas al daño provocado por humedad. Con este ensayo alcanzamos dos propósitos; primero, identificar si una combinación de cemento asfáltico y agregado es susceptible a la acción del agua; segundo, mide la efectividad de los aditivos antidesprendimiento o el mejoramiento de la adherencia (Anguas et al., 2005).

### **3.2.5 Desarrollo del Método de Diseño Asfáltico Superpave**

El sistema de diseño de mezcla Superpave integra la selección de materiales y el diseño de mezcla en procedimientos basados en el clima del proyecto y el tráfico de diseño.

Diferentes métodos de diseño de mezclas asfálticas se han utilizado para establecer un diseño óptimo en el laboratorio correlacionado con el comportamiento de las mezclas en campo. En Estados Unidos el Superpave (*CAPITULO 3 Desarrollo Del Método de Diseño Superpave*, 2020)

Las propiedades volumétricas adecuadas en la carpeta asfáltica terminada son de gran importancia cuando se realiza la práctica del diseño de mezclas asfálticas, dependiendo esto en gran medida el desempeño de la superficie de rodamiento en su vida de servicio. Al realizar la simulación adecuada en el laboratorio de la densificación es muy importante y al determinar que ocurre en campo bajo la acción vehicular, y de esta forma llegar a fórmulas de trabajo que permitan dosificar mezclas que exhiban un mejor comportamiento en condiciones específicas de tránsito y clima (*CAPITULO 3 Desarrollo Del Método de Diseño Superpave*, 2020)

Un correcto diseño de mezcla asfáltica va a depender principalmente de la selección de los materiales y de las propiedades volumétricas de la mezcla compactada. Mostrándose así a continuación en las siguientes ilustraciones 3 y 4, como la mezcla asfáltica compacta tiene básicamente tres componentes agregados, asfalto y aire (*CAPITULO 3 Desarrollo Del Método de Diseño Superpave*, 2020).

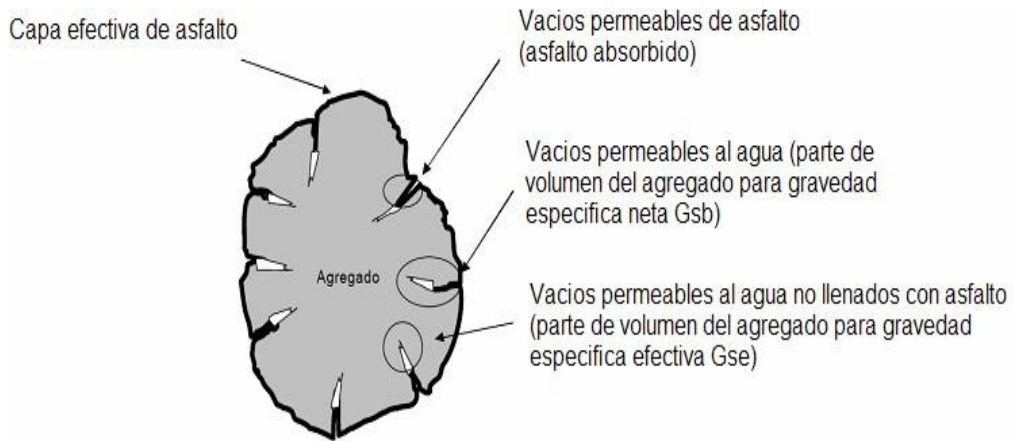


Ilustración 3.2.2: Parámetros de diseño volumétrico

Fuente:(CAPITULO 3 Desarrollo Del Método de Diseño Superpave, 2020)

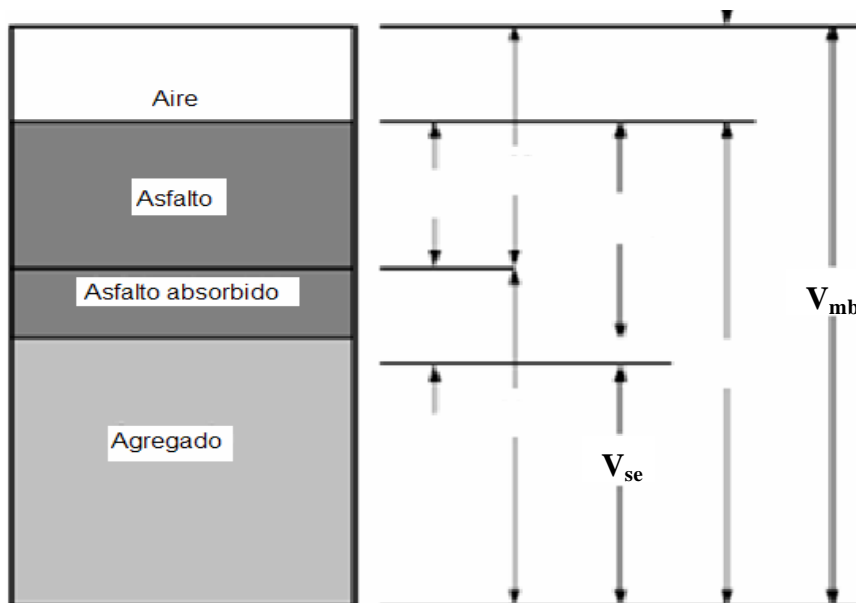


Ilustración 3.2.3: Diagrama de los componentes de una mezcla asfáltica compactada

Fuente:(CAPITULO 3 Desarrollo Del Método de Diseño Superpave, 2020)

Donde:

$V_{ma}$  = volumen de vacíos en agregado mineral

$V_{mb}$  = volumen total de la mezcla asfáltica

$V_{mm}$  = volumen de la mezcla asfáltica sin vacíos

$V_{fa}$  = volumen de vacíos llenados con asfalto

$V_a$  = volumen de vacíos de aire  $V_b$  = volumen de asfalto

$V_{ba}$  = volumen de asfalto absorbido

$V_{sb}$  = volumen de agregado mineral (gravedad específica de la masa)

$V_{se}$  = volumen de agregado mineral (gravedad efectiva).

### 3.2.6 Parámetros volumétricos

Los parámetros volumétricos que a continuación se definen son las fórmulas volumétricas fundamentales.

**Gravedad específica neta,  $G_{sb}$ .**— es la proporción de la masa al aire de una unidad de volumen de un material permeable que incluyen vacíos permeables e impermeables del material con una temperatura indicada, con respecto a una masa al aire de igual densidad de volumen igual al de agua destilada a una temperatura ya dada (*CAPITULO 3 Desarrollo Del Método de Diseño Superpave, 2020*).

$$\text{ECUACIÓN } G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_N}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_N}{G_N}} \quad (\text{CAPITULO 3 Desarrollo Del Método de}$$

*Diseño Superpave, 2020*)

Ecuación 3.2.1: Gravedad específica neta para el agregado total

Donde:

$G_{sb}$  = gravedad específica neta para el agregado total.

$P_1, P_2, P_n$  = porcentajes individuales por masa de agregado.

$G_1, G_2, G_n$  = gravedad específica neta individual del agregado

La gravedad específica neta del filler se puede decir que no es fácil de deducirla correctamente. De todos modos, si la gravedad específica aparente del filler es estimada, el error es usualmente insignificante (*CAPITULO 3 Desarrollo Del Método de Diseño Superpave, 2020*).

**Gravedad específica aparente,  $G_{sa}$ .**— La Proporción de la masa en aire de una unidad de volumen de un material impermeable a una temperatura ya dada, con respecto a una masa al aire de igual densidad de volumen igual al de agua destilada a una temperatura ya dada (*CAPITULO 3 Desarrollo Del Método de Diseño Superpave, 2020*).

ECUACIÓN: 
$$G_{se} = \frac{P_{mm} - P_b}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}}$$
 (CAPITULO 3 Desarrollo Del Método de Diseño Superpave, 2020)

Ecuación 3.2.2: gravedad específica efectiva del agregado

Donde:

$G_{se}$  = gravedad específica efectiva del agregado

$G_{mm}$  = gravedad específica teórica máxima (ASTM D 2041/AASHTO T 209) de mezcla de pavimento (sin vacíos de aire)

$P_{mm}$  = porcentaje de masa del total de la mezcla suelta = 100

$P_b$  = contenido de asfalto con el cual ASTM D 2041/AASHTO T 209 desarrolló el ensayo; el porcentaje por el total de la masa de la mezcla

$G_b$  = gravedad específica del asfalto

**Vacíos en el agregado mineral, VAM.**– El Volumen del espacio vacío intergranular entre las partículas del agregado de una mezcla asfáltica compactada, que incluye los vacíos de aire y el contenido de asfalto efectivo, se expresa como un porcentaje del volumen total de la muestra (CAPITULO 3 Desarrollo Del Método de Diseño Superpave, 2020).

ECUACIÓN: 
$$VAM = 100 - \frac{G_{mb} * P_s}{G_{sb}}$$
 (CAPITULO 3 Desarrollo Del Método de Diseño Superpave, 2020).

Ecuación 3.2.3: Vacíos en el agregado mineral

Donde:

VAM = 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:

$$\text{ECUACIÓN: } \mathbf{VAM} = \mathbf{100} - \frac{\mathbf{G_{mb}}}{\mathbf{G_{sb}}} * \frac{\mathbf{100}}{\mathbf{100+P_b}} * \mathbf{100} \text{ (CAPITULO 3 Desarrollo}$$

*Del Método de Diseño Superpave, 2020)*

Ecuación 3.2.4: Vacíos en el agregado mineral

Donde:

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

**Contenido de asfalto efectivo,  $P_{be}$ .**– El Contenido de asfalto total de una mezcla asfáltica, sin la proporción de asfalto absorbido en las partículas del agregado (*CAPITULO 3 Desarrollo Del Método de Diseño Superpave, 2020*).

**Vacíos de aire,  $V_a$ .**– El volumen total de una minúscula bolsa de aire entre las partículas cubiertas del agregado en una mezcla de pavimento compactado, se expresa como el porcentaje del volumen neto de la mezcla del pavimento compactado (*CAPITULO 3 Desarrollo Del Método de Diseño Superpave, 2020*).

$$\text{ECUACIÓN: } \mathbf{V_a} = \mathbf{100} * \frac{\mathbf{G_{mm}-G_{mb}}}{\mathbf{G_{mm}}} \text{ (CAPITULO 3 Desarrollo Del Método de}$$

*Diseño Superpave, 2020)*

Ecuación 3.2.5: Vacíos de aire en la mezcla compactada, porcentaje del volumen total

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 llenados con asfalto (VFA)** .- Es la porción del porcentaje del volumen de espacio vacío intergranular entre las partículas del agregado, siendo ocupado por el asfalto efectivo. Expresándose como la porción de  $(VAM - V_a)$  entre VAM (*CAPITULO 3 Desarrollo Del Método de Diseño Superpave*, 2020).

El procedimiento de diseño de mezcla, obtiene los valores de VAM para las mezclas de pavimento en términos de la gravedad específica neta de los agregados, Gsb (*CAPITULO 3 Desarrollo Del Método de Diseño Superpave*, 2020).

$$\text{ECUACIÓN: } \mathbf{VFA} = \left( \frac{\mathbf{VAM} - \mathbf{V_a}}{\mathbf{VAM}} \right) * \mathbf{100}$$

Ecuación 3.2.6: Vacíos llenados con asfalto, porcentaje de VAM

Donde:

VFA = vacíos llenados con asfalto, porcentaje de VAM

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

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

**Gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica** - En el diseño de una mezcla asfáltica para un agregado dado, se requiere de la gravedad específica máxima,  $G_{mm}$ , para cada uno del contenido de asfalto con el fin de obtener el porcentaje de vacíos de aire para cada contenido de asfalto. Entretanto que la gravedad específica máxima puede determinarse para cada contenido de asfalto mediante ASTM D 2041/ASSHTO T 209; la precisión del ensayo es mayor cuando la mezcla está cerca del contenido de asfalto de diseño. Igualmente, es preferible calcular la gravedad específica máxima por duplicado o triplicado (*CAPITULO 3 Desarrollo Del Método de Diseño Superpave*, 2020).

Posteriormente de obtener la gravedad específica efectiva del agregado para cada gravedad específica máxima determinada y promediando los resultados del Gse, la gravedad específica máxima para un distinto contenido de asfalto permite obtenerse con la siguiente ecuación, suponiendo que la gravedad específica efectiva del agregado es constante. validando que la absorción del asfalto no varía apreciablemente con los cambios en el contenido de asfalto (*CAPITULO 3 Desarrollo Del Método de Diseño Superpave*, 2020).

ECUACIÓN: 
$$G_{mm} = \frac{P_{mm}}{\frac{P_s}{G_{se}} + \frac{P_b}{G_b}} \text{ (CAPITULO 3 Desarrollo Del Método de Diseño$$

*Superpave, 2020)* Ecuación 3.2.7: Gravedad específica teórica máxima de la mezcla del pavimento (sin vacíos de aire)

Donde:

$G_{mm}$  = gravedad específica teórica máxima de la mezcla del pavimento (sin vacíos de aire)

$P_{mm}$  = porcentaje de la masa del total de la mezcla suelta = 100

$P_s$  = contenido de agregado, porcentaje del total de la masa de la mezcla  $P_b$  = contenido de asfalto, porcentaje del total de la masa de la mezcla  $G_{se}$  = gravedad específica efectiva del agregado

$G_b$  = gravedad específica del asfalto

**Absorción del asfalto** - La absorción se lo puede expresar como un porcentaje de la masa del agregado, más que como un porcentaje del total de la masa de la mezcla (*CAPITULO 3 Desarrollo Del Método de Diseño Superpave, 2020*).

La absorción del asfalto  $P_{ba}$  se determina mediante:

ECUACIÓN: 
$$P_{ba} = 100 * \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{se} * G_{sb}} * G_b \text{ (CAPITULO 3 Desarrollo Del Método de Diseño Superpave, 2020)}$$

Ecuación 3.2.8: Asfalto absorbido, porcentaje de la masa del agregado

Donde:

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

$G_{se}$  = gravedad específica efectiva del agregado

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

$G_b$  = gravedad específica del asfalto

### **Contenido de asfalto efectivo**

Se dice que el contenido de asfalto efectivo ( $P_{be}$ ), de una mezcla de pavimento es el volumen total de asfalto, sin la cantidad de asfalto perdido por absorción dentro de las partículas del agregado. Es la porción del contenido total de asfalto sabiendo que se va a quedar una capa en el exterior de la partícula del agregado y es el contenido de asfalto que gobierna el desempeño de una mezcla asfáltica. La fórmula es (Anguas et al., 2005):

$$\text{ECUACIÓN: } P_{be} = P_b * \left( \frac{P_{ba}}{100} * P_s \right)$$

Ecuación 3.2.9: Contenido de asfalto efectivo, porcentaje de la masa total de la mezcla

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

### **3.2.7 Descripción del experimento**

En esta sección se describe la metodología y desarrollo de la experimentación referenciando principalmente la caracterización de los materiales y ensayos mecánicos realizados a la mezcla asfáltica compactada (Anguas et al., 2005).

### **3.2.8 Selección de los materiales**

#### **Agregado mineral**

De acuerdo al siguiente ejemplo, se inicia describiendo el material pétreo que se utilizó para la elaboración de la mezcla asfáltica que proviene del banco de materiales “La Cañada”, ubicado en la ciudad de Querétaro, y consta básicamente de roca basáltica triturada; las pruebas al agregado se realizaron de acuerdo con los requerimientos establecidos por la metodología Superpave. En la Tabla 3 se muestra el resumen de los resultados (Anguas et al., 2005).

Ensayos	Resultado	Especificación
De consenso		
Angularidad del agregado grueso (ASTM D5821)	100/100	100/100
Angularidad del agregado fino (ASTM C1252)	58	45 mín
Partículas planas y alargadas (ASTM D4791)	2%	10% máx
Equivalente de arena (ASTM D2419)	75%	50% mín
De origen		
Desgaste de los Ángeles (ASTM C131)	16%	35% máx
Intemperismo acelerado (ASTM C88)	7%	10% máx
Densidad aparente (Gsa)	2,869	-----
Densidad neta (Gsb)	2,725	-----

*Tabla 3.2.2: Pruebas al agregado mineral Ensayos*  
FUENTE(Anguas et al., 2005)

### **Dosificación de la mezcla de agregados**

Se utiliza tres agregados en esta mezcla, y al definir la estructura de diseño se determina calculando la granulometría de la mezcla por medio de combinaciones matemáticas de las granulometrías individuales de los materiales (Anguas et al., 2005).

Material	Porcentaje de aporte a la mezcla total
Grava (3/4-3/8)	30
Material para sello (3/8-No.4)	25
Arena de trituración ( Pasa No.4)	45
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>

*Tabla 3.2.3: Materiales constitutivos de la mezcla de agregados en %*  
FUENTE(Anguas et al., 2005)

la Norma ASTM C 702 rige el procedimiento a emplearte para la dosificación de mezcla de agregados. Durante el desarrollo de la experimentación se realizó una verificación periódica de la graduación de la mezcla de agregados a fin de detectar cualquier variación en la granulometría (Anguas et al., 2005).

En la fabricación de las probetas por el método Superpave de 150 mm de diámetro se emplearon aproximadamente 3000g de material pétreo, con alturas de las probetas de 75 ± 3 mm, y teniendo una altura de requerimiento para realizar el ensayo de susceptibilidad

a la deformación permanente en el Analizador de Pavimentos Asfálticos (Anguas et al., 2005).

El ejemplo que se está realizando también muestra un ensayo por el Método Marshal pero fabricación de las probetas Marshall de 100 mm de diámetro se utilizaron aproximadamente 1200g de material; la altura de estas probetas también resulta adecuada para el ensayo de deformación permanente (Anguas et al., 2005).

### Gradación

La curva granulométrica de la mezcla de agregados se presenta en el gráfico 3.2.1, donde se observa que cumple con los requerimientos de Superpave que es en calidad, graduación, tamaño máximo nominal (Anguas et al., 2005).

Se encuentra que los puntos de control corresponden al tamaño máximo nominal, para este caso de 19 mm, un tamaño intermedio de 2.36 mm, y un tamaño de polvo mineral (0.075 mm). También se determina una zona restringida, se ubica entre los tamaños 2.36 y 0.3 mm.

