

**FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y  
URBANISMO  
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA  
CIVIL**

**TESIS**

**INFLUENCIA DE LA ZEOLITA EN LA ELABORACIÓN  
DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE  
MEDIANTE LA METODOLOGÍA MARSHALL**

**Para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil**

**Autores:**

**Bach. Regalado Tantaleán Daring Josver**

**Bach. Regalado Tantaleán Efraín Gianpier**

**Asesor:**

**Dra. Gioconda del Socorro Sotomayor Nunura**

**Línea de Investigación:**

**Desarrollo de Nuevos Materiales - Materiales  
Compuestos**

**Pimentel – Perú**

**2018**

**TESIS**  
**INFLUENCIA DE LA ZEOLITA EN LA ELABORACIÓN DE MEZCLAS**  
**ASFÁLTICAS EN CALIENTE MEDIANTE EL METODOLOGÍA MARSHALL**

**Aprobado por:**

---

Dra. Gioconda del Socorro Sotomayor Nunura  
**Asesor**

---

Dr. Omar Coronado Zuloeta  
**Presidente de jurado**

---

Ing. Manuel Borja Suarez  
**Secretario de jurado**

---

Mg. Pedro Ramón Patazca Rojas  
**Vocal de jurado**

## **DEDICATORIA.**

Dedico este trabajo a mis padres por haberme apoyado en todo momento en mi formación profesional como persona, por la constante motivación y consejos.

Daring Josver

Dedico este trabajo a mis padres por su apoyo constante y su fe en mí, por su ahínco y su motivación, por ayudar en ser de mí, la persona que cada día formo.

Efraín Gianpier

## **AGRADECIMIENTO**

Agradecemos a nuestros padres por todo el apoyo que nos dan, porque supieron darnos todo y lo mejor de sí, para formarnos como las personas que hoy en día somos, es gracias a sus consejos, su guía y sus experiencias que logramos haber llegado a este punto donde hacemos de ellos uno de los pilares más fuertes de nuestra formación, agradecemos también a nuestra casa de estudios la Universidad Señor de Sipán, por acogernos en su regazo y brindarnos todas sus enseñanzas, a nuestro asesor Ing. Nepton David Ruis Saavedra, por brindarnos sus conocimiento y sabiduría, más que un docente un verdadero maestro, a la Lic. Ana María Guerrero Millones, por su asesoría metodológica a lo largo de toda nuestra investigación.

Los autores

## INDICE

<b>PÁGINA DE JURADO</b> .....	ii
<b>DEDICATORIA</b> .....	iii
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	iv
<b>ÍNDICE DE CONTENIDO</b> .....	v
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	vii
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	ix
<b>ÍNDICE DE ANEXOS</b> .....	xii
<b>RESUMEN</b> .....	xiv
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	17
<b>1.1. Situación problemática</b> .....	17
<b>1.2. Formulación del problema</b> .....	19
<b>1.3. Objetivos</b> .....	19
<b>1.4. Justificación</b> .....	20
<b>1.5. Antecedentes de investigación</b> .....	21
<b>1.6. Marco teórico</b> .....	23
<b>1.6.1. Materiales pétreos</b> .....	23
<b>1.6.2. Zeolita</b> .....	37
<b>1.6.3. Mezcla de agregados</b> .....	43
<b>1.6.4. Normatividad</b> .....	45
<b>1.6.5. Materiales asfálticos</b> .....	46
<b>II. MATERIAL Y MÉTODOS</b> .....	72
<b>2.1. Tipo y diseño de la investigación</b> .....	72
<b>2.1.1. Tipo de investigación</b> .....	72
<b>2.1.2. Diseño de investigación</b> .....	72
<b>2.2. Métodos de investigación</b> .....	72
<b>2.3. Población y muestra</b> .....	72
<b>2.4. Variables</b> .....	73
<b>2.5. Operacionalización</b> .....	74
<b>2.5.1. Tipo de investigación</b> .....	76
<b>2.6. Hipótesis</b> .....	76
<b>2.7. Técnicas de recolección de datos</b> .....	76
<b>2.8. Instrumentos de recolección de datos</b> .....	76
<b>2.8.1. Guía de observación</b> .....	76
<b>2.8.2. Guía de análisis documental</b> .....	77

2.8.3.	Procedimiento para la recolección de datos .....	77
2.9.	Validación y confiabilidad de instrumentos .....	78
2.9.1.	Validación de instrumentos .....	78
2.9.2.	Confiabilidad de instrumentos .....	78
III.	RESULTADOS.....	79
3.1.	Resultados Diseño de mezcla asfáltica en caliente a 140°C.....	79
3.2.	Zeolita como filler .....	91
3.3.	Mezclas asfálticas modificadas. ....	92
3.4.	Resultados evaluación de resultados de una mezcla asfáltica convencional con las mezclas asfálticas a 140°C, 130°C, 120°C y 100°C con adición de zeolita.	117
3.5.	Costos.....	134
IV.	DISCUSIÓN.....	137
V.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	144
VI.	REFERENCIAS .....	146
	ANEXOS	