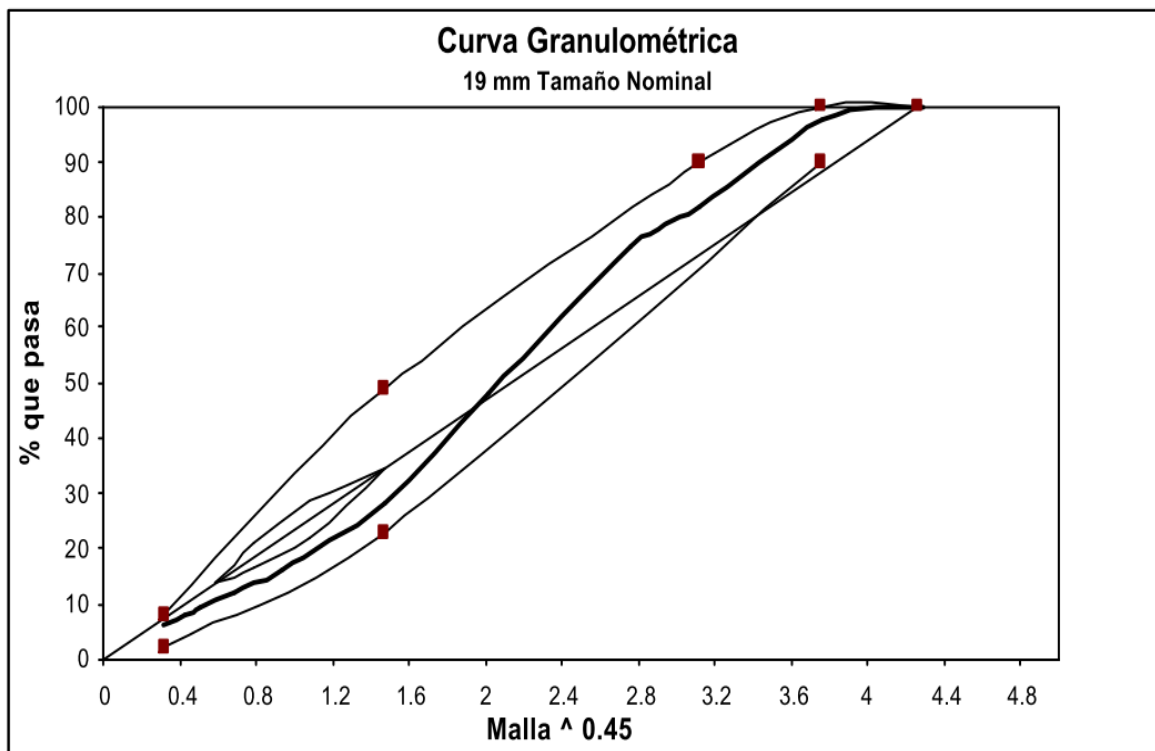


GRAFICO 3.2.1: Curva granulométrica de la mezcla de agregados  
FUENTE:(Anguas et al., 2005)

## **Ligante asfáltico**

La especificación del aglomerante de asfalto Superpave está destinada a mejorar el rendimiento al limitar el potencial del aglutinante de asfalto para contribuir a la deformación permanente, agrietamiento por baja temperatura y agrietamiento por fatiga en los pavimentos de asfalto.

Comportamiento del ligante de asfalto Tres características del aglutinante de asfalto son importantes en el rendimiento de la mezcla de asfalto: susceptibilidad a la temperatura, viscoelasticidad y envejecimiento

El asfalto que se utilizó en este ensayo es del tipo AC-20, procedente de la refinería de Salamanca, Guanajuato. las probetas elaboradas utilizaron este asfalto AC- 20 sin modificar, y modificado con SBS (Estireno Butadieno Estireno) al 3%. Teniendo como propósito caracterizar los tipos de ligante utilizados, se realizaron ensayos en el viscosímetro rotacional (RV) y el reómetro de corte dinámico (DSR) (Anguas et al., 2005).

En altas temperaturas en condiciones de calor el ligante asfáltico actúa como un líquido viscoso. La viscosidad es la característica física del material que se utiliza para describir la resistencia de los líquidos a fluir. La fuerza de resistencia o fricción entre estas capas está relacionada con la velocidad relativa a la que se deslizan entre sí. La capa superior intenta tirar de la capa inferior mientras que la capa inferior intenta retener la capa superior. La relación entre la fuerza de resistencia y la velocidad relativa puede ser muy diferente para diferentes líquidos.

El ligante asfáltico a bajas temperaturas en climas fríos se comporta como un sólido elástico. Los sólidos elásticos son como bandas de goma; cuando se cargan se deforman, y cuando se descargan, vuelven a su forma original. Si se tensiona más allá de la capacidad o resistencia del material, los sólidos elásticos pueden romperse. A bajas temperaturas, puede volverse excesivamente quebradizo y agrietarse cuando se carga en exceso. Por esta razón, el agrietamiento por baja temperatura a veces ocurre en el pavimento de asfalto durante el clima frío.

Cuando se calienta a una temperatura intermedia, el ligante asfáltico actúa como lubricante, lo que permite que el agregado se mezcle, recubra y compacte firmemente para formar una superficie lisa y densa. Después de enfriar, el asfalto actúa como

pegamento para mantener unido el agregado en una matriz sólida. En este estado terminado, el comportamiento del asfalto se denomina viscoelástico; tiene características tanto elásticas como viscosas, según la temperatura y la velocidad de carga.

Su comportamiento al envejecer debido a que los cementos asfálticos están compuestos de moléculas orgánicas, reacciona con el oxígeno del medio ambiente. Esta reacción se llama oxidación y cambia la estructura y composición de las moléculas de asfalto. La oxidación hace que el ligante asfáltico se vuelva más quebradizo, creando el término endurecimiento oxidativo o endurecimiento por envejecimiento. El endurecimiento oxidativo ocurre a un ritmo relativamente lento en un pavimento, aunque ocurre más rápido en climas más cálidos y durante las estaciones más cálidas. Debido a este endurecimiento, los pavimentos de asfalto viejos son más fáciles a agrietarse. Los pavimentos asfálticos mal compactados pueden presentar un endurecimiento oxidativo prematuro. En este caso, la compactación inadecuada deja un mayor porcentaje de huecos de aire interconectados, lo que permite que penetre más aire en la mezcla de asfalto, lo que conduce a un mayor endurecimiento por oxidación.

### **La especificación del ligante de asfalto Superpave y grados de desempeño (PG)**

El ligante asfáltico está destinado a mejorar el rendimiento al limitar el potencial del aglutinante de asfalto para contribuir a la deformación permanente, agrietamiento por baja temperatura y agrietamiento por fatiga en los pavimentos de asfalto.

Una distinción importante entre las especificaciones típicas de asfalto y la especificación Superpave es el formato general de los requisitos. Las propiedades físicas requeridas permanecen constantes para todos los grados de desempeño (PG). Sin embargo, las temperaturas a las que deben alcanzarse estas propiedades varían dependiendo del clima en el que se espera que se utilice el aglutinante. por ejemplo, la vista parcial del formato de especificación superpave que se muestra en el gráfico 3.2.2 muestra que un aglomerante de grado PG 52-40 está diseñado para soportar las condiciones de un ambiente donde la temperatura máxima promedio de siete días del pavimento es de 52 ° C y el pavimento mínimo La temperatura de diseño es de -40 ° C.

■ Superpave Classification System (USA, 1993)

Posibles grados PG de un material asfáltico						
46	52	58	64	70	76	82
-34	-10	-16	-10	-10	-10	-10
-40	-16	-22	-16	-16	-16	-16
-46	-22	-28	-22	-22	-22	-22
	-28	-34	-28	-28	-28	-28
	-34	-40	-34	-34	-34	-34
	-40		-40	-40		
	-46					

GRAFICO 3.2.2: clasificación ligante de asfalto Superpave

FUENTE: (Militar, 2021)

La especificación del ligante Superpave requiere un nuevo conjunto de equipos y procedimientos de prueba. Se denomina especificación "aglutinante" porque está destinada tanto al asfalto modificado como al no modificado. Una característica única de la especificación del ligante Superpave es que en lugar de realizar una prueba a una temperatura constante y variar el valor especificado, el valor especificado es constante y la temperatura de prueba a la que se debe alcanzar este valor varía. Como ejemplo, considere dos proyectos de construcción, uno en el Ecuador y otro en el Círculo Polar Ártico. Se espera un buen rendimiento del asfalto en ambos lugares, pero las condiciones de temperatura bajo las cuales se logra un buen rendimiento del aglomerante son muy diferentes. Los aglutinantes con clasificación de rendimiento (PG) se definen mediante un término como PG 64-22. El primer número, 64, es el grado de temperatura alta. Esto significa que el aglutinante posee propiedades físicas adecuadas hasta al menos 64 ° C. Esto correspondería a la alta temperatura del pavimento en el clima en el que se espera que sirva el ligante. Asimismo, el segundo número (-22) es el grado de baja temperatura y significa que el ligante posee propiedades físicas adecuadas en pavimentos hasta al menos -22 ° C. El tema central de la especificación del ligante Superpave es su dependencia de las pruebas de ligantes asfálticos en condiciones que simulan las tres etapas críticas durante la vida del ligante. Las pruebas realizadas sobre el asfalto original representan:

- La primera etapa de transporte, almacenamiento y manipulación.
- La segunda etapa representa el asfalto durante la producción y construcción de la mezcla, y se simula en la especificación envejeciendo el aglomerante en un horno de película delgada de laminación. Este procedimiento expone películas delgadas de aglutinante al calor y al aire y se aproxima a la exposición del asfalto durante las condiciones de mezclado, acarreo y tendido en caliente.
- La tercera etapa ocurre cuando el ligante envejece durante un largo período como parte de la capa de pavimento de asfalto de mezcla caliente. Esta etapa se simula en la especificación mediante el recipiente de envejecimiento a presión. Este procedimiento expone las muestras de ligante a condiciones de calor y presión que simulan años de envejecimiento en servicio en un pavimento.

### **Viscosímetro rotacional (RV)**

El viscosímetro rotacional (Fotografía 3.2.1) es utilizado para determinar las temperaturas de mezclado y compactación de la mezcla asfáltica en el laboratorio. También se determinan las viscosidades a distintas temperaturas, así pudiéndose construir la denominada carta de viscosidad en donde se seleccionan las temperaturas de mezclado y compactación correspondientes a los rangos de viscosidades (Anguas et al., 2005).

Se utiliza una prueba de viscosidad rotacional para determinar las características de flujo del aglutinante asfáltico para proporcionar cierta seguridad de que se puede bombear y manipular en la instalación de mezcla en caliente.

El viscosímetro rotacional calcula automáticamente la viscosidad a la temperatura de prueba, se determina midiendo el torque requerido para mantener una velocidad rotacional constante de un husillo cilíndrico mientras está sumergido una muestra de ligante de asfalto a una temperatura constante. Está directamente relacionado con la viscosidad del aglutinante, que se calcula automáticamente por el viscosímetro.



Fotografía 3.2.1: Viscosímetro rotacional  
Fuente:(Anguas et al., 2005)

Los criterios establecidos por Superpave permiten obtener los rangos de temperatura de mezclado y compactación para el asfalto AC-20 sin modificar, y modificado con SBS (Anguas et al., 2005).

la Metodología Superpave puede establecer un criterio para asegurar el fácil manejo y bombeo del asfalto en planta, determinando un valor de viscosidad a una cierta temperatura (Anguas et al., 2005).

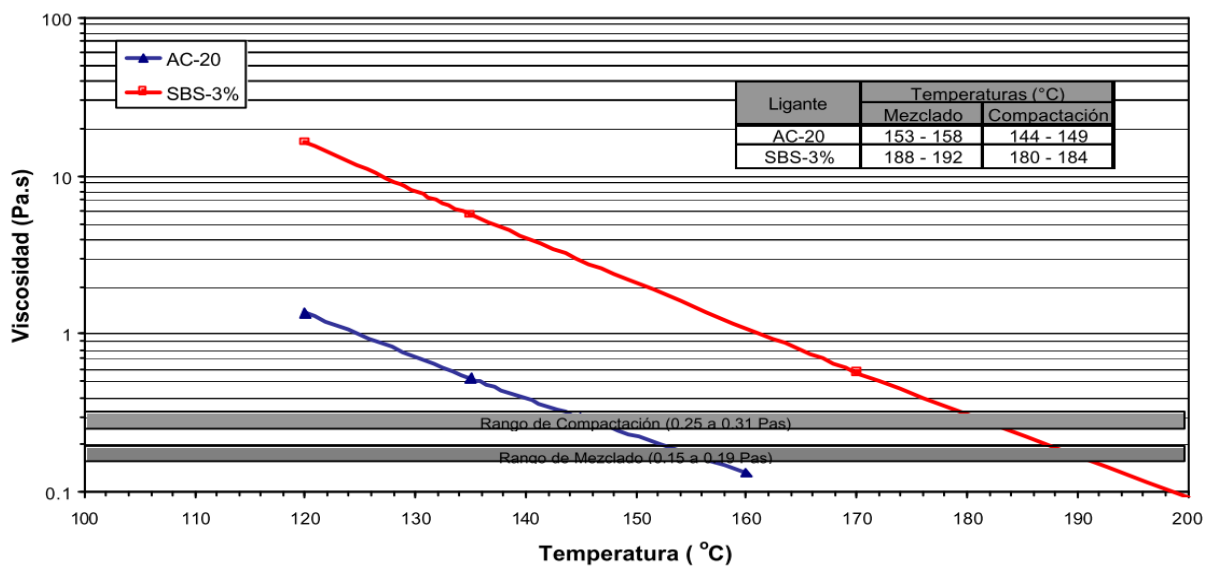


Gráfico 3.2.3: Carta de viscosidad  
Fuente:(Anguas et al., 2005)

### 3.2.9 Características de la mezcla asfáltica

#### Porcentajes de asfalto y niveles de compactación

Método de diseño	Contenidos de asfalto a utilizar
Superpave Nivel I	<ul style="list-style-type: none"><li>• Pbi -1.0%</li><li>• Pbi ± 0.5%</li><li>• Pbi + 1.0%</li></ul>

Tabla 3.2.4: Selección de los contenidos de asfalto  
Fuente (Anguas et al., 2005)

Al obtener los datos de la mezcla de agregados de diseño, que son la gravedad específica neta (Gsb); la gravedad específica aparente (Gsa); y el tamaño máximo nominal del agregado (Sn), se determina un porcentaje de asfalto inicial (Pbi); recomendado por Instituto del Asfalto de Norteamérica en su publicación referente al diseño de mezclas asfálticas en caliente, por el método Superpave (Anguas et al., 2005).

También se puede obtener las curvas de los parámetros mejor definidas que se analizan en el diseño volumétrico (Anguas et al., 2005).

Tipo de asfalto	Nivel de compactación (giros)	Contenido de asfalto (%)
AC-20 sin modificar	50	4.1
	100	4.6
AC-20 modificado con SBS al 3%	160	5.1
	160	5.6
	250	6.1

Tabla 3.2.5: Características de las probetas Superpave  
Fuente (Anguas et al., 2005)

### 3.2.10 Elaboración de la mezcla asfáltica

Cuando los materiales se acercan a la temperatura de mezclado, se dosifica el asfalto en peso con respecto a la mezcla total (Fotografía 3.2.2a) Posteriormente ya se puede cubrir el agregado pétreo, manteniendo la temperatura de mezclado dentro del rango especificado hasta que las partículas más gruesas se hayan cubierto totalmente (Fotografía 3.2.2b) (Anguas et al., 2005).



(a)



(b)

*Fotografía 3.2.2a: Elaboración de la mezcla asfáltica, se dosifica el asfalto en peso con respecto a la mezcla total*

*Fotografía 3.2.2b: Elaboración de la mezcla asfáltica, cubrimiento del agregado pétreo totalmente*

*Fuente:(Anguas et al., 2005)*

Al alcanzar la mezcla a la temperatura de compactación, se puede colocar dentro de los moldes donde va ser compactada. Los moldes deberán estar calientes, así como los demás accesorios que se utilicen en el vaciado y acomodo de la mezcla, con el fin de evitar una pérdida de temperatura de la mezcla asfáltica, previa a su compactación (Anguas et al., 2005).

### Compactación

Se utiliza el compactador giratorio para las probetas Superpave, para la compactación de la mezcla asfáltica en caliente, se basa en una compactación giratoria, es un dispositivo electrónico

La base gira a una velocidad constante de 30 revoluciones por minuto durante la compactación, con el molde posicionado en un ángulo de compactación de 1,25 grados. Con una presión 600 kPa, diámetro del molde 150 mm molde.

Se puede tener una medición del cambio de la altura con cada uno de los giros.

### Características de las probetas Superpave

Tipo de asfalto	Nivel de compactación (golpes/cara)	Contenido de asfalto (%)
AC-20	50	4.6
		5.1
	75	5.6
		6.1
	100	6.6

Tabla 3.2.6: Características de las probetas Superpave

Fuente (Anguas et al., 2005)



(a)



(b)

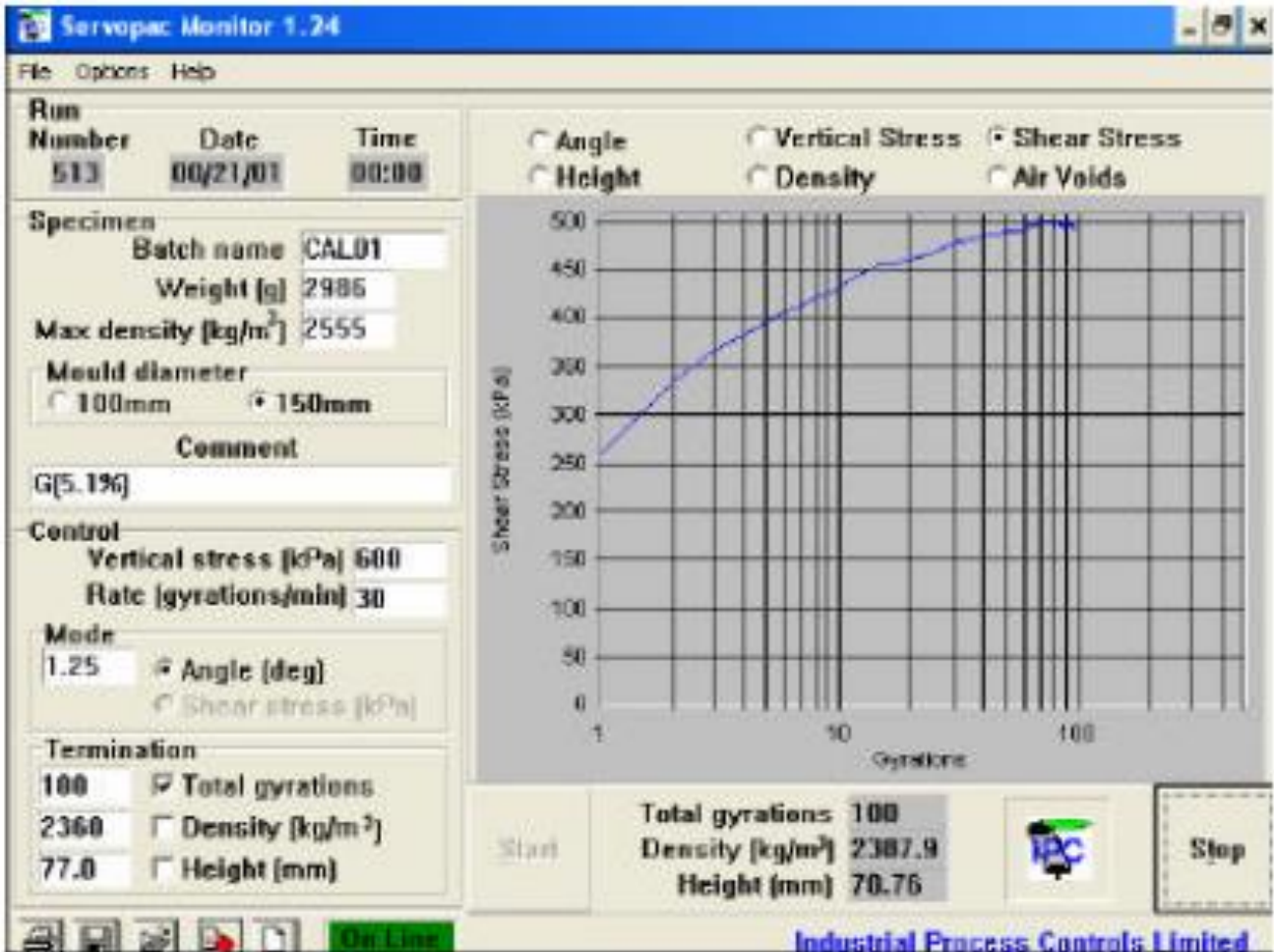
Fotografía 3.2.3a: Compactación de la mezcla asfáltica

Fotografía 3.2.3b: Compactación de la mezcla asfáltica

Fuente: (Anguas et al., 2005)

Una de las versatilidades del compactador giratorio son las mediciones de forma efectiva de los esfuerzos de corte durante el proceso de compactación (Anguas et al., 2005).

En la (Ilustración 3.2.4) se puede observar el desarrollo de los esfuerzos de corte, a medida que aumenta el número de giros, realizándolo en el compactador giratorio.



*Ilustración 3.2.4: Mediciones de los esfuerzos de corte en el compactador giratorio, ejemplo*

*Fuente:(Anguas et al., 2005)*

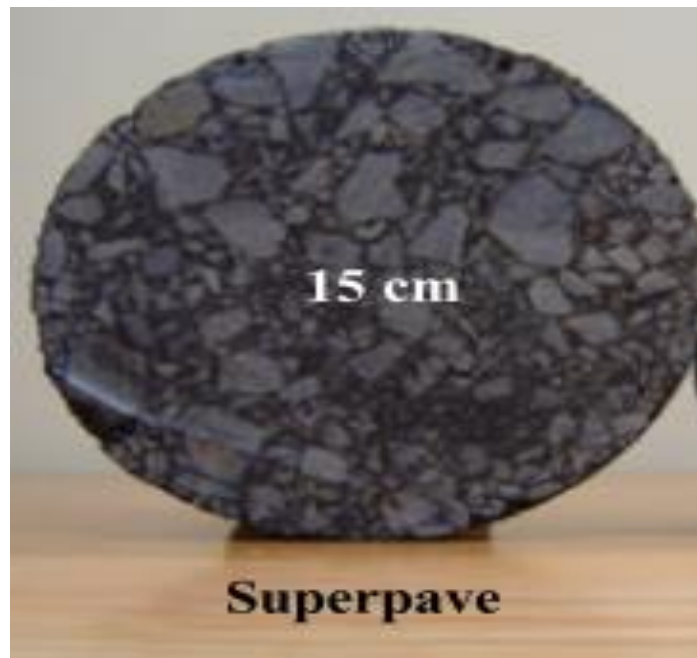
Al realizar un análisis comparativo a nivel volumétrico entre las dos metodologías, como referencia se escoge un nivel de tránsito de 10 millones de ejes equivalentes (ESALs). Los niveles de compactación para esta condición se representan en la Tabla 3.2.7 donde se observa que dichos niveles se encuentran dentro de los ya contemplados en el experimento.

Método	Energía de compactación
Superpave Nivel I	$N_{\text{diseño}} = 100$ giros

Tabla 3.2.7: Niveles de compactación de diseño para 10 millones de ESALs

Fuente (Anguas et al., 2005)

Se muestra el aspecto de las probetas fabricadas con cada Metodología Superpave



Fotografía 3.2.4: Probeta elaborada con la metodología la Superpave

Fuente:(Anguas et al., 2005)

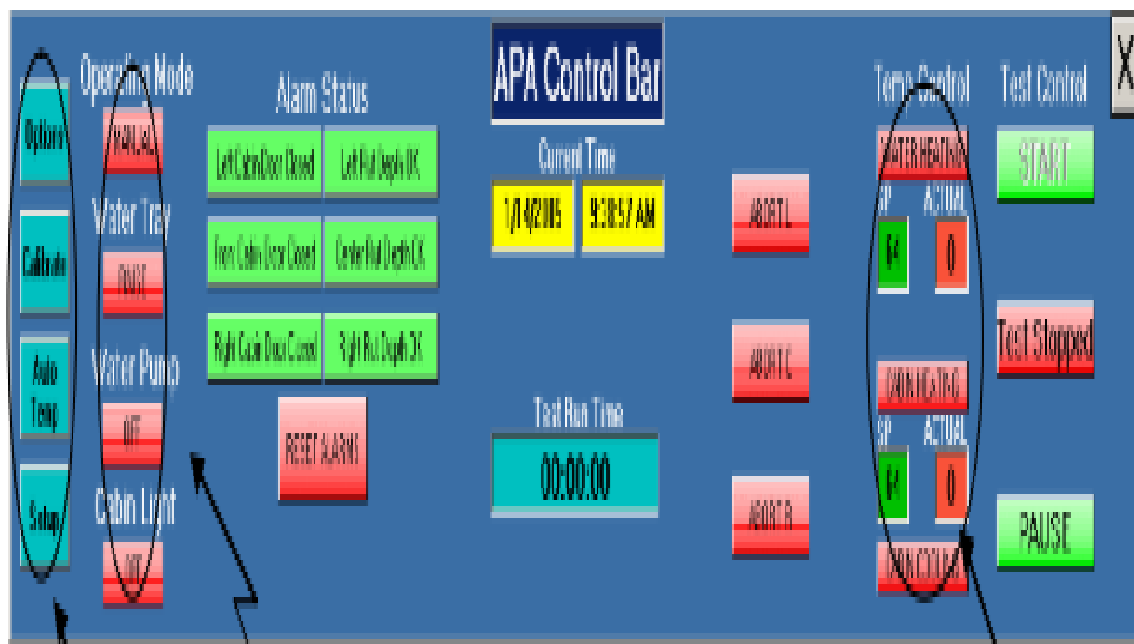
### Pruebas fundamentales a la mezcla asfáltica

- Gravedad específica neta ( $G_{mb}$ )
- Gravedad específica teórica máxima ( $G_{mm}$ )

### Susceptibilidad a la deformación permanente en el APA (Analizador de Pavimentos Asfálticos)

Para evaluar la susceptibilidad de la mezcla asfáltica a la deformación permanente, se obtienen mediante el ensayo de rueda cargada en el APA. El procedimiento de la prueba se describe a continuación (Anguas et al., 2005):

1. Las probetas serán colocadas en el horno a la temperatura de prueba (64oC) por un espacio de 6 h previo al dicho ensayo (Anguas et al., 2005).
2. Luego de ser sacada la probeta del horno. Con el equipo encendido, y desde el software de operación se ingresa la temperatura de prueba en el panel de control principal (Anguas et al., 2005).



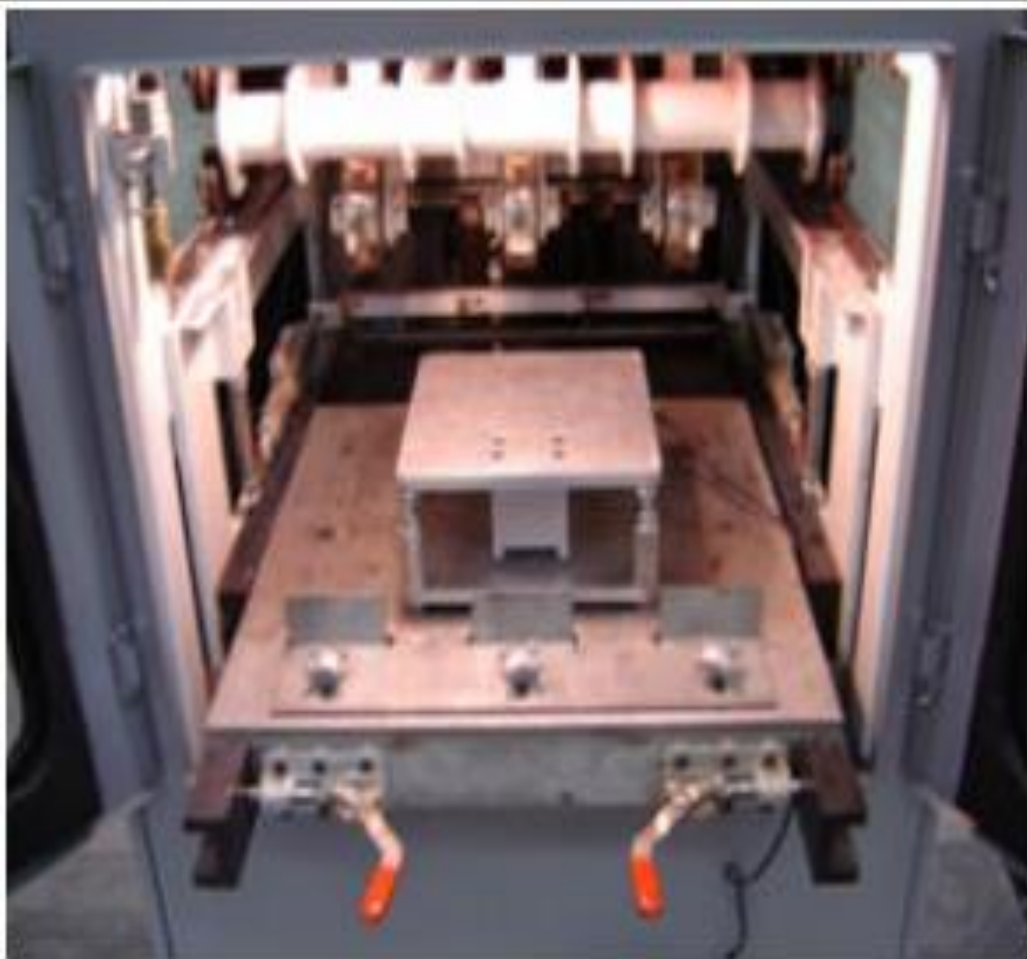
Control de  
operación

Menús  
adicionales

Control de  
temperatura

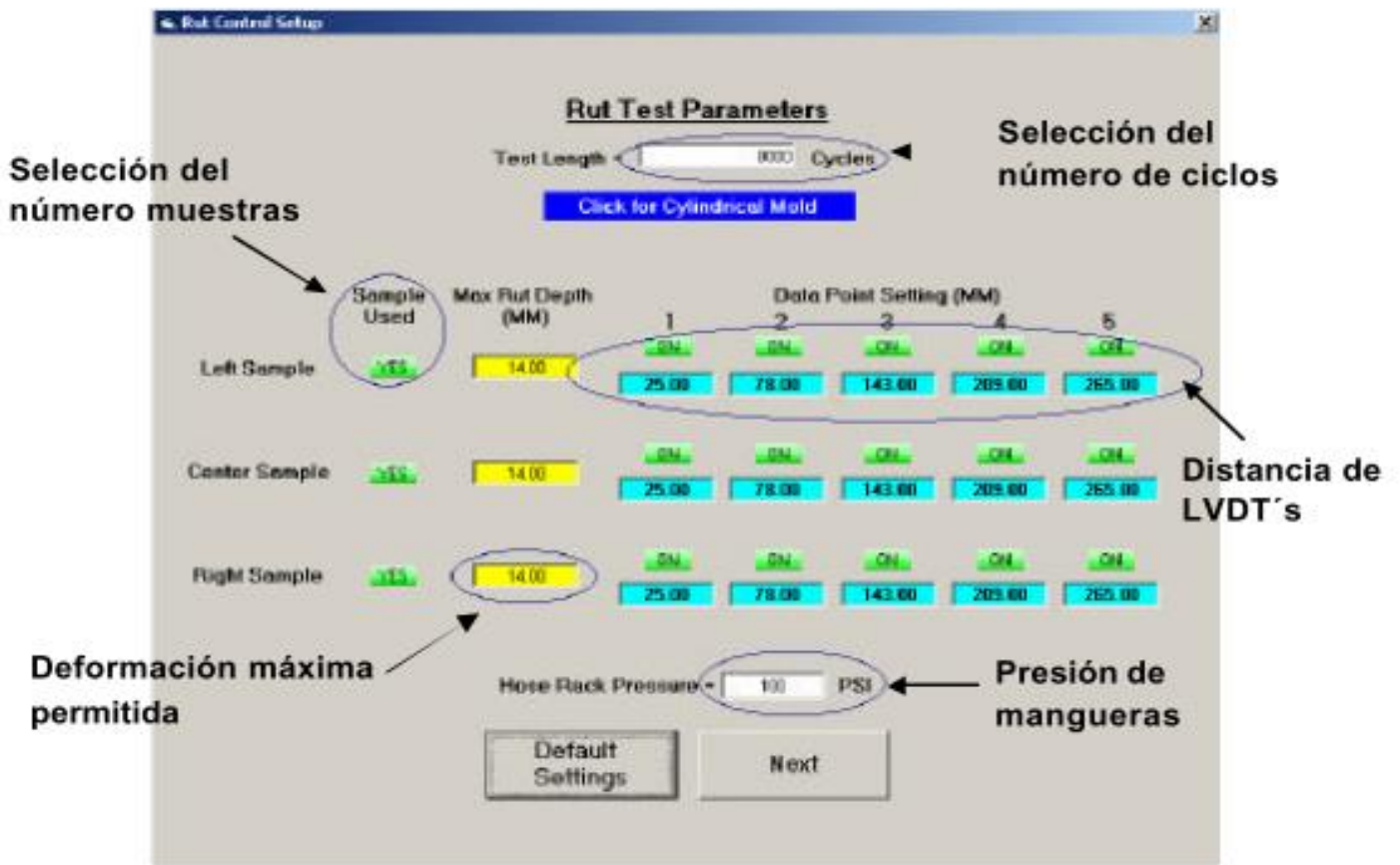
*Ilustración 3.2.5: Panel de control principal del APA, ejemplo fuente(Anguas et al., 2005)*

3. Primero se procede a la calibración de las ruedas del APA mediante una celda de carga Fotografía 3.2.5, a fin de asegurar que cada rueda aplique una fuerza de en lb durante el desarrollo de la prueba.



*Fotografía 3.2.5: Calibración de las ruedas del APA*  
*Fuente:(Anguas et al., 2005)*

4. En el panel de control del ensayo de deformación permanente Ilustración 3.2.6, se especifica el tipo de probeta de viga o también pueden ser moldes cilíndricos; número de ciclos; presión de las mangueras; posición de los medidores de deformación (LVDT,s), entre otros parámetros.



*Ilustración 3.2.6: Panel de control para el ensaye de deformación permanente en el APA, ejemplo fuente(Anguas et al., 2005)*

5. Cuando el equipo alcanza los 64 °C se procede a sacar las probetas del horno y se colocan las probetas dentro de los moldes de plástico, mismos que se van a introducir en el APA de tal forma que queden centrados por debajo de cada rueda (fot.6a) (Anguas et al., 2005).



(a)



(b)

Fotografía 3.2.6a: Evaluación de la deformación permanente en el APA

Fotografía 3.2.6b: Evaluación de la deformación permanente en el APA

Fuente:(Anguas et al., 2005)

Se sabe que la prueba termina una vez que se haya completado los 8 000 ciclos, como se muestra en las fotografías 6a y 6b, se muestra la apariencia de las probetas después del ensayo de deformación permanente en el Analizador de Pavimentos Asfálticos. En el *Gráfico 3.2.3* se puede apreciar cómo se ha formado una curva típica de la evolución de la deformación permanente durante la prueba.

### Evolución de la deformación permanente en el APA

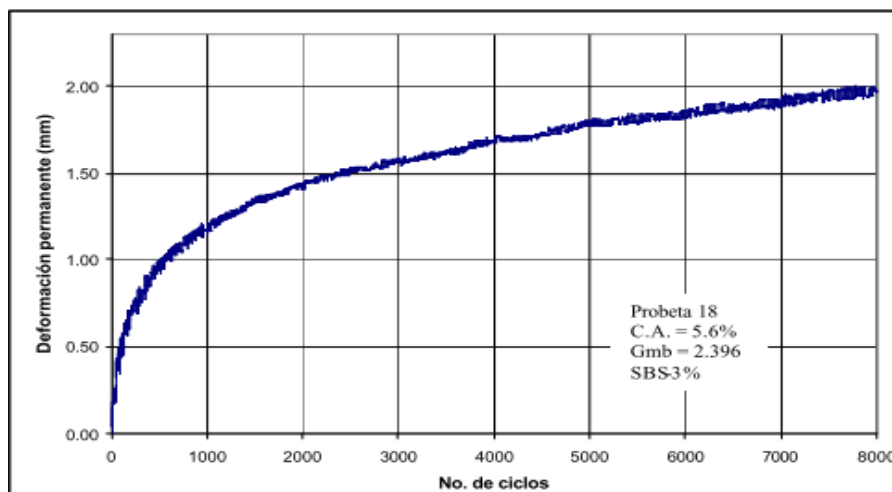


Gráfico 3.2.4: Evolución de la deformación permanente en el APA, ejemplo

Fuente:(Anguas et al., 2005)

### **3.2.11 APLICACIÓN DEL METODO SUPERPAVE**

- El método Superpave utilizado actualmente en EE.UU, y Canadá ya que este diseño va de acuerdo a las condiciones y sollicitaciones de sitio y sobre la base del comportamiento mecánico de los materiales ensayados a temperaturas extremas de servicio (Silene et al., 2020).
- La implementación del sistema Superpave en los EE.UU. se puede decir que falta terminar ya que este diseño debe estar relacionado con el análisis del diseño y modelos de predicción del comportamiento, debido a la necesidad de investigaciones y ajustes adicionales (Silene et al., 2020).
- Los ensayos Superpave calcula las diferentes propiedades físicas que se pueden relacionar directamente con el comportamiento en campo por principios ingenieriles. Los ensayos se puede realizar a la temperatura de servicio del pavimento (Silene et al., 2020).
- El sistema de diseño Superpave, en su estructura granular se determina un tamaño máximo nominal de mezcla entre 9.5 y 37.5 mm. Muchas agencias americanas muestran especial interés en mezclas con tamaño máximo nominal de 4.75 mm dando como resultado superficies más lisas, aptos para corregir los defectos superficiales, y proporcionar una mezcla superficial para pequeños volúmenes de tráfico (Silene et al., 2020).
- En Maryland, este método se usa como parte del mantenimiento preventivo, presentando una excelente resistencia a las deformaciones permanentes y agrietamientos. Siendo estos los porcentajes que contiene la mezcla de 65% de arena chancada y 35% de arena natural. El buen comportamiento de este tipo de mezcla también se presenta en Georgia (Silene et al., 2020).
- En la actualidad la metodología Superpave ha demostrado tener significativos avances en lo concerniente a la selección del ligante asfáltico, las mezclas de agregados, y la compactibilidad de la mezcla asfáltica, se puede decir que no cuenta con impulso ni aplicación en el Ecuador. En Estados Unidos y México el Método Marshall prácticamente no tiene utilidad, estos países realizan sus diseños de mezclas asfálticas aplicando principalmente Superpave (Jhonny Javier Pincay Bermello et al., 2018).