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Clasificación Estructural de las Zeolitas Naturales.</i>	40
<i>Tabla 2. Relación Si/Al para diferentes tipos de Zeolitas.</i>	41
<i>Tabla 3. Requerimientos Para los Agregados Gruesos.</i>	45
<i>Tabla 4. Requerimientos para los Agregados Finos.</i>	46
<i>Tabla 5. La gradación de la Mezcla Asfáltica en Caliente (MAC).</i>	46
<i>Tabla 6. Tipo de Cemento Asfáltico.</i>	48
<i>Tabla 7. Propiedades Funcionales de las Mezclas Asfálticas</i>	57
<i>Tabla 8. Clasificación de las tecnologías WMA de acuerdo a la temperatura de producción.</i>	58
<i>Tabla 9. Operacionalización de variable independiente.</i>	74
<i>Tabla 10. Operacionalización de variable dependiente.</i>	75
<i>Tabla 11. Análisis granulométrico del agregado grueso.</i>	80
<i>Tabla 12. Análisis granulométrico del agregado fino.</i>	80
<i>Tabla 13. Análisis granulométrico global.</i>	81
<i>Tabla 14. Resultados de gravedad específica y absorción de agregados finos.</i>	82
<i>Tabla 15. Resultados de peso específico y absorción de agregados gruesos.</i>	83
<i>Tabla 16. Porcentaje de desgaste de abrasión del agregado grueso</i>	84
<i>Tabla 17. Porcentaje de caras fracturadas.</i>	84
<i>Tabla 18. Porcentaje de partículas chatas y alargadas.</i>	85
<i>Tabla 19. Límites de Atterberg.</i>	87
<i>Tabla 20. Dosificación de mezcla asfáltica elaborada a 140°C, clase A,B,C.</i>	87
<i>Tabla 21. Porcentaje de Humedad de la Zeolita.</i>	91
<i>Tabla 22. Resultados de mezcla asfáltica elaborada a 140°C, clase A.</i>	93
<i>Tabla 23. Resultados de mezcla asfáltica elaborada a 130°C, clase A.</i>	95
<i>Tabla 24. Resultados de mezcla asfáltica elaborada a 120°C, clase A.</i>	97
<i>Tabla 25. Resultados de mezcla asfáltica elaborada a 100°C, clase A.</i>	99
<i>Tabla 26. Resultados de mezcla asfáltica elaborada a 140°C, clase B.</i>	101
<i>Tabla 27. Resultados de mezcla asfáltica elaborada a 130°C, clase B.</i>	103
<i>Tabla 28. Resultados de mezcla asfáltica elaborada a 120°C, clase B.</i>	105
<i>Tabla 29. Resultados de mezcla asfáltica elaborada a 100°C, clase B.</i>	107
<i>Tabla 30. Resultados de mezcla asfáltica elaborada a 140°C, clase C.</i>	109
<i>Tabla 31. Resultados de mezcla asfáltica elaborada a 130°C, clase C.</i>	111

<b>Tabla 32.</b> Resultados de mezcla asfáltica elaborada a 120°C, clase C.....	113
<b>Tabla 33.</b> Resultados de mezcla asfáltica elaborada a 100°C, clase C.....	115
<b>Tabla 34.</b> Análisis de precios unitarios.....	135
<b>Tabla 35.</b> Análisis de precios unitarios con adición de Zeolita.....	135
<b>Tabla 36.</b> Presupuesto.....	136

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Ordenación tridimensional de silicatos tetraédricos en los tectocilicatos – Adaptado de Mumpton,1993. ....	38
<b>Figura 2.</b> Estructura básica de una zeolita. Adaptado de <a href="http://www.relaq.mx/RLQ/cuba/zeolita.html">www.relaq.mx/RLQ/cuba/zeolita.html</a> .....	38
<b>Figura 3.</b> Cemento asfáltico, agregados y briqueta - Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos – S. Minaya y Ordoñez H.....	48
<b>Figura 4:</b> Comportamiento del Asfalto - Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos – S. Minaya G. y A. Ordoñez H. ....	49
<b>Figura 5.</b> Características del Flujo de Líquidos - Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos – S. Minaya G. y A. Ordoñez H. ....	50
<b>Figura 6:</b> Ahuellamiento o Deformación Permanente o Rutting - Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos – S. Minaya G. y A. Ordoñez H.....	51
<b>Figura 7:</b> Agrietamiento por bajas temperaturas - Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos – S. Minaya G. y A. Ordoñez H.). ....	51
<b>Figura 8:</b> Esquema del Ensayo de Penetración - Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos – S. Minaya G. y A. Ordoñez H. ....	53
<b>Figura 9.</b> Viscosidad Absoluta - Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos – S. Minaya G. y A. Ordoñez H. ....	54
<b>Figura 10:</b> Viscosidad Cinemática - Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos – S. Minaya G. y A. Ordoñez H.). ....	54
<b>Figura 11:</b> Clasificación de mezclas asfálticas por rango de temperaturas - Diseño de mezclas asfálticas drenantes tibias – Senior Arrieta).....	59
<b>Figura 12:</b> Propiedades Peso-Volumen en Mezclas Asfálticas Compactadas - Diseño moderno de pavimentos asfálticos– S. Minaya G. y A. Ordoñez H.). ....	62
<b>Figura 13.</b> Volumen de materiales en especímenes. - Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos – S. Minaya G. y A. Ordoñez H.). ....	63
<b>Figura 14.</b> Diagrama de Procesos.....	77
<b>Figura 15:</b> Tamizado de los agregados. ....	79
<b>Figura 16.</b> Agregado fino en la fiola. ....	81
<b>Figura 17.</b> Ensayo de abrasión en la máquina de los ángeles. ....	83
<b>Figura 18.</b> Calibrador de partículas chatas y alargadas. ....	85