### **3.3 MÓDULO DINÁMICO**

México es el país que está en el proceso de implementación del ensayo de Módulo Dinámico para el diseño de mezclas asfálticas de alto desempeño. El Laboratorio de Asfaltos y Mezclas Asfálticas del Instituto Mexicano del Transporte (IMT) cuenta con el equipo especializado para realizar el ensayo conforme al método de prueba AASHTO T 342. Se dice que está en proceso este método, porque en los ensayos realizados se ha detectado que existe parámetros inadecuados que se describirán más adelante (Alamilla & Flores, 2017).

#### **3.3.1 MÓDULO DINÁMICO DE DISEÑO DE MEZCLAS**

El Módulo Dinámico es una propiedad mecánica fundamental para el diseño de un pavimento asfáltico; esta propiedad determina las características de la respuesta a la deformación de la mezcla asfáltica, en función de la temperatura y velocidad de aplicación de la carga (Alamilla & Flores, 2017).

“Esta propiedad es determinada en el laboratorio por medio de ensayos de compresión axial en carga cíclica realizados a diferentes temperaturas y frecuencias. Las frecuencias representan la velocidad de operación de los vehículos y las temperaturas a las que puede estar sujeto el pavimento. La variación de las propiedades dinámicas se da principalmente por el cambio de temperatura, un aumento de esta genera una disminución del módulo dinámico mientras que un aumento de la frecuencia de carga genera valores más altos” (Alamilla & Flores, 2017).

El objetivo del estudio del módulo dinámico es verificar analíticamente si el cambio en el orden de las frecuencias y en el rango e intervalos de temperaturas definidas en la norma AASHTO T 342 no afecta los parámetros mecánicos determinados con el ensayo a través de los ensayos ya realizados (Alamilla & Flores, 2017).

El módulo dinámico se define como un valor absoluto del módulo complejo que define las propiedades elásticas de un material de viscosidad lineal sometido a una carga sinusoidal (Alamilla & Flores, 2017).

El módulo dinámico es un número complejo que consta de dos partes y se describe a continuación:

1. La parte real, representa la rigidez o también llamada parte elástica (Alamilla & Flores, 2017).
2. La parte imaginaria representa el amortiguamiento interno de los materiales o su parte viscosa, se determina como la relación de la amplitud del esfuerzo sinusoidal máximo y la amplitud de la deformación sinusoidal máxima (Alamilla & Flores, 2017).

ECUACIÓN:  $E^* = \frac{\sigma}{\epsilon}$

Ecuación 3.3.1: Módulo dinámico

ECUACIÓN:  $E^* = \frac{\sigma_0 * e^{i\omega t}}{\epsilon_0 * e^{i(\omega t - \delta)}} = |E^*| * e^{i\delta}$

Ecuación 3.3.2: Módulo dinámico

Donde:

$|E^*|$  = llamado módulo dinámico, es el valor absoluto del módulo complejo del material a ser estudiado

$\delta$  = Ángulo de fase (o ángulo de desfase) del material en estudio

El ángulo de fase ( $\delta$ ) es el resultado del análisis de retraso entre la señal de carga y deformación, y con la siguiente ecuación se determina como se relaciona con el módulo dinámico de la siguiente manera:(Alamilla & Flores, 2017)

ECUACIÓN:  $|E^*| = E_1 + iE_2$

Ecuación 3.3.3: Módulo Dinámico

Donde también podemos deducir a E1 y E2:

E1 Módulo de almacenamiento (parte elástica) =  $|E^*| \cos \delta$

E2 Módulo de pérdida (parte viscosa) =  $|E^*| \sin \delta$

### Gráfica esfuerzo-deformación durante un ensayo de módulo dinámico

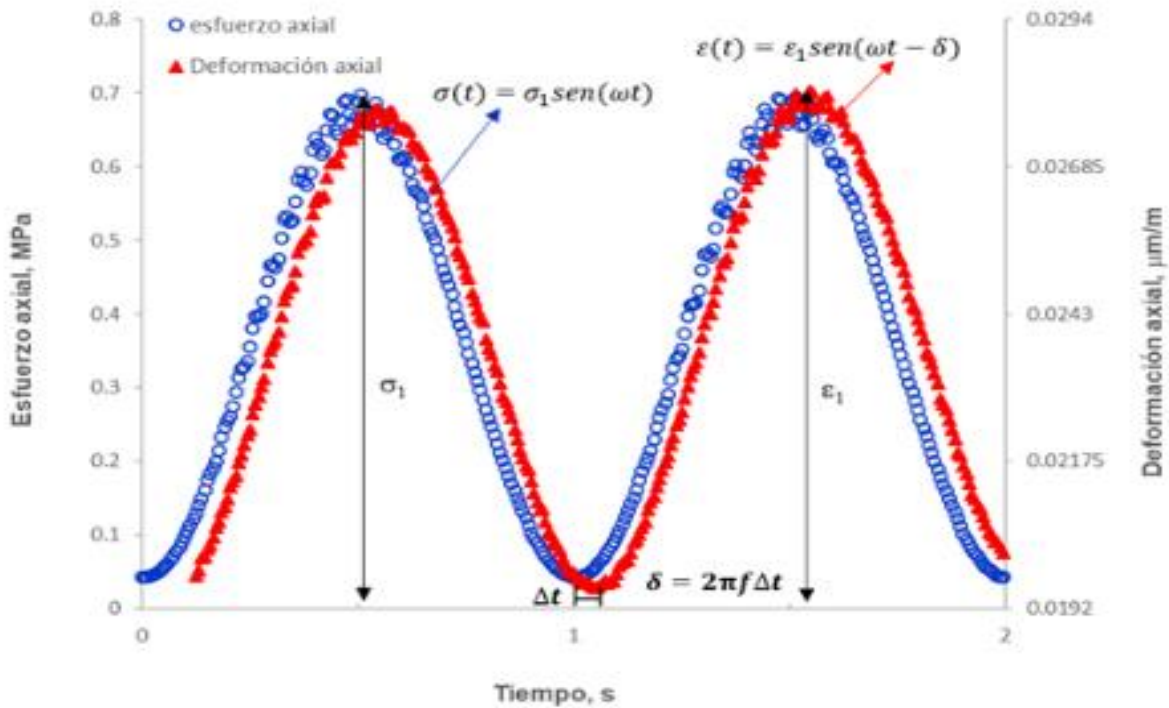


Gráfico 3.3.1: Gráfica esfuerzo-deformación durante un ensayo de módulo dinámico.  
Fuente:(Alamilla & Flores, 2017)

Donde el ángulo de fase ( $\delta$ ) con un valor de cero, considerando un material puramente elástico; el siguiente ángulo de fase  $\delta$  con un valor de  $90^\circ$  presenta un material puramente viscoso (newtoniano). Concluyendo que es un material viscoelástico para un ángulo de fase entre 0 y  $90^\circ$ , vale aclarar que depende de la mezcla asfáltica que se realice. Los ángulos de fase más comunes de las mezclas asfálticas van entre de 0 a  $60^\circ$  (Alamilla & Flores, 2017).

#### 3.3.2 Ensayo de módulo dinámico

El esfuerzo de compresión axial sinusoidal (haversine) es aplicado en este ensayo, este espécimen está hecho de concreto asfáltico, a una temperatura y frecuencia de carga ya determinada. Para calcular el módulo dinámico y el ángulo de fase se lo realiza con el esfuerzo aplicado y la deformación axial que se recuperó espécimen en estudio (AASHTO T 342-11) (Alamilla & Flores, 2017).

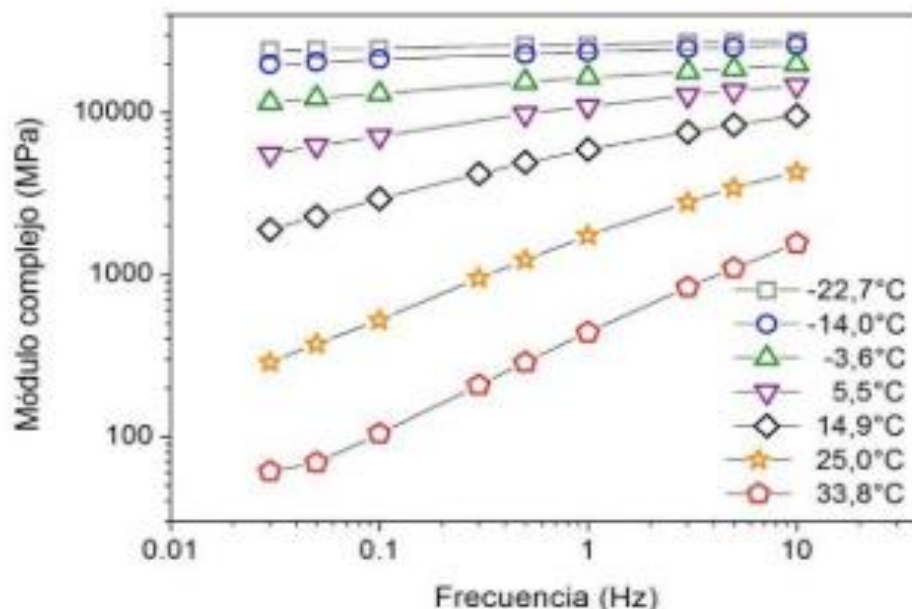
La norma AASHTO T 342-11 “Método de ensayo para determinación del Módulo dinámico de Mezclas Asfálticas en Caliente (HMA)” es la que se utiliza para realizar este ensayo, recalando que la aplicación de carga es cíclica sinusoidal a un espécimen de

concreto asfáltico, de 100 mm de diámetro y 150 mm de altura basados en la norma , las temperaturas que se va aplicar son de -10, 4, 21, 37 y 54°C y las frecuencias de carga a ser utilizadas son de 0.1, 0.5, 1.0, 5, 10 y 25 Hz teniendo en cuenta que es para cada una de las temperaturas ya descritas, a cada espécimen ensayado le va a tocar cada una de las 30 combinaciones de temperatura y frecuencia de carga, la temperatura aplicada debe realizarse de la más baja a la más alta, y de la frecuencia desde la más alta a la más baja. Por medio de una celda de carga se mide el esfuerzo y LVDTs y la deformación. El rango lineal entre 50 y 150  $\mu\epsilon$  debe mantenerse la deformación del espécimen en estudio , el objetivo es que la carga aplicada debe ajustarse para cada frecuencia y temperatura alcanzando el nivel de deformación aceptable (Alamilla & Flores, 2017).

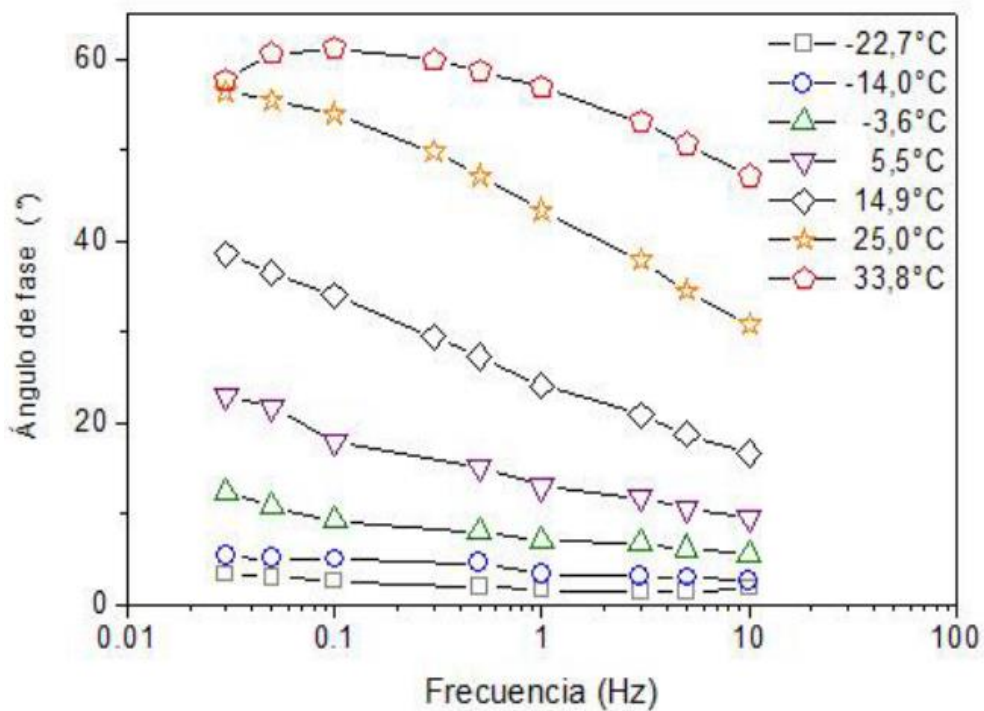
### Principales representaciones gráficas de $|E^*|$

A continuación se presenta las diferentes curvas isotérmicas como el plano Cole-Cole, Diagrama de Black y la curva maestra, se debe recalcar que esta última isoterma es la más común y por los tanto la más utilizada (Alamilla & Flores, 2017).

### Curvas isotérmicas del Módulo Dinámico



(a)



(b)

Gráfico 3.3.2 a: Curvas isotérmicas del módulo dinámico

Gráfico 3.3.2 b: Ángulo de Fase

Fuente: (Alamilla & Flores, 2017)

a) Módulo dinámico:

- La frecuencia es directamente proporcional al valor del módulo
- La temperatura es inversamente proporcional al valor del módulo
- El efecto de la frecuencia es mucha importancia para las temperaturas altas

b) Ángulo de fase

- La frecuencia es inversamente proporcional al ángulo de fase.
- La temperatura directamente proporcional al valor del ángulo de fase.
- El efecto de la frecuencia es de mucha importancia para las temperaturas altas

### Plano Cole-Cole (o plano complejo)

El eje de las abscisas E1 es la parte real siendo la parte elástica y el eje de las ordenadas E2 es la parte imaginaria esta curva calibra un modelo de comportamiento reológico. El principio de equivalencia es característica del material evaluado.

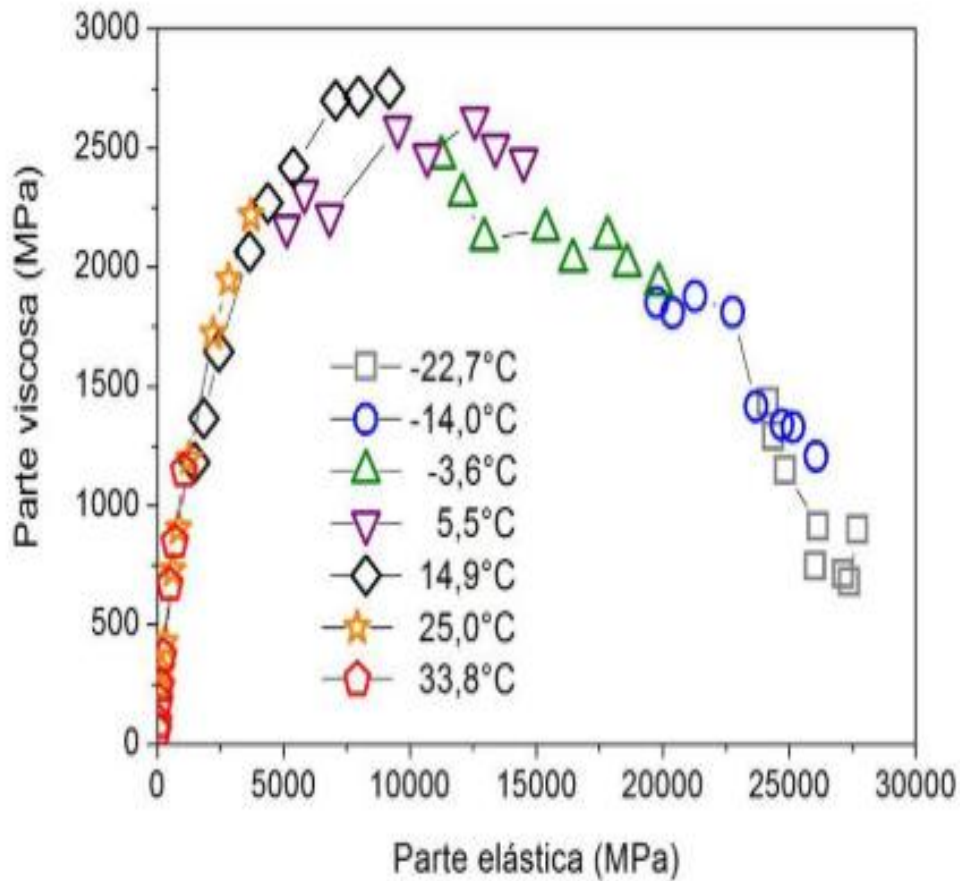


Gráfico 3.3.3: Gráfica de plano de Cole-Cole.  
Fuente: (Alamilla & Flores, 2017)

### Espacio de Black

El denominado espacio de Black se lo obtiene al graficar el valor del módulo dinámico. Los valores del ángulo de fase deben ser graficados en orden creciente de derecha a izquierda. De igual manera que en la gráfica de Cole-Cole siempre y cuando el material cumpla con el principio de equivalencia-temperatura se define una curva única que es característica del material (Alamilla & Flores, 2017).

Se observa las características en la siguiente gráfica representa los valores de módulo dinámico y de ángulo de fase que fueron obtenidos a temperaturas altas, se considera sumamente útil para este ensayo.