<b>Figura 19.</b> Límite líquido. ....	86
<b>Figura 20.</b> Porcentaje óptimo de asfalto Clase A - Elaboración propia.....	88
<b>Figura 21.</b> Porcentaje óptimo de asfalto Clase B - Elaboración propia.....	89
<b>Figura 22.</b> Porcentaje óptimo de asfalto Clase C - Elaboración propia. ....	90
<b>Figura 23.</b> Zeolita como agregado y como filler. ....	91
<b>Figura 24.</b> Ensayos realizados a 140°C con 1%, 2% y 3% de Zeolita, clase A. ....	94
<b>Figura 25.</b> Ensayos realizados a 130°C con 1%, 2% y 3% de Zeolita, clase A. ....	96
<b>Figura 26.</b> Ensayos realizados a 120°C con 1%, 2% y 3% de Zeolita, clase A. ....	98
<b>Figura 27.</b> Ensayos realizados a 100°C con 1%, 2% y 3% de Zeolita, clase A. ....	100
<b>Figura 28.</b> Ensayos realizados a 140°C con 1%, 2% y 3% de Zeolita, clase B. ....	102
<b>Figura 29.</b> Ensayos realizados a 130°C con 1%, 2% y 3% de Zeolita, clase B. ....	104
<b>Figura 30.</b> Ensayos realizados a 120°C con 1%, 2% y 3% de Zeolita, clase B. ....	106
<b>Figura 31.</b> Ensayos realizados a 100°C con 1%, 2% y 3% de Zeolita, clase B. ....	108
<b>Figura 32.</b> Ensayos realizados a 140°C con 1%, 2% y 3% de Zeolita, clase C.....	110
<b>Figura 33.</b> Ensayos realizados a 130°C con 1%, 2% y 3% de Zeolita, clase C.....	112
<b>Figura 34.</b> Ensayos realizados a 120°C con 1%, 2% y 3% de Zeolita, clase C.....	114
<b>Figura 35.</b> Ensayos realizados a 100°C con 1%, 2% y 3% de Zeolita, clase C.....	116
<b>Figura 36.</b> Estabilidad Corregida (N). ....	117
<b>Figura 37.</b> Flujo (mm). ....	118
<b>Figura 38.</b> Estabilidad/Flujo (kg/cm).....	119
<b>Figura 39.</b> Vacíos (%). ....	120
<b>Figura 40.</b> VMA (%). ....	121
<b>Figura 41.</b> Vacíos llenos con cemento asfáltico (%). ....	122
<b>Figura 42.</b> Estabilidad Corregida (N). ....	123
<b>Figura 43.</b> Flujo (mm). ....	124
<b>Figura 44.</b> Estabilidad/Flujo (kg/cm). ....	125
<b>Figura 45.</b> Vacíos (%). ....	126
<b>Figura 46.</b> Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA). ....	127
<b>Figura 47.</b> Vacíos llenos con cemento asfáltico (%). ....	128
<b>Figura 48.</b> Estabilidad (N). ....	129
<b>Figura 49.</b> Flujo (mm). ....	130
<b>Figura 50.</b> Estabilidad/Flujo (kg/cm). ....	131
<b>Figura 51.</b> Vacíos (%). ....	132

**Figura 52. Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA)..... 133**  
**Figura 53. Vacíos llenos con cemento asfáltico (%). ..... 134**

## ÍNDICE DE ECUACIONES

<i>Ecuación 1:</i> gravedad específica bulk. GSB .....	60
<i>Ecuación 2:</i> gravedad específica aparente, GSA.....	61
<i>Ecuación 3:</i> gravedad específica aparente, GSA.....	61
<i>Ecuación 4:</i> gravedad específica bulk del agregado .....	64
<i>Ecuación 5:</i> gravedad específica efectiva del agregado.....	65
<i>Ecuación 6:</i> gravedad específica teórica máxima de mezclas asfálticas.....	65
<i>Ecuación 7:</i> absorción de asfalto.....	66
<i>Ecuación 8:</i> contenido de asfalto de la mezcla.....	66
<i>Ecuación 9:</i> porcentaje de vma en mezcla compactada .....	67
<i>Ecuación 10:</i> porcentaje de vacíos de aire en mezcla compactada .....	67
<i>Ecuación 11:</i> porcentaje VFA en mezclas compactadas.....	68