### Gráfica de espacio de Black.

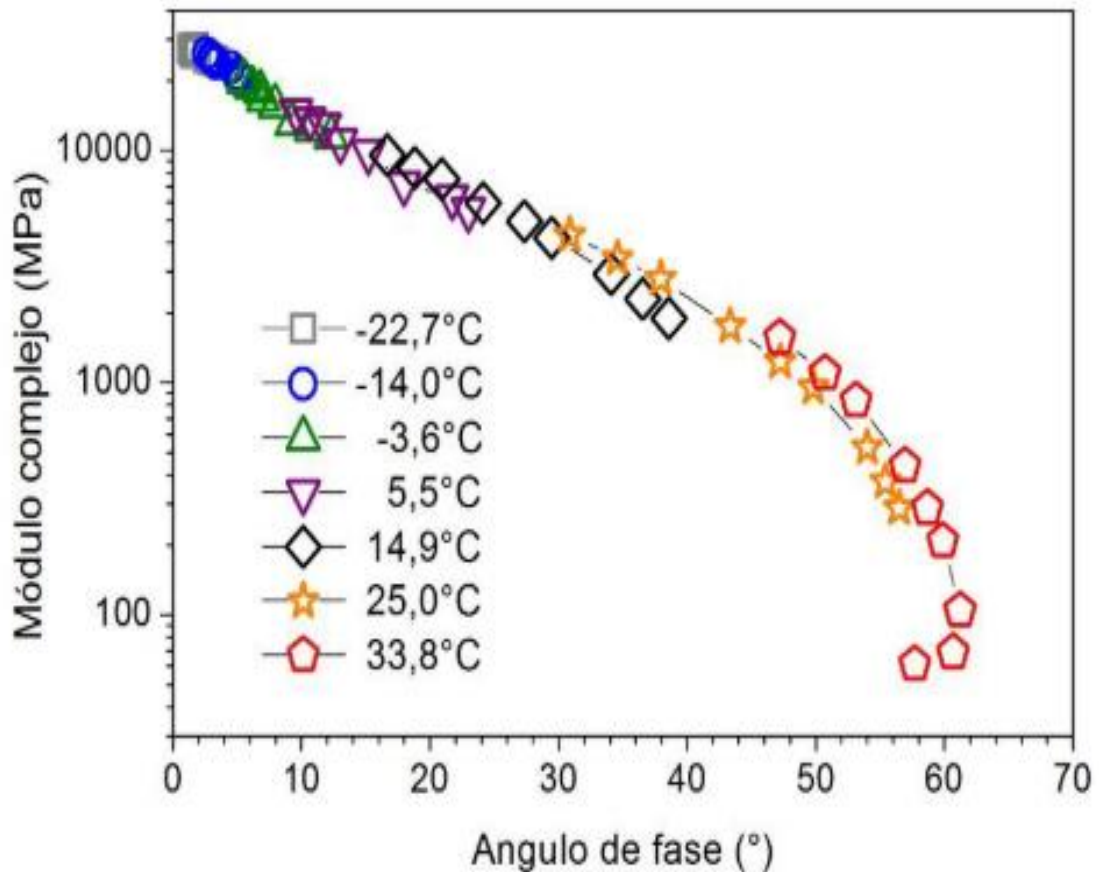


Gráfico 3.3.4: Gráfica de espacio de Black.  
(Alamilla & Flores, 2017)

Se le considera al módulo dinámico como un número complejo que consta de dos partes; la parte real, la cual representa la rigidez siendo esta la parte elástica y la imaginaria que representa el amortiguamiento interno de los materiales siendo esta la parte viscosa (INSTITUTO MEXICANO DE TRANSPORTE, 2017).

#### Curva maestra

La mezcla asfáltica es un material viscoelástico lineal; para calcular su desempeño, se hace uso del principio de superposición tiempo-temperatura. El módulo dinámico está en función de la frecuencia (tiempo) y la temperatura, de manera que el valor del módulo dinámico al representarse con una sola variable reducida mucho depende de la frecuencia y temperatura del ensayo [ $\omega \cdot f(T)$ ] (Alamilla & Flores, 2017).

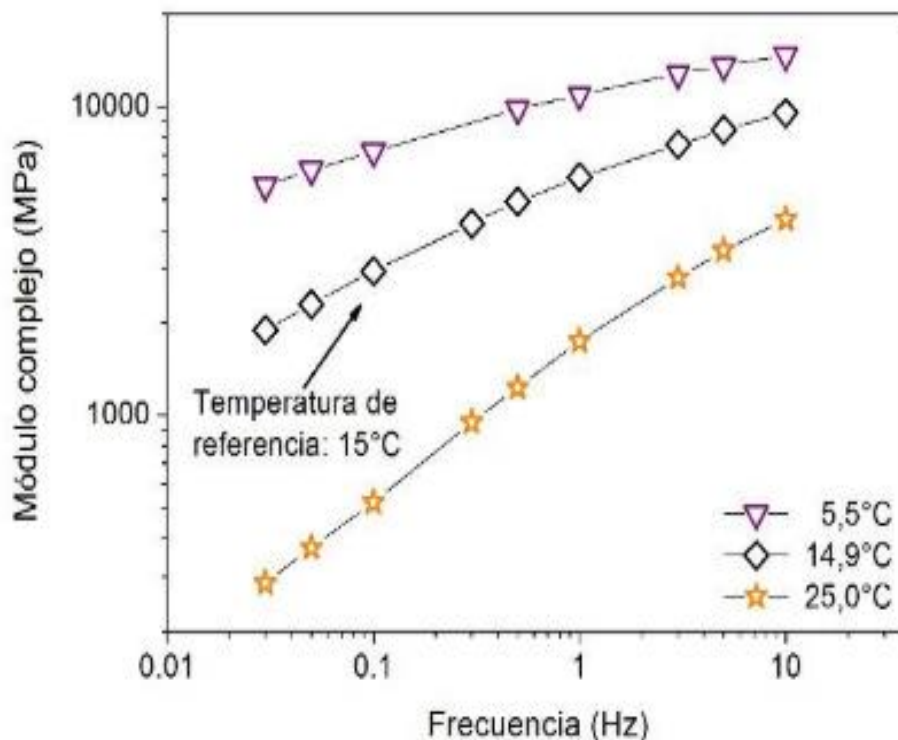
Se determina que el siguiente principio permite que un mismo valor de módulo del material puede ser obtenido para diferentes pares frecuencia-temperatura ( $\omega$ -T) (Alamilla & Flores, 2017).

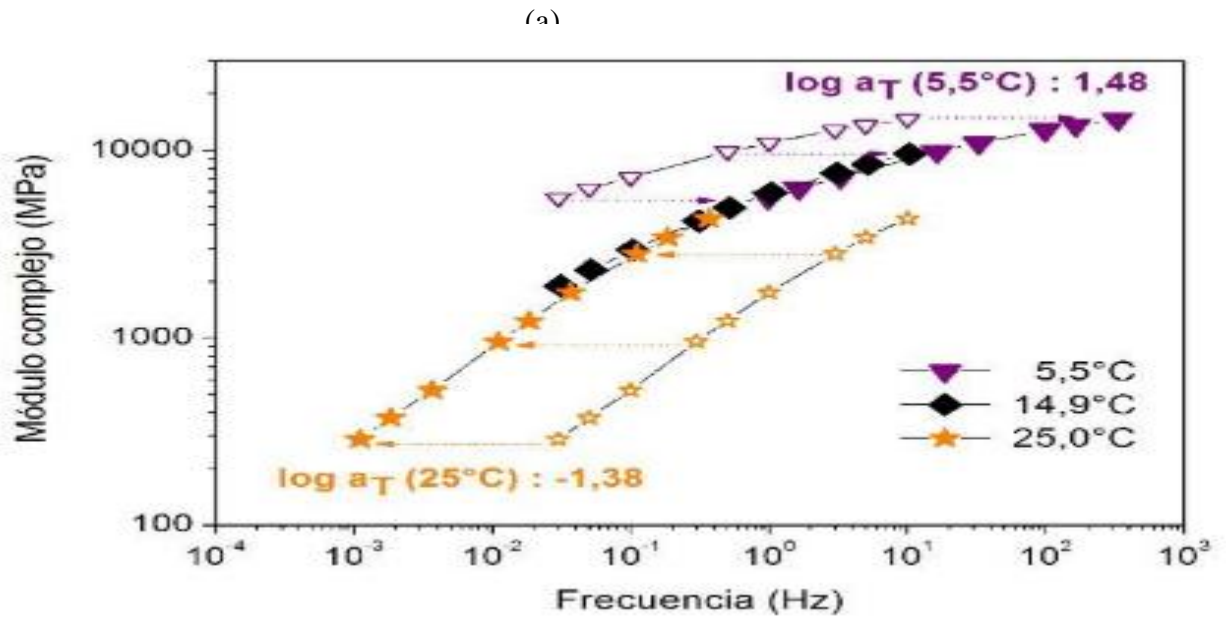
$$\text{ECUACIÓN: } E^*(\omega_1, T_1) = E^*(\omega_2, T_2) \text{ para } \omega_1 f(T_1) = \omega_2 f(T_2)$$

Ecuación 3.3.4: El módulo dinámico es una función de la frecuencia (tiempo) y la temperatura

Utilizando este principio, posibilita construir una curva única para una temperatura de referencia TR siendo esta seleccionada arbitrariamente. Para construirla es necesario realizar diferentes ensayos de laboratorio a diferentes temperaturas y frecuencias, luego cada isoterma de temperatura es trasladada paralelamente al eje de las abscisas, con respecto a la isoterma de referencia TR, hasta tener una superposición de los puntos de todas las isotermas representado en el gráfico 12. El valor del factor de desplazamiento ( $a_T$ ) de cada isoterma con respecto a TR es  $\log(a_T)$ , donde  $a_T$  es una función de la temperatura que es un indicador de la susceptibilidad térmica de la mezcla asfáltica, material asfáltico utilizado es muy importante para obtener lo antes mencionado (Alamilla & Flores, 2017).

### Construcción de la curva maestra.





(b)

Gráfico 3.3.5: Construcción de la curva maestra(a), (b).  
Fuente:(Alamilla & Flores, 2017)

El factor de desplazamiento horizontal ( $a_T$ ) es calculado usando la relación empírica de Williams-Landel-Ferry (WLF), (Alamilla & Flores, 2017).

Donde:

Las mezclas asfálticas en caliente deben tener un correcto diseño de la estructura del pavimento. Son importantes las propiedades para identificar el comportamiento que dicho pavimento tendrá en su vida útil, como lo son los conocidos módulos de mezclas asfálticas, se determina el módulo resiliente y el módulo dinámico (Alamilla & Flores, 2017).

$$\text{ECUACIÓN: } \log(a_T) = \frac{-C_1(T-T_R)}{(T-T_R)+C_2}$$

Ecuación 3.3.5:  $a_T$  es una función de la temperatura que es un indicador de la susceptibilidad térmica de la mezcla asfáltica

donde

$C_1$  y  $C_2$  = constantes positivas que dependen del material

$T_R$  = temperatura de referencia, °C

T = temperatura de ensayo, °C

El factor de traslación,  $a_T$ , tiene las siguientes propiedades

$T > T_R$   $\text{Log } a_T < 0$  EC:32

$T < T_R$   $\text{Log } a_T > 0$  EC:33

$T = T_R$   $\text{Log } a_T = 0$  EC: 34

Ecuaciones: 33, 34, 35: Factor de traslación

A la siguiente curva se la denomina “Curva Maestra”, Gráfico 3.3.6, la cual es característica del material y permite determinar valores de módulo en frecuencias que no pueden ser obtenidas experimentalmente (Alamilla & Flores, 2017).

### Curva maestra de módulo dinámico

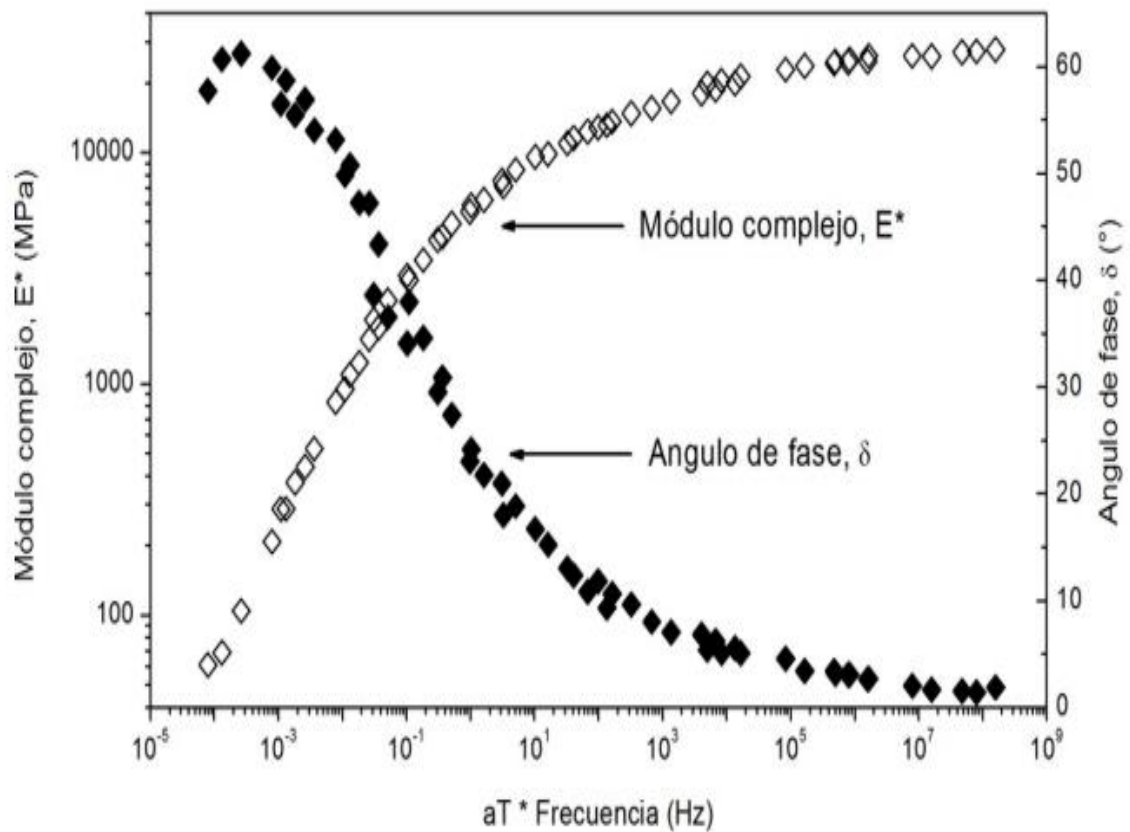


Gráfico 3.3.6: Curva maestra de módulo dinámico  
Fuente: (Alamilla & Flores, 2017)

### 3.3.3 Ensayo de módulo dinámico AASHTO T 342- 11.

Los ensayos se realizan a las temperaturas de -10, 4, 21, 37 y 54°C y frecuencias de 25, 10, 5, 1, 0.5, 0.1 Hz, comenzando de temperaturas bajas a altas y de frecuencias altas a bajas, conforme a la norma AASTHO T 342-11. a la frecuencia de 25 Hz fue ensayado un espécimen debido a problemas de deslizamiento del espécimen en la temperatura de -10°C y a la alta dispersión en los resultados del ensayo a temperaturas altas (>40°C). Posteriormente los mismos especímenes se ensayan, pero comenzando de temperaturas y frecuencias bajas a altas y eliminando la frecuencia de 25 Hz.(Alamilla & Flores, 2017)

Las tablas 2A, 3A y 9A del anexo 2 presentan los resultados de los ensayos.(Alamilla & Flores, 2017)

### 3.3.4 Equipo

1. Un sistema de ensayo de módulo dinámico consiste de una máquina de ensayo, cámara ambiental y sistema de medición (Alamilla & Flores, 2017).

2. Máquina de ensayo, es capaz de producir una carga de compresión sinusoidal controlada. La máquina de prueba debe tener una capacidad de aplicar carga en un rango de frecuencias de 0.1 a 10 Hz y niveles de esfuerzo mayores a 2800 KPa. Para cargas sinusoidales, el error estándar de la carga aplicada debe ser menor que el 5 por ciento. El error estándar de la carga aplicada es una medida de la diferencia entre los datos de carga medidos y el mejor ajuste sinusoidal. El error estándar de la carga es definido en la ecuación siguiente (Alamilla & Flores, 2017).

$$\text{ECUACIÓN: } se(P) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \widehat{X})^2}{n-4}} \left( \frac{100\%}{\widehat{X}_0} \right)$$

Ecuación 3.3.6: Error estándar de la carga aplicada

Donde:

se(P)= error estándar de la carga aplicada

x<sub>1</sub> = carga medida en el punto i

x<sub>i</sub> = carga estimada para el punto i del ajuste sinusoidal

x<sub>0</sub>= amplitud del ajuste senoidal.

n = número total de datos recolectados durante el ensayo

3. Cámara ambiental permite controlar la temperatura del espécimen de ensayo la temperatura deseada. La cámara ambiental debe ser capaz de controlar la temperatura del espécimen en un rango de temperaturas de -10 a 60 °C con una exactitud de  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ . La cámara debe ser lo suficientemente grande para acomodar el espécimen de prueba y el espécimen de referencia con el termocople colocado en el centro para verificar la temperatura (Alamilla & Flores, 2017).
4. Sistema de medición debe estar controlado completamente por computadora, capaz de medir y registrar durante el ensayo la carga aplicada y la deformación axial. El sistema debe ser capaz de medir la carga senoidal aplicada y las deformaciones resultantes con una aproximación de 0.5 %. La precisión y resolución de las mediciones son resumidas en la siguiente tabla (Alamilla & Flores, 2017):

#### Exactitud y resolución del sistema de medición

Medición	Rango	Exactitud	Resolución
Carga	0.12 a 25 kN	Error $\leq 0.0$ por ciento	$\leq 0.0012\text{kN}$
Deformación	$\geq 1$ mm	Error $\leq 0.0025$ mm	$\leq 0.0002$ mm
Log de fase entre la carga y la deformación	No especificado	$\leq 1$ grado	No especificado

*Tabla 3.3.1: Exactitud y resolución del sistema de medición*  
Fuente:(Alamilla & Flores, 2017)

5. Carga, ésta debe ser medida con una celda de carga electrónica en contacto con uno de los extremos del espécimen. La celda de carga debe ser calibrada en un laboratorio con trazabilidad al Centro Nacional de Metrología (CENAM). El sistema de medición de carga debe tener un rango mínimo de 0 a 25 kN con una resolución de 1.2 N (Alamilla & Flores, 2017).
6. Deformaciones axiales deben ser medidas con un LVDT montado entre los pines pegados al espécimen, por ejemplo, como se muestra en la Ilustración 3.3.1. Las deformaciones deben ser medidas en dos puntos a  $180^{\circ}$  o tres puntos a  $120^{\circ}$ . Los LVDTs deben tener un rango de medición de  $\pm 0.5$  mm. El sistema de medición

de la deformación debe poder regresar a cero y debe tener los rangos definidos en la siguiente tabla (Alamilla & Flores, 2017):

**Esquema general de los puntos de medición (Sin escala)**

Rango, mm	Resolución, mm
$\pm 0.5$	0.0100
$\pm 0.25$	0.0050
$\pm 0.125$	0.0025
$\pm 0.0625$	0.0010

Tabla 3.3.2: Esquema general de los puntos de medición (Sin escala)  
Fuente: (Alamilla & Flores, 2017)

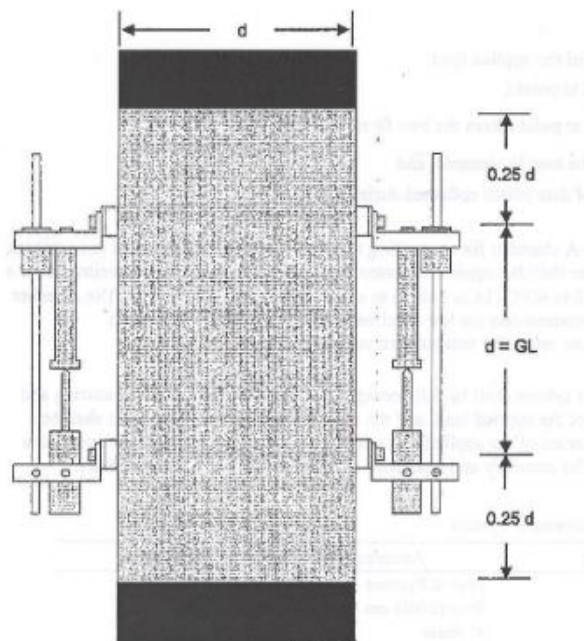


Ilustración 3.3.1: Requerimientos del sistema de medición de deformación  
Fuente:(Alamilla & Flores, 2017)

7. Placas de carga, se requieren placas de carga de 104.5 mm  $\pm$ 0.5 mm para colocar arriba y abajo del espécimen para transferir la carga de la máquina de prueba al espécimen. Generalmente, estas placas deben ser hechas de acero endurecido o de chapa de acero, o aluminio anodizado de alta resistencia. Si son elaboradas de materiales más suaves, se

requerirá reemplazarlas más frecuentemente. No se deben utilizar materiales que tengan módulos elásticos lineales y dureza inferior que el aluminio 6061-T6.(Alamilla & Flores, 2017).

8. Compactador giratorio Superpave. Un compactador giratorio y el equipo asociado para preparar especímenes de laboratorio de acuerdo con la ASTM D6925. El compactador debe ser capaz de compactar especímenes de 170 mm de altura (Alamilla & Flores, 2017).

9. Sierra es una máquina para cortar los extremos de los especímenes de prueba a la longitud requerida. La sierra debe tener un lado de corte con diamante y debe ser capaz de cortar los especímenes a las dimensiones requeridas sin calentarse excesivamente o sin provocar corto (Alamilla & Flores, 2017).

10. Extractor de núcleos es una máquina extractora con sistema de enfriamiento y punta de diamante para cortar especímenes de prueba de 101.6 mm de diámetro nominal (Alamilla & Flores, 2017).

### **3.3.5 Procedimiento**

1. Los ensayos para determinar la curva maestra deben realizarse a -10, 0, 10, 20, 30 y 40 °C y a frecuencias de carga de 0.1, 0.5, 1.0, 5 y 10 Hz para cada una de las temperaturas. Cada uno de los especímenes de prueba, individualmente instrumentado con LVDT, debe ser ensayado para cada una de las 30 combinaciones de temperatura y frecuencia de carga comenzando de la temperatura más baja a la más alta y de la frecuencia más baja a la más alta (Alamilla & Flores, 2017).

2. Colocar el espécimen de prueba en la cámara de temperatura y permitir que se equilibre a la temperatura de prueba especificada  $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ . Usar un espécimen de monitoreo con un termoacople montado en el centro para determinar el momento en que el espécimen alcanza la temperatura especificada de ensayo, Fotografía 3.3.1. Los tiempos mínimos recomendados para que la temperatura se equilibre son proporcionados como una guía (Alamilla & Flores, 2017).



Fotografía 3.3.1: Espécimen con termocople para monitorear la temperatura del espécimen de ensayo.  
Fuente:(Alamilla & Flores, 2017)

### Tiempos de equilibrio recomendados

Temperatura del espécimen, °C	Tiempo, h
-10	Toda la noche
0	Toda la noche o 4 horas
10	
20	
30	4
40	

Tabla 3.3.3: Tiempos de equilibrio recomendados  
Fuente: (Alamilla & Flores, 2017)

3. Montar los lvdt axiales en los pines previamente pegados al espécimen. Ajustar los LVDT al extremo de su rango lineal para permitir que el rango completo esté disponible para la deformación permanente a compresión acumulada (Alamilla & Flores, 2017).

4. Colocar el disco de acero endurecido encima del espécimen; centrarlo visualmente con el actuador de carga con el propósito de evitar carga excéntrica (Alamilla & Flores, 2017).
5. Aplicar una carga de contacto ( $P_{mín}$ ) igual al cinco por ciento de la carga dinámica que será aplicada al espécimen. Es aceptable incrementar el esfuerzo de contacto aplicado hasta 20 KPa para mejorar la efectividad del control de la maquina aplicando una carga que mantendrá el contacto positivo con el espécimen, pero sin dañarlo (Alamilla & Flores, 2017).
6. Ajustar y balancear el sistema de medición electrónico como sea necesario (Alamilla & Flores, 2017).
7. Aplicar una carga ( $P_{dinámica}$ ) sinusoidal (haversine) al espécimen, en forma cíclica. La carga dinámica debe ser ajustada para obtener deformaciones axiales entre 50 y 150 microdeformaciones (Alamilla & Flores, 2017).

#### Niveles de esfuerzo dinámico típicos

Temperatura °C	Rango KPa
-10	1400-2800
0	900-1600
10	600-1200
20	350-700
30	200-400
40	70-140

*Tabla 3.3.4: Niveles de esfuerzo dinámico típicos*  
Fuente:(Alamilla & Flores, 2017)

8. Ensayar el espécimen de la temperatura más baja a la más alta; es decir, de -10°C a 40°C. Para cada una de las temperaturas, aplicar la carga de la frecuencia más baja a la más alta, es decir, de 0.1 a 10 Hz. Cargar el espécimen como es especificado en Tabla 3.3.5. El periodo de reposo entre cada una de las frecuencias es de cuatro minutos (Montoya Tovar & David, 2017).

### Número de ciclos para la secuencia de ensayo Frecuencia

Frecuencia (Hz)	Número de ciclos
0.1	15
0.5	15
1.0	20
5.0	100
10.0	200

Tabla 3.3.5: Número de ciclos para la secuencia de ensayo Frecuencia  
Fuente: (Alamilla & Flores, 2017)

- El espécimen debe ser desechado al final de cada serie de ensayos para cada uno de los periodos de temperatura. Si la deformación permanente no recuperable acumulada es mayor que 1500 micro unidades de deformación, reducir el nivel de esfuerzo a la mitad. Mantener los datos del ensayo hasta el siguiente periodo de reposo, desechando el espécimen, y usar uno nuevo para el resto de las frecuencias de ensayos bajo condiciones de carga reducida (Alamilla & Flores, 2017).

### 3.3.6 Análisis de resultados de ensayo de Módulo Dinámico

Este estudio evalúa una mezcla asfáltica con un TN 3/4" (19 mm) en la curva granulométrica de diseño (Figura 6), el material pétreo utilizado es un basalto de buena calidad y el material asfáltico un PG 64-22. El contenido óptimo de asfalto de la mezcla asfáltica fue de 5.4% con respecto a la masa de la mezcla asfáltica compactada a 100 giros (Alamilla & Flores, 2017).

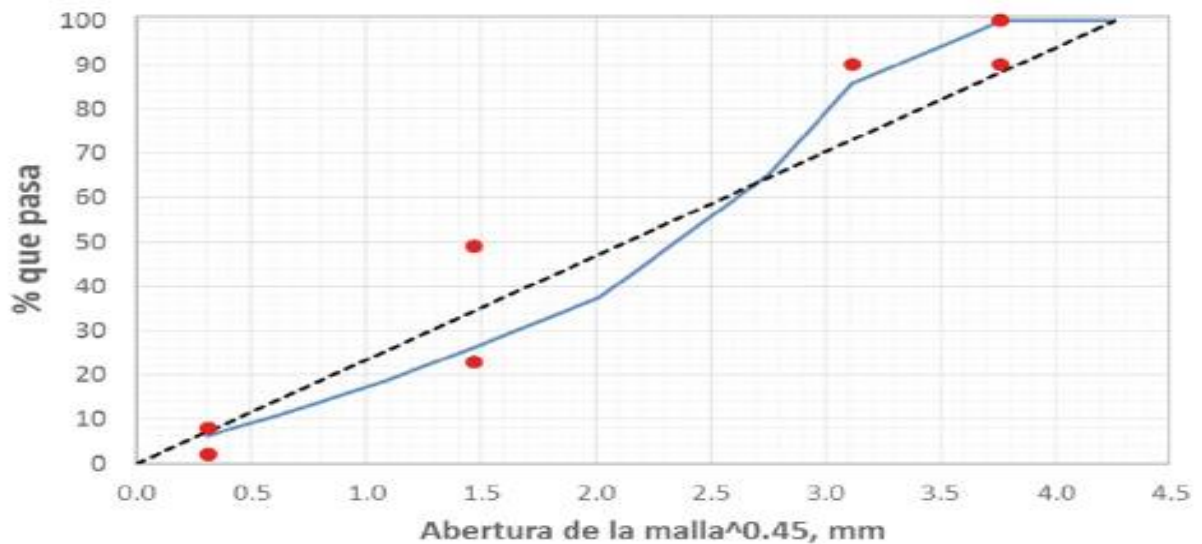


Gráfico 3.3.7: Granulometría de Diseño  
Fuente: (Alamilla & Flores, 2017)

### Repetibilidad de la medición de módulo dinámico

Uno de los puntos importantes en el análisis de la información del ensayo es la repetibilidad de la medición. Es decir, si existe una dispersión importante en la realización de cada ensayo no se podría determinar si el error está asociado a un problema en la ejecución del ensayo o a la dispersión misma del ensayo. Hacer un análisis de repetibilidad de un ensayo de módulo dinámico es una tarea ardua y no es el objeto de este artículo. El gráfico 3.3.8 presenta la evaluación de dos especímenes de mezcla asfáltica fabricados y evaluados bajo las mismas condiciones: temperatura de  $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $10^{\circ}\text{C}$ ,  $20^{\circ}\text{C}$ ,  $30^{\circ}\text{C}$  y  $40^{\circ}\text{C}$ , frecuencias de 0.1Hz, 0.5Hz, 1Hz, 5Hz y 10 Hz), lo que da 30 puntos experimentales de análisis en cada mezcla. De esta evaluación se puede observar que no existen diferencias significativas en las mediciones realizadas en el ensayo de módulo dinámico, cuando el ensayo es realizado de manera adecuada (Alamilla & Flores, 2017).

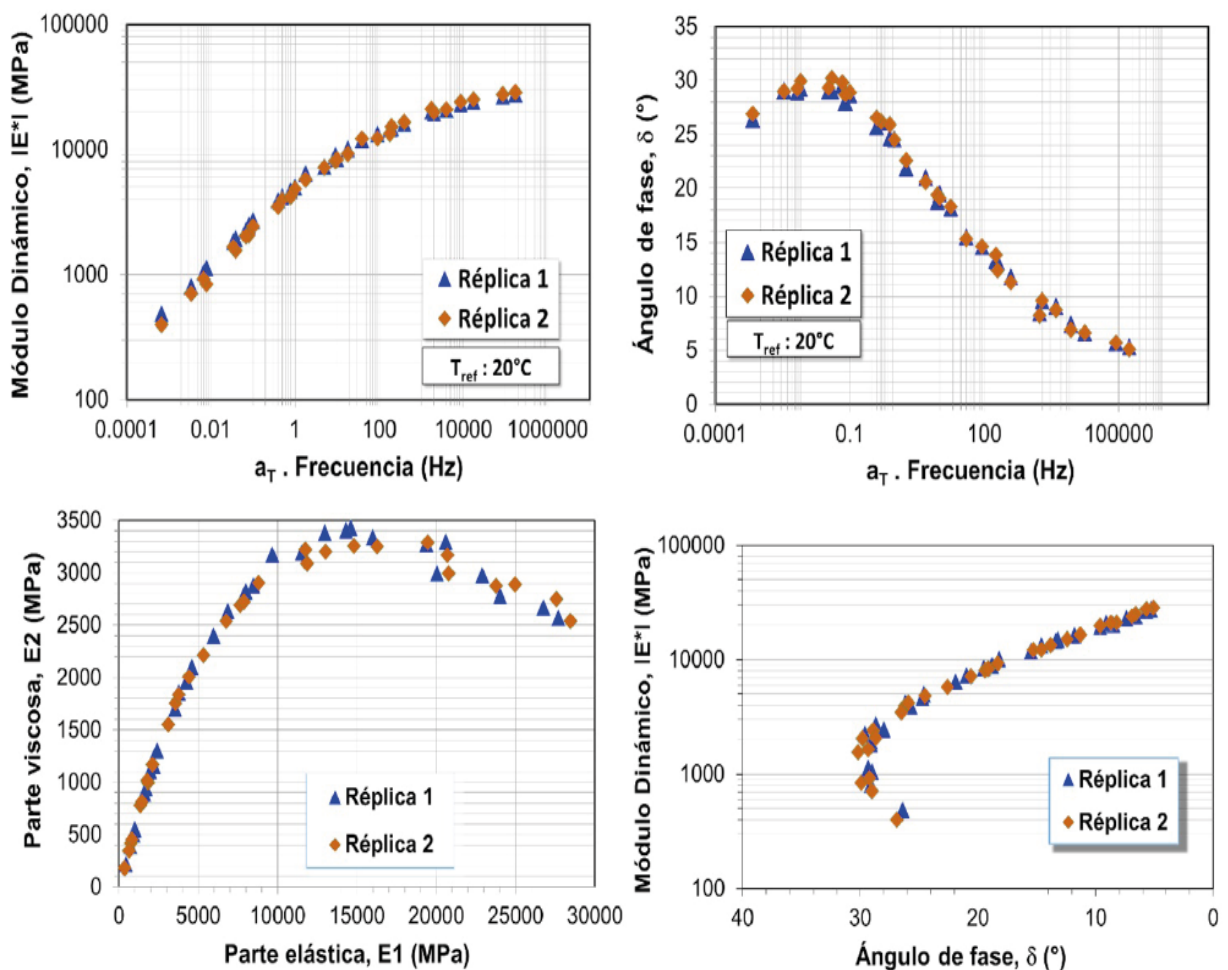


Gráfico 3.3.8: Repetibilidad de un ensayo de modulo dinámico en 4 diferentes presentaciones  
Fuente: (Alamilla & Flores, 2017)

### Propuesta de secuencia de ensayo IMT

La determinación de módulo dinámico se realiza mediante el método de ensayo AASHTO T 342. Este método propone una secuencia con 5 temperaturas (-10°C, 4°C, 21°C, 37°C y 54°C) y 6 frecuencias (25Hz, 10Hz, 5Hz, 1Hz, 0.5Hz y 0.1Hz). En la mayoría de las evaluaciones realizadas en el IMT se ha seguido una secuencia diferente en la ejecución del ensayo utilizando temperaturas de -10°C a 40°C y frecuencias en secuencia invertida a la propuesta en la Norma, así como la eliminación de la frecuencia de 25Hz Tabla 3.3.6. Por lo cual se podría considerar que con esta modificación no se cumple con los requerimientos establecidos en la Norma. La validez de esta modificación a la Norma AASHTO se basa en el principio fundamental del ensayo “El principio de Superposición o equivalencia Tiempo-Temperatura”, por lo cual, si se siguen las especificaciones de los equipos de medición, tiempos de acondicionamiento mínimos y la verificación de la calidad de la medición esta variación de la secuencia no debería tener ninguna influencia en la determinación del comportamiento viscoelástico lineal de la mezcla asfáltica (Alamilla & Flores, 2017).

Tabla 1. Condiciones de ensayo de módulo dinámico		
Condición	Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)
AASHTO	-10, 4, 21, 37 y 54	25, 10, 5, 1.0, 0.5 y 0.1
Propuesta IMT	-10, 0, 10, 20, 30 y 40	0.1, 0.5, 1.0, 5 y 10

*Tabla 3.3.6: Condiciones de ensayo de modulo dinámico  
Fuente: (Alamilla & Flores, 2017)*

La razón de la modificación de la secuencia de evaluación se realiza por cuatro razones principales:

1. Eliminar la frecuencia de 25Hz; el problema principal de esta frecuencia es la determinación del ángulo de fase de la mezcla asfáltica, ya que para tener una precisión de 1° se necesita que los LVDT's tengan la capacidad de medir un desfase de la señal con una precisión de 0.00011s, lo cual no es factible realizarlo de manera adecuada en la mayoría de los equipos (Alamilla & Flores, 2017).

2. Reducir el rango de temperatura; debido al carácter viscoelástico de la mezcla asfáltica la rigidez de la mezcla varía con la temperatura teniendo valores del orden de los 30 000 MPa para las temperaturas más bajas y valores del orden de 100 MPa para las temperaturas más altas. Estas variaciones para el equipo de medición son equivalentes a evaluar materiales diferentes, por lo cual requiere ajustar los valores de las ganancias del equipo (PID), y esto es impráctico en la ejecución del ensayo, además que para temperaturas muy altas (54°C) no se logran con facilidad los requerimientos de Coeficiente de Uniformidad del ángulo de fase establecidos en la norma (Alamilla & Flores, 2017).
3. Inversión de las frecuencias, independientemente que las sollicitaciones se realicen dentro del rango viscoelástico (en teoría no hay deformaciones permanentes), la evaluación genera una historia de carga en las probetas evaluadas, la cual está asociada a un acomodo del material y un aumento de temperatura de la probeta por la disipación de energía durante el ensayo. El hecho de iniciar con la frecuencia más baja hace que estos efectos se presenten de manera gradual y la mezcla tenga una mejor respuesta (menos dispersión de resultados) (Alamilla & Flores, 2017).
4. Rangos de temperaturas más cortos, mientras mayor diferencia de temperatura se tiene entre los puntos aumenta la variación en la determinación de los valores de sensibilidad térmica de la mezcla asfáltica (valores aT) y por ende se pueden tener errores en la determinación de la curva maestra (Alamilla & Flores, 2017).