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>Anexo 1:</b> Análisis granulométrico del agregado grueso.....	147
<b>Anexo 2:</b> Análisis granulométrico de agregado fino.....	148
<b>Anexo 3:</b> Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos.....	149
<b>Anexo 4:</b> Peso específico y absorción de agregados gruesos .....	150
<b>Anexo 5:</b> Gravedad específica y absorción de agregados finos.....	151
<b>Anexo 6:</b> Abrasión los ángeles al desgaste de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1 1/2") .....	152
<b>Anexo 7:</b> Determinación del porcentaje de partículas fracturadas en el agregado grueso .....	153
<b>Anexo 8:</b> Partículas chatas y alargadas en agregados.....	154
<b>Anexo 9:</b> Límite líquido, límite plástico e índice plástico.....	155
<b>Anexo 10:</b> Peso específico teórico máximo de mezclas asfálticas para pavimentos .....	156
<b>Anexo 11:</b> Resistencia de mezclas bituminosas a 140°C - clase A empleando el aparato Marshall .....	157
<b>Anexo 12:</b> Resistencia de mezclas bituminosas a 140°C – clase A con adición de zeolita empleando el aparato Marshall .....	166
<b>Anexo 13:</b> Resistencia de mezclas bituminosas a 130°C – clase A con adición de zeolita empleando el aparato Marshall .....	173
<b>Anexo 14:</b> Resistencia de mezclas bituminosas a 120°C – clase A con adición de zeolita empleando el aparato Marshall.....	180
<b>Anexo 15:</b> Resistencia de mezclas bituminosas a 100°C – clase A con adición de zeolita empleando el aparato Marshall .....	187
<b>Anexo 16:</b> Ensayo cantabro de pérdida por desgaste Marshall – clase A .....	194
<b>Anexo 17:</b> Resistencia de mezclas bituminosas a 140°C – clase B empleando el aparato Marshall .....	195
<b>Anexo 18:</b> Resistencia de mezclas bituminosas a 140°C – clase B con adición de zeolita empleando el aparato Marshall .....	204
<b>Anexo 19:</b> Resistencia de mezclas bituminosas a 130°C – clase B con adición de zeolita empleando el aparato Marshall .....	211

<b>Anexo 20:</b> Resistencia de mezclas bituminosas a 120°C – clase B con adición de zeolita empleando el aparato Marshall .....	218
<b>Anexo 21:</b> Resistencia de mezclas bituminosas a 100°C – clase B con adición de zeolita empleando el aparato Marshall .....	225
<b>Anexo 22:</b> Ensayo cantabro de perdida por desgaste Marshall – clase B .....	232
<b>Anexo 23:</b> Resistencia de mezclas bituminosas a 140°C – clase C empleando el aparato Marshall .....	233
<b>Anexo 24:</b> Resistencia de mezclas bituminosas a 140°C – clase C con adición de zeolita empleando el aparato Marshall .....	242
<b>Anexo 25:</b> Resistencia de mezclas bituminosas a 130°C – clase C con adición de zeolita empleando el aparato Marshall .....	249
<b>Anexo 26:</b> Resistencia de mezclas bituminosas a 120°C – clase C con adición de zeolita empleando el aparato Marshall .....	256
<b>Anexo 27:</b> Resistencia de mezclas bituminosas a 100°C – clase C con adición de zeolita empleando el aparato Marshall .....	263
<b>Anexo 27:</b> Ensayo cantabro de perdida por desgaste Marshall – clase C .....	270
<b>Anexo 28:</b> Especificaciones técnicas Petroperú .....	271

## **Resumen**

*La presente tesis realiza el análisis comparativo de los requerimientos exigidos por la metodología Marshall para mezclas asfálticas en caliente, entre una mezcla asfáltica convencional y una mezcla asfáltica modificada, por medio de adición del mineral Zeolita natural como porcentaje de filler y disminuyendo la temperatura de producción.*

*Se experimentó la mezcla asfáltica modificada con 5% de asfalto para la producción de especímenes a temperaturas de 140°C, 130°C, 120°C y 100°C para las clases A, B y C de vías, además el mineral Zeolita se añadió a la mezcla en porcentajes del 1%, 2% y 3%.*

*El tiempo de mezclado de una mezcla asfáltica convencional es de 2 minutos. El mineral Zeolita posee en su estructura interna un porcentaje de humedad del 2.93% el cual al entrar en contacto con la mezcla asfáltica libera el agua de su interior, esta característica de deshidratación se logra tras una mezcla de 5 minutos, tiempo en el que se puede apreciar la trabajabilidad de la mezcla y la homogeneidad de la misma.*

*Se concluye que el mineral Zeolita hace trabajable a la mezcla asfáltica reduciendo la viscosidad de esta a menores temperaturas de producción tras un mayor tiempo de mezclado y que los especímenes producidos con 2% de zeolita en las clases B y C se comporta mejor a temperaturas de 140°C, 130°C y 120°C cumpliendo con los requerimientos establecidos por la Norma CE.010 Pavimentos Urbanos.*

**Palabras clave:** Zeolitas, Marshall, Deshidratación, Mezcla asfáltica modificada, Filler.

## **Abstract**

*This thesis performs the comparative analysis of the requirements demanded by the Marshall methodology for hot asphalt mixtures, between a conventional asphalt mixture and a modified asphalt mixture, by means of the addition of the natural Zeolite mineral as a percentage of filler and decreasing the production temperature.*

*The modified asphalt mix was tested with 5% asphalt for the production of specimens at temperatures of 140°C, 130°C, 120°C and 100°C for the A, B and C class of roads, in addition the Zeolite mineral added to the mixture in percentages of 1%, 2% and 3%.*