La curva maestra de la mezcla asfáltica evaluada con la secuencia de ensayo definida en la Norma AASHTO T 324. En principio se observa que las curvas maestras siguen un comportamiento correcto para los valores de módulo dinámico y ángulo de fase (izquierda). Sin embargo, observando a detalle las mediciones se puede ver que en los resultados a 25Hz se presentan ligeras desviaciones en el valor del ángulo de fase (puntos en rojo), los cuales son más evidentes cuando se analizan los resultados en el plano complejo (Cole-Cole, derecha). Adicional al análisis de los resultados de ensayo en las representaciones clásicas del ensayo, se analizó la calidad de la medición, en particular la medición a 54°C (Tabla 3.3.7). De este análisis se puede observar que ninguno de los valores obtenidos cumple con el coeficiente de uniformidad establecido en la Norma de ensayo. Esto se asocia a varios factores como son la baja rigidez de la mezcla asfáltica, la necesidad de modificar los PID del equipo, la acumulación de deformaciones permanentes. Además, cabe mencionar que esta medición sólo agrega dos puntos

experimentales en la curva maestra en comparación con un ensayo realizado a 40°C (Círculos azules, Gráfico 3.3.9), siendo que es más factible asegurar la calidad de la medición a la temperatura de 40°C (Tabla 3.3.7) (Alamilla & Flores, 2017).

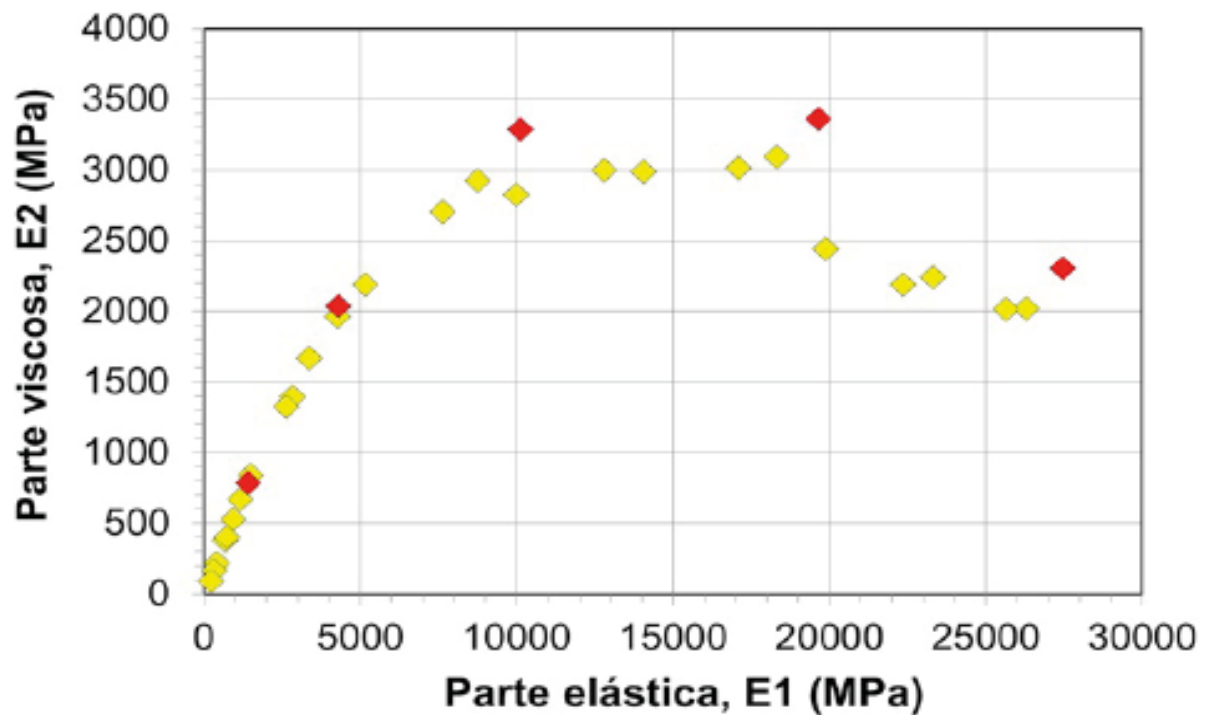
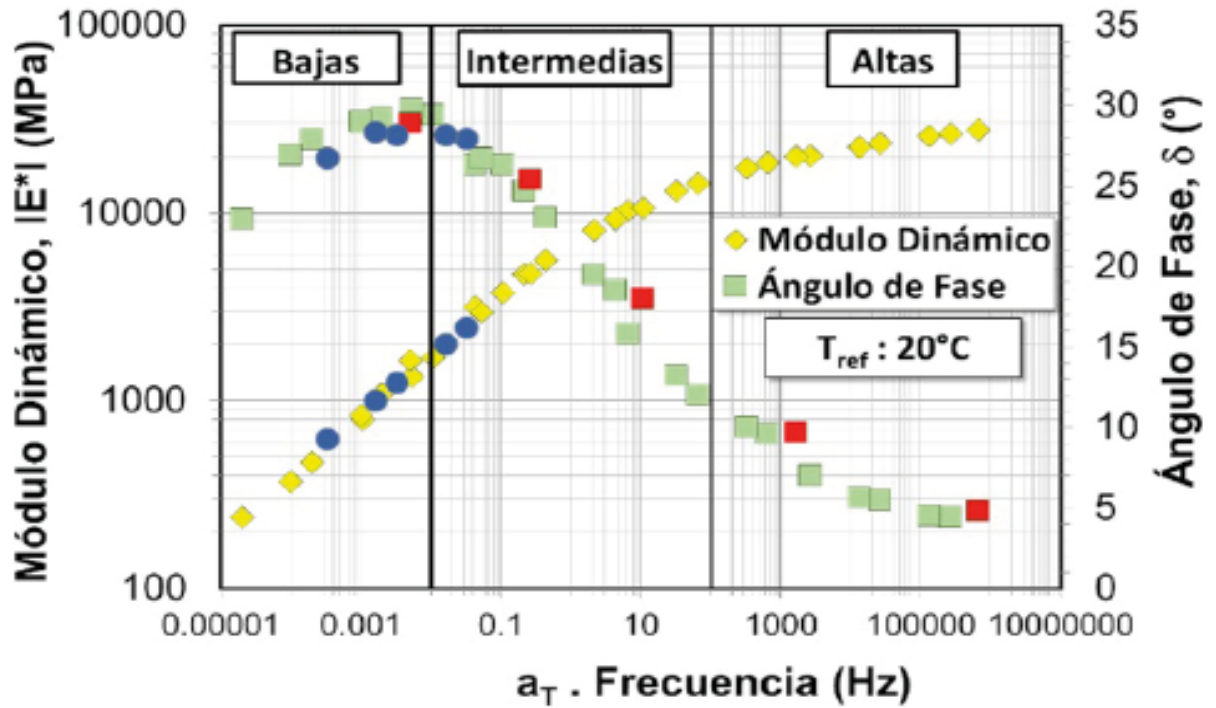


Gráfico 3.3.9: resultados del ensayo de módulo Dinámico  
Fuente: (Alamilla & Flores, 2017)

Tabla 2. Evaluación de la calidad de la medición del ensayo a 54°C y 40°C							
Espécimen	Temperatura °C	Frecuencia Hz	Desviación estándar Esfuerzo ( $\leq 10\%$ )	Desviación estándar Deformación ( $\leq 10\%$ )	CU Deformación ( $\leq 35\%$ )	CU Ángulo de Fase ( $\leq 3^\circ$ )	Deformación acumulada $\mu\epsilon$
AASHTO T342 Probeta 117 Frecuencias Altas-Bajas	54	25	5	6.1	36.3	3.2	248
		10	6.2	7.7	30.9	3.7	304
		5	4.1	6.3	28.3	4.2	325
		1	0.7	4.4	30	3.8	332
		0,5	0.8	4.4	31.2	3.7	336
		0,1	1	4.8	30.3	3.3	382
Propuesta IMT Probeta 35 Frecuencias Bajas-altas	40	10	0.8	5.8	14.2	0.9	76
		5	0.7	5.4	11.5	0.3	133
		1	0.5	4.5	10.8	0.7	178
		0.5	3.5	4.7	9.7	1.4	298
		0.1	6	5.9	11.9	2.1	719

Tabla 3.3.7: Evaluación de la calidad de la medición del ensayo a 54°C y 40°C  
Fuente: (Alamilla & Flores, 2017)

Con el fin de confirmar que no hay una influencia en la caracterización de las propiedades viscoelásticas de la mezcla asfáltica por la variación de la secuencia de ensayos, se realizaron tres ensayos con las secuencias de ensayo descritas en la Tabla 3.3.8. De acuerdo con lo explicado en el punto anterior no se presentarán los resultados obtenidos para la frecuencia de 25Hz (Alamilla & Flores, 2017).

Tabla 3. Secuencias de ensayo para validar propuesta		
Condición	Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)
AASHTO (Probeta 34 Frecuencia A-B)	-10, 4, 21, 37 y 54	10, 5, 1.0, 0.5 y 0.1
AASHTO Mod (Probeta 117 Frecuencia B-A)	-10, 4, 21, 37 y 54	0.1, 0.5, 1.0, 5 y 10
Propuesta IMT (Probeta 35 Frecuencia B-A)	-10, 0, 10, 20, 30 y 40	0.1, 0.5, 1.0, 5 y 10

Tabla 3.3.8: Secuencia de ensayo para validar propuestas  
Fuente: (Alamilla & Flores, 2017)

La primera verificación fue la influencia de la secuencia de ensayo en la determinación de la sensibilidad térmica de la mezcla asfáltica, la cual se presenta en la Gráfico 3.3.10. En esta Figura se presentan los valores de  $a_T$  para cada una de las temperaturas de las tres mezclas evaluadas y se puede observar que no hay diferencias significativas en los valores obtenidos ya que en las tres mezclas se utilizó el mismo tipo de asfalto y el cambio de secuencia de ensayo no influye en la determinación (Alamilla & Flores, 2017).

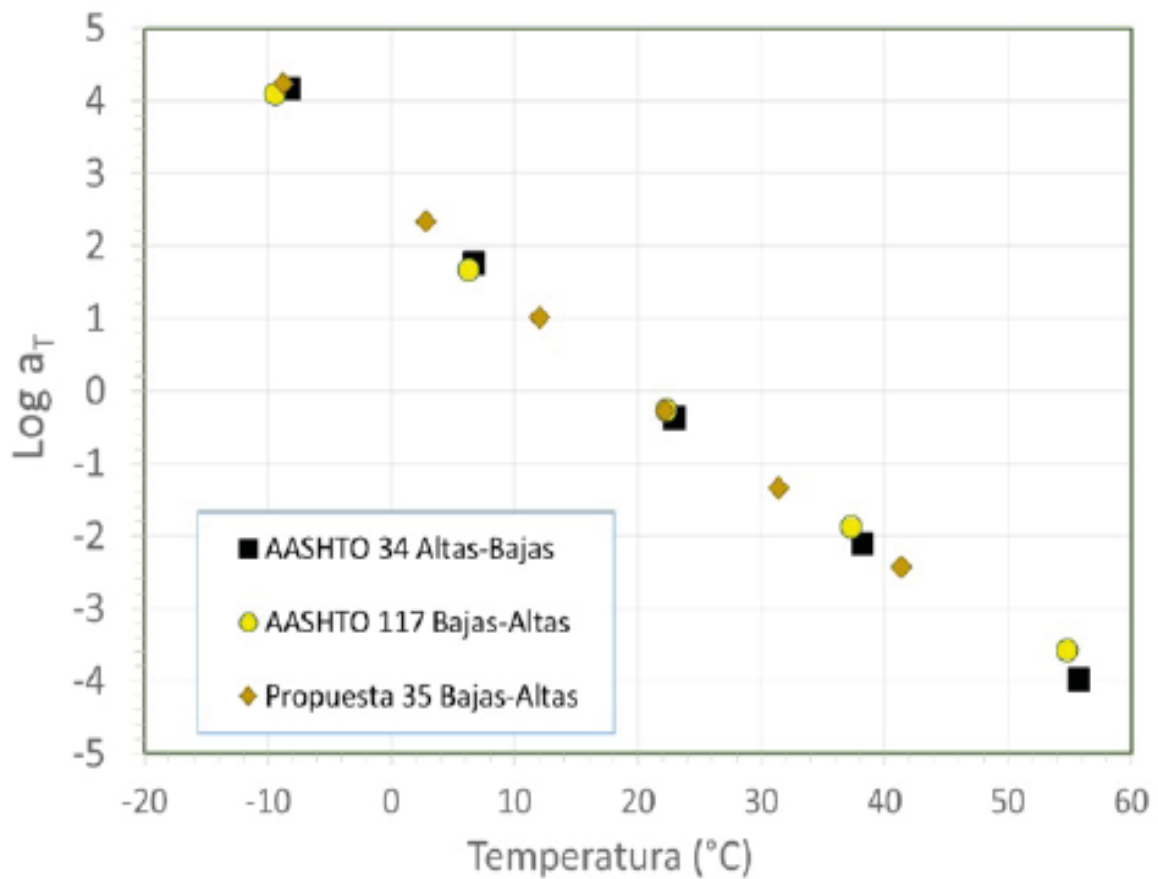


Gráfico 3.3.10: Valores  $a_T$  a diferente temperatura con diferentes secuencias de ensayo  
Fuente: (Alamilla & Flores, 2017)

La evaluación general se presenta en la Gráfico 3.3.1, de estos resultados se puede observar que no hay diferencias significativas entre las diferentes representaciones analizadas (Curva maestra, Plano Cole-Cole y Diagrama de Black) (Alamilla & Flores, 2017).

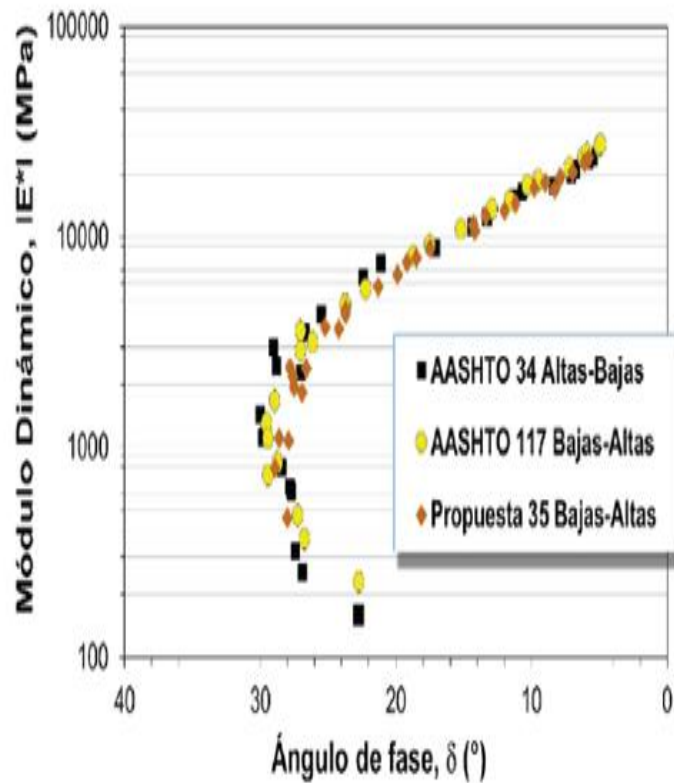
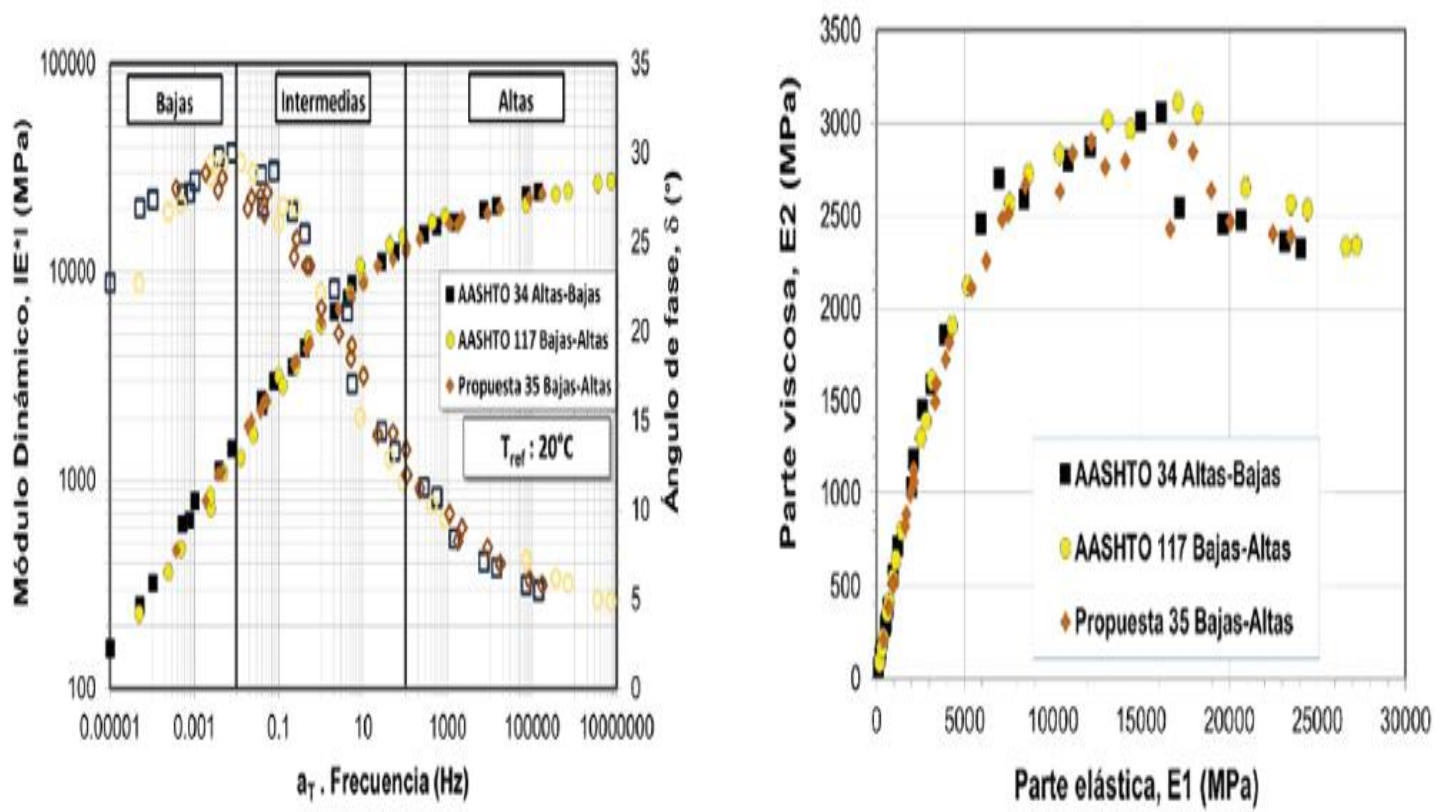


Gráfico 3.3.11: resultados del ensayo de modulo Dinámico con diferentes secuencias de ensayo.  
Fuente: (Alamilla & Flores, 2017)

### 3.3.7 Aplicación:

- En México, está en proceso la implementación del ensayo de Módulo Dinámico para el diseño de mezclas asfálticas de alto desempeño. El Laboratorio de asfaltos y mezclas asfálticas del Instituto Mexicano del Transporte (IMT) cuenta con el equipo para realizar el ensayo conforme al método de prueba AASHTO T 342 (Alamilla & Flores, 2017).
- En Estados Unidos, la norma utilizada para ejecutar el ensayo es la AASHTO T 342, señala realizar la prueba a las temperaturas de -10, 4, 21,37 y 54°C y frecuencias de carga de 0.1, 0.5, 1.0, 5, 10 y 25 Hz; iniciando en las temperaturas bajas a altas y de frecuencias altas a bajas, y aplicando un determinado número de ciclos dependiendo de la frecuencia de ensayo; esto con la finalidad de que se acumule la menor cantidad de deformación permanente en el espécimen (Alamilla & Flores, 2017).
- Hacer del desarrollo científico, tecnológico y la innovación pilares para el progreso económico y social sostenible y “Contar con una infraestructura de transporte que se refleje en menores costos para realizar actividad económica” del Plan Nacional de Desarrollo (Alamilla & Flores, 2017).