*The mixing time of a conventional asphalt mixture is 2 minutes. The mineral Zeolite has in its internal structure a percentage of humidity of 2.93% which, when in contact with the asphaltic mixture releases the water inside, this characteristic of dehydration is achieved after a mixture of 5 minutes, time in which You can appreciate the workability of the mixture and the homogeneity of it.*

*It is concluded that the mineral Zeolite makes the asphalt mixture workable by reducing the viscosity of this at lower production temperatures after a longer mixing time and that the specimens produced with 2% of zeolite in classes B and C behave better at temperatures of 140°C, 130°C and 120°C complying with the requirements established by the CE.010 Urban Pavements Standard. Increasing the cost at 142.60 soles per cubic meter.*

**Key Word:** *Zeolites, Marshall, Dehydration, Modified asphalt mix, Fill*

## **I. INTRODUCCIÓN.**

Las exigencias y el tránsito en el Perú demandan de la construcción de miles de kilómetros de carreteras anualmente, constantemente vemos la construcción de nuevas vías y reconstrucción del pavimento.

El diseño de mezclas asfálticas en el Perú actualmente se basa en la metodología Marshall, su producción demanda de altas temperaturas las cuales emanan al medio ambiente gases tóxicos como el CO<sup>2</sup> y otros gases que aumentan el calentamiento global.

Esta investigación se enfocó en el estudio de nuevos materiales para la producción de mezclas asfálticas, objetivamente en estudiar la influencia del mineral Zeolita en el diseño de mezclas modificadas mediante la metodología Marshall, disminuyendo la temperatura de producción de la mezcla convencional.

La investigación obtuvo resultados del diseño de mezclas asfálticas mediante la metodología Marshall con disminución de la temperatura de producción, los resultados de los ensayos obtenidos se compararon con el diseño de una mezcla asfáltica convencional, buscando similares propiedades exigidas en los reglamentos, entre la mezcla convencional y la mezcla a menor temperatura con Zeolita.

### **1.1. Situación problemática.**

#### **1.1.1. Internacional.**

En El Salvador históricamente se han utilizado en proyectos de pavimentos flexibles dos tipos de mezclas asfálticas, en frío y en caliente. El tipo de mezcla asfáltica más utilizada ha sido la mezcla asfáltica en caliente, la cual consiste en una combinación de cemento asfáltico y agregados pétreos elevados a altas temperaturas para que éstos se puedan mezclar y así colocarse en obra. Las características de este tipo de asfalto que lo hacen muy ventajoso son la estabilidad, durabilidad, resistencia a la fatiga, la resistencia al deslizamiento y la rápida apertura al tráfico. Dentro de las mezclas asfálticas, también existen en el medio las mezclas asfálticas en frío, cuya elaboración puede realizarse a temperatura ambiente debido a la utilización de emulsión asfáltica para cubrir los agregados pétreos. Este tipo de mezcla asfáltica se caracteriza por permanecer trabajable durante semanas tras su fabricación y por ser viable su almacenamiento; pero, tiene la desventaja de no soportar un tráfico pesado y

que requiere de mayor tiempo para la apertura al tráfico por la evaporación del fluidificante. Méndez, Morán y Pineda (2014).

En Colombia, para la construcción de pavimentos nuevos y la rehabilitación de pavimentos existentes, en Colombia se ha acostumbrado a utilizar agregados nuevos, producto de la explotación de materiales pétreos y arenas de canteras que poseen las propiedades exigidas por las especificaciones técnicas establecidas para cada proyecto, establecidas por el Instituto Nacional de Vías (INVÍAS) o por el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU). Igualmente se utilizan para agregados pétreos del concreto asfáltico, los materiales provenientes de playas activas de río o de depósitos aluviales antiguos que cumplan con las exigencias de dichas especificaciones técnicas. Esas prácticas requieren una inversión económica alta y están provocando la alteración del ecosistema, por la afectación del lecho de los ríos y por la destrucción de la vegetación y las montañas de donde se extraen los materiales granulares. Para los procesos de explotación, trituración y selección de los agregados pétreos se requieren grandes consumos de energía. También es necesario tomar medidas preventivas para evitar daños al medio ambiente que se pueden presentar durante la explotación y producción de estos materiales. Benítez, Mauricio y Araujo (2015).

Las mezclas asfálticas en caliente, utilizadas hoy en día en la construcción de pavimentos en Colombia, son generalmente del tipo MD\_19 y se fabrican con asfalto 60/70 a temperaturas que oscilan entre 135° C y 180° C, lo cual está contribuyendo significativamente al calentamiento global, está afectando la salud de los trabajadores encargados de la manipulación de estas mezclas y está acarreando altos costos económicos por el elevado consumo de energía. Benítez et al. (2015).

### **1.1.2. Nacional.**

Las calles y avenidas de la ciudad de Trujillo presentan baches, los cuales son causas del deterioro de los pavimentos, esto resulta catastrófico y viene causado malestar de los transportistas y propietarios de vehículos particulares que se ven afectados por la poca serviciabilidad que presentan las vías ya que son de inminente peligro para ellos y sus unidades. El estado calamitoso del asfalto salta a la vista, las pistas en estado crítico se encuentran en las avenidas América Sur, Federico Villarel, Victor Larco. (Moreno, 2013).

La infraestructura vial en el Perú consta de 130 rutas distribuidas en 3 ejes longitudinales, 22 ejes transversales, variantes y ramales, pero de toda esta red, el 60% se encuentra pavimentada, en las cuales existe deficiencia en cuanto a la serviciabilidad que ofrecen. Estas carreteras en su mayoría son diseñadas utilizando mezcla asfáltica en caliente, las cuales como ya mencionado generan contaminación en el medio ambiente debido a la emisión de gases que genera, consume combustibles y alta energía en su elaboración, además que en su aplicación hay requerimientos estrictos como la temperatura a la cual debe llegar a obra, requerimientos a los cuales siempre se les presenta obstáculos y se concluye en un pavimento de baja calidad, es necesario utilizar una nueva tecnología la cual nos brinde mejores capas asfálticas, con reducido nivel de contaminación y más económico que el asfalto en caliente. Ministerio de Transportes y comunicaciones [MTC], 2013.

### **1.1.3. Local.**

En la región Lambayeque no existe estudios con el mineral Zeolita, la explotación de este mineral en la región de Arequipa – Perú, permite la evaluación de este mineral en nuestra región (Lambayeque) con el fin de producir y evaluar nuevos materiales que permitan el desarrollo de la región.

## **1.2. Formulación del problema.**

¿Influye la zeolita en el diseño de mezclas asfálticas convencionales, mediante la metodología Marshall?

## **1.3. Objetivos.**

### **Objetivo general.**

Analizar la influencia de la zeolita en el diseño de mezclas asfálticas convencionales, mediante la metodología Marshall.

## **Objetivos específicos.**

1. Diseñar una mezcla asfáltica en caliente mediante la metodología Marshall.
2. Estudiar las propiedades de la zeolita como filler (humedad).
3. Elaborar mezclas asfálticas con el diseño patrón y adición de Zeolita a temperaturas de 140°C, 130°C 120°C y 100°C mediante la metodología Marshall.
4. Evaluar los resultados de la elaboración de mezclas asfálticas en caliente (140°C) con las mezclas asfálticas modificadas con adición de zeolita.
5. Costear a nivel de laboratorio la elaboración del diseño de mezcla asfáltica con adición de zeolita.

### **1.4. Justificación.**

#### **1.4.1. Justificación ambiental.**

En el desarrollo de nuevos materiales encontramos la mezcla asfáltica modificada, el producto obtenido bajo este concepto cumple con lo establecido por el Protocolo de Kyoto que pretende reducir los gases de efecto invernadero que son lanzados a la atmósfera, pudiendo hacer reemplazable a la mezcla asfáltica caliente que se usa de forma convencional. En la actualidad la producción de mezclas asfálticas en el Perú, se limita únicamente a las mezclas asfálticas en caliente, por lo que se pretende introducir el uso de mezclas asfálticas modificadas, la cual es una técnica usada en varios países. (Abril, 2011). Mezclas asfálticas tibias (MAT). Pitra: Programa de infraestructura del transporte, 02(15), 02.

#### **1.4.2. Justificación económica.**

El mineral zeolita se caracteriza a menudo por un alto grado de hidratación, gran volumen de vacíos y baja densidad cuando están deshidratadas, estabilidad de la estructura cristalina, características de intercambio iónico, conductividad eléctrica, adsorción de vapores y gases, características catalíticas (Breck, 1974).

#### **1.4.3. Justificación científica.**

La investigación es conveniente desde el punto de vista científico y contribuirá el uso de estas mezclas asfálticas a menores temperaturas con las siguientes ventajas: facilidad para el trabajo fuera de la estación climática, el tiempo de almacenaje y transporte se incrementa, reducción de segregación térmica, menor riesgo en los trabajadores, menor endurecimiento

físico del asfalto, menor envejecimiento del asfalto, incremento en la trabajabilidad de la mezcla, menor velocidad de enfriamiento, menor tiempo para la apertura al tránsito. (Breck, 1974).

#### **1.4.4. Justificación social.**

La creación de nuevas tecnologías permite el desarrollo de continuo de la sociedad, impulsando al crecimiento de la comunidad y la interrelación de regiones del país para colaborar y compartir experiencias y conocimientos que ayuden al crecimiento en sociedad. (Breck, 1974).

#### **1.5. Antecedentes de investigación.**

El mundo ha ido avanzando tecnológicamente en el diseño de nuevas mezclas asfálticas con el fin de disminuir la contaminación y mejorar el producto, actualmente se ha estudiado el uso de zeolita natural, la cual nos ofrece una mezcla asfáltica modificada con una serie de ventajas en relación a la mezcla asfáltica en caliente. La presente investigación tiene como referencias:

Tacha, Huertas y Arévalo (2014). En su tesis de pregrado Diseño de una mezcla de asfalto en caliente MSC-25 reciclada modificada con zeolita sintética. Proponen diseñar una mezcla de asfalto tibia (MSD – 25) RAP Modificada con un aditivo denominado Zeolita Sintética, el cual permite reducir la temperatura de producción de la mezcla y la viscosidad del asfalto. Su investigación se basa en un diseño de una mezcla asfáltica que consiste en una serie de etapas de tipo experimental en el laboratorio, donde clasifican la mezcla teniendo en cuenta los diferentes parámetros como recolección de materiales diferenciados por su granulometría y una mezcla asfáltica en caliente con una proporción de vacíos del 6 % y el 10 %, realizando el ensayo de Marshall en una mezcla de asfalto en caliente msc-25 reciclada modificada obtuvieron el asfalto optimo y al implementarle el adictivo como lo es la zeolita sintética se obtiene que la mezcla se rigidiza más rápidamente porque disminuyes los vacíos que se presentan en las mezclas convencionales. Ensayos de las mezclas con y sin aditivos, con diferentes porcentajes de RAP DEL 20%, 30%, 40%, Y 50%, según los resultados obtenidos mostraron que la mezcla con mejor comportamiento es la que contiene aditivo y un 50% de RAP, concediéndole a la mezcla mayor rigidez y mayor resistencia, lo que ocasiona la

reducción de agregado pétreo natural nuevo se reduzca y por ende disminuya también la explotación ambiental de canteras.

Costa (2014) en el 22° Symposium Nacional de Vías y Obras de la Administración Local (VYODEAL) indica. Las mezclas semicalientes se fabrican y ponen en obra entre 120 y 135°C y están basadas en la utilización de betunes asfálticos que mediante la incorporación de algún tipo de aditivo de distintas naturalezas disminuyen la viscosidad y mejoran la “mojabilidad” del árido mediante espumado del betún o bien mediante alguna modificación en el proceso de fabricación. Su estudio se basa en la en la introducción, en el proceso de fabricación de la mezcla bituminosa, de un producto especial, generalmente un filler hidrofílico (que retiene agua en su interior). El más utilizado es la zeolita sintética (aluminosilicato muy poroso) que en su forma cristalina retiene en su interior, hasta un 25% de agua, de manera que al añadirse en pequeñas cantidades, alrededor del 0,3% en peso de árido, a los áridos calientes, un poco antes de añadirse el betún, se libera el agua en forma de vapor que en contacto con el ligante produce el espumado del betún, permitiendo así la envuelta y el manejo de la mezcla asfáltica a temperaturas sensiblemente inferiores a las normales para las mezclas en caliente. Llegando a las conclusiones que es una buena solución para las necesidades medio ambientales actuales: reducción de temperaturas de fabricación y puesta en obra. Menor emisión de gases. Menor consumo de combustibles además que disminuye el envejecimiento inicial del ligante al trabajar a una temperatura menor, mejorando sus prestaciones mecánicas y la vida útil de la capa del firme así construida.

Alonso, Tejada, Moreno, Rubio y Medel (2013). En su artículo Estudio de laboratorio sobre utilización de zeolita natural versus zeolita sintética en la fabricación de mezclas semicalientes. Indican dos formas de reducir la temperatura, mediante la producción en planta o con el empleo de aditivos, para la obtención de mezclas semicalientes. Para ello usaron un estudio comparativo de estabilidad Marshall, módulos de rigidez y sensibilidad al agua. Obteniendo un similar comportamiento entre las mezclas con zeolita natural y las mezclas con zeolita sintética, además evaluaron la influencia de adición como filler y arena en diferentes porcentajes en la mezcla. Llegando a la conclusión que el aporte de zeolita natural como filler (ahorro del aditivo) es lo más adecuado para mezcla, ya que como arena sus resultados no son significativamente superiores. Los mejores resultados del Marshall y sensibilidad de agua (ITSR) fueron para la adición de 0.6% de filler de zeolita. Debe

determinarse la cantidad óptima de zeolita en la mezcla para controlar el aporte de agua en el proceso de espumación, evitando que afecte negativamente al comportamiento de la mezcla.

Gil y Sánchez (2011). En la VI Jornada Nacional de ASEFMA. Sustentan la fabricación de mezclas bituminosas con el empleo de zeolitas, ya que debido a la estructura que poseen son capaces de absorber agua, la cual produce la espumación del betún y en consecuencia la reducción de la viscosidad de la mezcla asfáltica, reduciendo las temperaturas de trabajo y concluyendo que las zeolitas utilizadas como aditivo presentan una mayor trabajabilidad al disminuir las temperaturas de fabricación y compactación comparadas con la mezcla de referencia, produciendo mezclas con menor rigidez. El uso de estos compuestos ha mejorado la resistencia a tracción, tanto de las probetas secas como húmedas y, por tanto, del %ITSR de la mezcla a temperaturas de fabricación y compactación de 140°C y 120°C, aunque sin llegar a cumplir las especificaciones ya que este parámetro es menos sensible al reducir las temperaturas de fabricación cuando empleamos los aditivos.

## **1.6. Marco teórico.**

Las mezclas asfálticas son diseñadas en laboratorio con procedimientos empíricos, por lo que se requiere la experiencia en campo para verificar si el análisis de laboratorio tiene correlación con el desempeño del pavimento. De cualquier manera, aun con la correcta unión de estos procedimientos y con buenos criterios de diseño de la mezcla, no se podrían asegurar altos grados de desempeño.