**CAPÍTULO 4: ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MÉTODOS RAMCODES (POLÍGONO DE VACÍOS), SUPERPAVE, MÓDULO DINÁMICO.**

<b>CUADRO COMPARATIVO DE LOS MÉTODOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS: RAMCODES, SUPERPAVE Y MÓDULO DINÁMICO</b>			
<b>MÉTODO</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>VENTAJAS</b>	<b>POSIBLES DESVENTAJAS</b>
Método de Ramcodes	<ul style="list-style-type: none"> <li>Estudia la relación entre la humedad, densidad y resistencia de la mezcla asfáltica; y, correlacionar el potencial de densificación y la resistencia a través de la clasificación cuantitativa, obtenida según el factor característico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>El factor económico debido a la reducción de elaboración del número a tres briquetas por cada mezcla ensayada, representa principalmente ahorro de tiempo en la obtención de resultados.</li> <li>Es un método de diseño para conseguir la optimización y el uso</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Estudio de cambio volumétrico bajo hidratación. (No desarrollada)</li> </ul>

		racional de los materiales, obteniendo productos más confiables y a menor costo	
Método Superpave	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Representa una tecnología provista de tal manera que permite especificar cemento asfáltico y mineral agregado; desarrollar diseños de mezclas asfálticas; analizar y establecer predicciones del desempeño del pavimento</li> <li>• Un diseño de mezcla Superpave implica seleccionar asfalto y materiales agregados que cumplan con las especificaciones de Superpave y luego realizar un análisis volumétrico de muestras de HMA compactadas con el compactador giratorio Superpave.</li> </ul>	<p>Los criterios establecidos por Superpave permiten obtener los rangos de temperatura de mezclado y compactación para el asfalto AC-20 sin modificar y modificado con SBS.</p> <p>la Metodología Superpave puede establecer un criterio para asegurar el fácil manejo y bombeo del asfalto en planta, determinando un valor de viscosidad a una cierta temperatura.</p>	<p>Las propiedades del agregado mineral son sumamente importantes para el buen desempeño de mezclas asfálticas. Si no se elige un buen agregado fallará el ensayo ya que el concepto de agregados está directamente integrado en el procedimiento Superpave. Se determinó que hay dos tipos de propiedades de los agregados se especifican en el sistema Superpave y son propiedades de consenso (angularidad del agregado grueso, angularidad</p>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>El sistema Superpave reúne la caracterización de materiales asfálticos basada en el rendimiento con las condiciones ambientales de diseño para mejorar el rendimiento mediante el control de la formación de surcos, el agrietamiento a baja temperatura y el agrietamiento por fatiga. Los tres componentes principales de Superpave son la especificación del aglutinante de asfalto, el diseño de mezcla y el sistema de análisis y un sistema de software de computadora</li> </ul>		del agregado fino (partículas aplanadas y alargadas y equivalentes de arena) y propiedades de origen como control de aceptación
Módulo Dinámico	<ul style="list-style-type: none"> <li>El módulo dinámico se define como un valor absoluto del módulo complejo que define las propiedades elásticas de un</li> </ul>	Este principio posibilita construir una curva única para una temperatura de referencia TR siendo esta seleccionada arbitrariamente. Para	Uno de los puntos importantes en el análisis de la información del ensayo es la repetibilidad de la medición. Es decir, si existe

	<p>material de viscosidad lineal sometido a una carga sinusoidal (Alamilla &amp; Flores, 2017)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• El módulo dinámico es un número complejo que consta de dos partes y se describe a continuación:</li> <li>• La parte real, la cual representa la rigidez o parte elástica (Alamilla &amp; Flores, 2017) <ul style="list-style-type: none"> <li>• La parte imaginaria representa el amortiguamiento interno de los materiales o su parte viscosa, y está determinado como la relación de la amplitud del esfuerzo sinusoidal máximo y la amplitud de la deformación</li> </ul> </li> </ul>	<p>construirla es necesario realizar diferentes ensayos de laboratorio a diferentes temperaturas y frecuencias, luego cada isoterma de temperatura es trasladada paralelamente al eje de las abscisas, con respecto a la isoterma de referencia TR, hasta tener una superposición de los puntos de todas las isotermas representado en el gráfico 12. El valor del factor de desplazamiento (aT) de cada isoterma con respecto a TR es <math>\log(aT)</math>, donde aT es una función de la temperatura que es un indicador de la susceptibilidad térmica de la mezcla asfáltica, material asfáltico utilizado es muy importante para obtener lo antes mencionado. (Alamilla &amp; Flores, 2017)44</p>	<p>una dispersión importante en la realización de cada ensayo no se podría determinar si el error está asociado a un problema en la ejecución del ensayo o a la dispersión misma del ensayo.</p>
--	--	--	--

	sinusoidal máxima (Alamilla & Flores, 2017)	En México, está en proceso la implementación del ensayo de módulo dinámico para el diseño de mezclas asfálticas de alto desempeño. El Laboratorio de asfaltos y mezclas asfálticas del Instituto Mexicano del Transporte (IMT) cuenta con el equipo para realizar el ensayo conforme al método de prueba AASHTO T 342.(Alamilla & Flores, 2017)	
--	---	---	--

## CAPITULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### CONCLUSIONES

1. El diseño de mezclas asfálticas como todo diseño ingenieril debe ser tomado con el grado de responsabilidad e importancia necesaria, esto implica el conocimiento y cumplimiento de los procedimientos estandarizados, así como también un grado de experiencia sobre el comportamiento de cada uno de los componentes que lo conforman.
2. El método Superpave evalúa los componentes de la mezcla asfáltica en forma individual (agregado mineral y asfalto), y su interacción cuando están mezclados (Jhonny Javier Pincay Bermello et al., 2018).
3. Se realizó un análisis de aplicación del método RAMCODES en el diseño de mezclas asfálticas de alto desempeño, y comparó los resultados con los obtenidos por metodología Superpave y demostró que el polígono de vacíos produjo el mismo resultado que Superpave b con entre 4 y 5 veces menos briquetas. También incluyó en el análisis del polígono de vacíos la verificación de los rangos de 30 contenido de asfalto permitidos por la recomendación de relación filler-bitumen del manual SP- 2 del Instituto Norteamericano del Asfalto; ampliando más el universo de aplicación de RAMCODES (Jhonny Javier Pincay Bermello et al., 2018).
4. La reducción de elaboración del número a tres briquetas por cada mezcla ensayada, representa principalmente ahorro de tiempo en la obtención de resultados en el Método de RAMCODES.
5. RAMCODES, el polígono de vacíos realizó el ajuste directo para que el contenido de asfalto satisfaga todas las especificaciones (Jhonny Javier Pincay Bermello et al., 2018).
6. Se determinaron que existe un rango de contenido de asfalto en donde se satisfacen todas las especificaciones de vacíos requeridas para el buen funcionamiento de la capa de rodadura, publicado en el proyecto denominado “Análisis comparativo del método Superpave para compactación de mezclas asfálticas”, editado por el Instituto Mexicano del transporte. Este rango lo obtuvieron al superponer el polígono de vacíos de RAMCODES y las curvas Gmb - %CA de sus mezclas analizadas (Daniel & Sandoval, 2005).

7. Se presenta un análisis de la influencia de la zona restringida (Granulometría SUPERPAVE) en el desempeño de la mezcla asfáltica, utilizando un diseño experimental que involucra tres factores (contenido de asfalto, granulometría y origen del agregado). Analizaron las propiedades volumétricas apoyándose en la metodología RAMCODES. Entre una de sus conclusiones manifiestan que, de acuerdo con los materiales y granulometrías evaluadas, determinan que el polígono de vacíos es una herramienta eficaz para identificar la susceptibilidad a la variación de las propiedades volumétricas por cambios en la fuente de agregado o en la granulometría (Jhonny Javier Pincay Bermello et al., 2018).
8. Sánchez-leal, Anguas, Larreal, & Valdés, 2011, prepararon un documento denominado “Analytical Tool for Superpave HMA (Mezcla asfáltica en caliente) Design Freddy” que contiene la aplicación del polígono de vacíos de RAMCODES, a varias mezclas, con la finalidad de mostrar formalmente las aplicaciones de esta técnica para el diseño y análisis de asfalto en caliente de Superpave. Entre sus resultados muestran que para obtener el contenido de óptimo de asfalto con Superpave se requiere la elaboración de 16 especímenes y obtuvieron el mismo resultado con el polígono de vacíos que sólo necesitó seis especímenes para su comprobación (Jhonny Javier Pincay Bermello et al., 2018).
9. La metodología Superpave ha demostrado tener importantes avances en lo que se refiere a la selección del ligante asfáltico; las mezclas de agregados; y la compactibilidad de la mezcla asfáltica (Daniel & Sandoval, 2005).
10. RAMCODES puede ser una herramienta de gran utilidad en el control de la variación en el diseño, producción y colocación de mezclas asfálticas al ligar racionalmente las especificaciones de diseño, con los criterios de control de campo mediante la implementación del “polígono de vacíos”, que define un área donde se cumplen todas las especificaciones de vacíos (Daniel & Sandoval, 2005).
11. De acuerdo con la metodología RAMCODES, se puede inferir que la mezcla asfáltica diseñada por el método Superpave Nivel I presente un mejor desempeño durante su vida de servicio, ya que el par %CA-Gmb correspondiente al contenido óptimo cumple con todas las especificaciones de vacíos, lo que garantiza una carpeta durable; además de exhibir una mejor resistencia a la deformación permanente, con relación a la mezcla diseñada por el método Marshall (Daniel & Sandoval, 2005).

12. El divorcio entre los criterios de diseño y los de control de campo, puede traer consigo el rechazo de mezclas con características satisfactorias, y/o la, aceptación de mezclas cuyas propiedades volumétricas vayan en contra de los criterios de diseño (Daniel & Sandoval, 2005).
13. La presente tesis ha hecho eco a una nueva tecnología aplicable al diseño y control de mezclas asfálticas como es RAMCODES a través del polígono de vacíos.

## **RECOMENDACIONES**

1. Se debe poner en la práctica profesional diaria este tipo de herramientas nuevas para el diseño de mezclas asfálticas.
2. Se plantea como recomendación la utilización de RAMCODES ya sea como método independiente de diseño de mezclas asfálticas o como un complemento al diseño Marshall ya que esto permite desarrollar un mejor criterio para la elección del contenido óptimo de asfalto en la etapa de diseño.
3. Se recomienda la utilización del polígono de vacíos de la metodología RAMCODES, como alternativa técnica para obtener el rango de dosificación a utilizar en planta, el mismo que se obtiene al superponer con la curva Gmb-%CA del diseño Marshall con el polígono de vacíos. Se encontró que para las muestras analizadas este rango favorece a que los parámetros principalmente volumétricos siempre se encuadren dentro de especificación.
4. Otro procedimiento que se debe poner en práctica es el cálculo del Módulo Dinámico de mezclas asfálticas, un método que está al alcance es Witczak el cual depende principalmente de la granulometría y de los resultados del diseño de mezclas asfálticas ya sea por Marshall, RAMCODES o Suparpave, se requiere conocer adicionalmente la viscosidad del ligante, pero no requiere de más ensayos especiales. El utilizar estas herramientas se traducirá indudablemente en un mejor desempeño de las mezclas asfálticas (Jhonny Javier Pincay Bermello et al., 2018).

## BIBLIOGRAFIA.

- Alamilla, H. D., & Flores, M. F. (2017). *Propuesta de método de prueba de módulo dinámico en mezclas asfálticas para México*. 507.
- Anguas, P. G., Delgado, H., Carlos, A., & Sandoval, D. S. (2005). *ISSN 0188-7297 Certificación ISO 9001:2000 † Laboratorios acreditados por EMA § ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MÉTODOS MARSHALL Y SUPERPAVE PARA COMPACTACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS Y RAMCODES*.
- Brante Lara, G. (2020). *RIEGOS ASFALTICOS Laboratorio Regional Vialidad Va. Región INSTRUCTOR*.
- CAPITULO 3 Desarrollo del método de diseño Superpave*. (2020).
- Daniel, C., & Sandoval, S. (2005). *Análisis comparativo de los métodos de Marshall y Superpave para compactación de mezclas asfálticas*. 271.
- ESR. (2016). *¿Qué es un pavimento flexible y cuándo conviene usarlo?* VISE. <https://blog.vise.com.mx/qué-es-un-pavimento-flexible-y-cuándo-conviene-usarlo>
- Exudaci, C. D. E. L. A. (2016). Boletín Técnico. *CAUSAS Y CONSECUENCIAS DE LA EXUDACIÓN*, 6.
- FRAPIAL. (2020). *¿MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE?* <https://www.frapial.com/post/mezclas-asfálticas-en-caliente>
- Garnica Anguas, P., Gómez López, J. A., & Sesma Martinez, J. A. (2002). *Mecánica De Materiales Para Pavimentos. Instituto Mexicano Del Transporte, No. 197(197)*, 234.
- Jhonny Javier Pincay Bermello, I., Alonso Rodrigo Zuñiga Suarez, I., & Francisco Javier Córdova Rizo, I. (2018). *Análisis comparativo entre la aplicación de Metodología RAMCODES y el método Marshall como alternativa para la obtención del contenido óptimo de asfalto para el diseño de mezclas asfálticas* (G. Compás (Ed.)).
- Montoya Tovar, B., & David, D. (2017). "Año del Buen Servicio al Ciudadano" UNIVERSIDAD PERUANA LOS ANDES FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL TESIS "IMPORTANCIA DE LOS AGREGADOS PÉTREOS PARA LA ESTABILIDAD DE CARRETERAS EN LA CARPETA ASFÁLTICA DE LA VÍA CHUPACA

- RONCH. In *Universidad Peruana Los Andes*. Universidad Peruana Los Andes. <http://repositorio.upla.edu.pe/handle/UPLA/991>
- MOP-001-F-2002. (2002). Especificaciones Generales para la construcción de camnos y puentes. *Republica Del Ecuador Ministerio De Obras Publicas Y Comunicaciones Mop - 001-F 2002*, 3(9), 1689–1699. [https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/07/01-07-2013\\_ConcursoPublico\\_StoDomingo-Esmeraldas-Especificaciones-Tecnicas.pdf](https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/07/01-07-2013_ConcursoPublico_StoDomingo-Esmeraldas-Especificaciones-Tecnicas.pdf)
- Padilla Rodríguez, A., & Asfálticas, M. (2020). *CAPÍTULO 3*.
- Ramcodes, H. (2011). Supertraining 2011. *RAMCODES*.
- REGISTRO. (2020). *P A V I M E N T O S*.
- Rodr, R., Casta, M., Mart, M. M., & Documento, M. (2001). *Emulsiones asfálticas*. 23.
- Rodríguez, A. R., Téllez, R., & Garnica Anguas, P. (1998). *Pavimentos flexibles Problemática , metodologías de diseño y tendencias*. 104.
- Rodríguez, A. R., Téllez, R., Paul, G., & Anguas, G. (1998). *Publicación Técnica No. 104 Sanfandila, Qro*.
- Romero, S. A. (2004). *Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas*. 246.
- Sánchez-leal, F. J. (2018). *PROCEDIMIENTO DE APLICACIÓN DEL POLÍGONO DE VACÍOS AL DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE*.
- Sánchez-Leal, F. J. (2009). Manual de Aplicación RAMCODES. *RAMCODES*.
- Sánchez-Leal, F. J., Garnica, P., José, A., Gómez López, A., & García, N. P. (2002). *RAMCODES: METODOLOGIA RACIONAL PARA EL ANALISIS DE DENSIFICACION Y RESISTENCIA DE GEOMATERIALES COMPACTADOS*.
- Silene, I., Gonzalez, M., Abel, I., & Huaman, O. (2020). *UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL INSTITUTO DE INVESTIGACIONES*.

# **ANEXOS**

## ANEXO 1

### GLOSARIO

**Carpeta Asfáltica:** es la parte superior del pavimento flexible que proporciona la superficie de rodamiento, es elaborada con material pétreo seleccionado y un producto asfáltico dependiendo del tipo de camino que se va a construir. (Rodríguez, Téllez, & Garnica Anguas, 1998)

Durante la conformación de la capa de rodadura, con frecuencia se producen derrames de asfalto líquido y emulsiones, especialmente durante la etapa de riego del sello o el vertido de residuos de concreto asfáltico a los cuerpos de agua más cercanos; así como también la emisión de gases producto del calentamiento del asfalto. Esta sección contempla una serie de actividades a ejecutar por parte del Contratista, tendientes a minimizar los efectos negativos que sobre el ambiente y la salud humana pueden producir (Rodr et al., 2001).

**Exudación:** La exudación es un deterioro en la superficie de una mezcla asfáltica colocada como capa de rueda, donde se nota un alisamiento producto del ascenso de asfalto de la mezcla, combinado con finos del agregado que la compone. Esta mezcla de material fino y asfalto es conocida como el mástico de la mezcla asfáltica. La exudación es originada por exceso de asfalto en la mezcla o un bajo contenido de vacíos de aire. Además puede producirse por un exceso de aplicación de un riego de imprimación o de liga en el proceso de construcción, cuyo efecto es alterar el contenido de asfalto que tiene la mezcla diseñada (Exudaci, 2016).

**Gradación:** La graduación es uno de los factores que más afecta el producto industrial llamado mezcla asfáltica, esta es la razón por la que el control de su variación es un aspecto de significativa importancia en el aseguramiento de la calidad de este producto (Romero, 2004).