### **1.6.1. Materiales pétreos.**

1.6.1.1. *Importancia del agregado en una mezcla asfáltica.* (Crespín, Santa Cruz, y Torres, 2012, p. 16). En el diseño de una mezcla asfáltica en caliente los agregados pétreos y el asfalto son materiales indispensables que en este caso se usó asfalto de tipo PG; los agregados por su parte al conformar entre el 90 y el 95 por ciento en peso de la mezcla asfáltica y el 75 a 85 por ciento de su volumen son de gran importancia, siendo estos los determinantes de la calidad y capacidad de carga de la carpeta, es por eso la importancia de selección y manejo de los materiales pétreos a utilizar para elaborar una mezcla asfáltica, principalmente con una buena distribución granulométrica por lo que pueden generar cambios significativos en la elaboración de mezclas asfálticas, por lo tanto es indispensable

llevar un control eficiente de los agregados que se está usando en la planta de producción de mezcla lo cual puede comprender:

- Control de la calidad del agregado producido en la planta.
- Buena distribución granulométrica de los agregados.
- Alimentación en frío de agregados.

El control de la calidad del agregado usado viene a ser un factor crítico para el comportamiento de una carpeta de concreto asfáltico, además de la calidad también se aplican otros criterios que forman parte de la selección de un agregado en una obra de pavimentación, los cuales incluyen el costo, la disponibilidad del agregado su origen y, además, deberá cumplir con ciertas propiedades establecidas para la elaboración de concreto asfáltico de buena calidad.

1.6.1.2. *Definición de agregado.* Son materiales sólidos e inertes granulares que se emplean en los firmes de las carreteras con o sin adición de elementos activos y con granulometrías adecuadas, se producen elementos artificiales resistentes y mediante su mezcla con materiales aglomerantes de activación hidráulica (cementos, cales, etc.) o con ligantes asfálticos. (Crespín, et al., 2012, p. 17).

1.6.1.3. *Tipos de agregados pétreos.* Estos se pueden clasificar de acuerdo a la procedencia y a la técnica usada para su extracción. (Crespín, et al., 2012, p. 17).

1.6.1.3.1. *Agregados naturales.* Son los utilizados únicamente después de haber sido modificados por su distribución de tamaños. (Crespín, et al., 2012, p. 17).

1.6.1.3.2. *Agregados artificiales.* Son aquellos que provienen de procesos industriales, como también ciertas escorias o materiales procedentes de demoliciones. (Crespín, et al., 2012, p. 17).

1.6.1.3.3. *Agregados de trituración.* Obtenidos de la trituración de rocas de cantera cuyas propiedades físicas sean apropiadas o de las granulometrías de rechazo de los agregados naturales. (Crespín, et al., 2012, p. 17).

1.6.1.3.4. *Agregados marginales.* Son todos los materiales cuyas propiedades no cumplen con los requerimientos. (Crespín, et al., 2012, p. 17).

#### 1.6.1.4. *Clasificación de los agregados de acuerdo a su tamaño.*

1.6.1.4.1. *Agregados gruesos.* Según el Sistema de Clasificación de Suelos SUCS, el agregado grueso se define a la parte que queda retenido en el tamiz #4. Y según la normativa europea UNE-EN 933-2., se define como agregado grueso, a la parte del agregado pétreo total que queda retenido en el tamiz N°4. (Padilla, 2004, cap.2, pp. 11-13)

La granulometría es la característica física principal y fundamental de todo conjunto de partículas porque influye de forma muy importante en la resistencia mecánica del conjunto (esqueleto mineral). Normalmente se utilizan granulometrías sensiblemente continuas, a fin de conseguir la máxima compacidad del conjunto, aunque también se emplean granulometrías discontinuas en el caso de algunas mezclas asfálticas. Para encajar una granulometría dentro de algún Huso normalizado se parte de fracciones uniformes que se mezclan en las proporciones adecuadas. Los análisis granulométricos se realizan por tamizado; el procedimiento es análogo al que se emplea para suelos. El tamaño máximo de los agregados viene normalmente limitado por consideraciones relativas al espesor de la capa extendida, trabajabilidad, segregación, etc. Por otra parte, la influencia de las partículas finas obliga normalmente a limitar su porcentaje y su plasticidad. En las mezclas asfálticas tiene una especial importancia la fracción de tamaño inferior a  $63\mu\text{m}$ , llamada, como se ha indicado, polvo mineral o fíller, pues algunas características relevantes de la mezcla dependen del mástico formado por la unión del polvo mineral y del ligante asfáltico. La resistencia a la deformación o capacidad de soporte de una capa de firme depende esencialmente del rozamiento interno del esqueleto mineral y, en su caso, de la cohesión que proporciona el eventual ligante o conglomerante. El rozamiento interno aumenta con partículas angulosas y de textura superficial áspera como por ejemplo los agregados triturados. También influye de forma importante la granulometría del agregado y el porcentaje de huecos del material compactado. A mayores densidades corresponden generalmente mayores resistencias mecánicas, por lo que la compactación es un factor de primer orden. (Crespín, et al., 2012, pp. 19-20).

La cohesión debe confiarse exclusivamente al ligante asfáltico o conglomerante. La cohesión entre las partículas suele ser despreciable, y cuando existe se debe únicamente a la plasticidad de la fracción fina, y en general es más nociva que útil. Sólo interesa una cierta plasticidad de los finos y muy reducida de todas formas, cuando se trata de capas granulares

no revestidas en caminos de baja intensidad de tráfico. El desplazamiento de las partículas en el interior del pavimento es controlado gracias a la angulosidad del agregado grueso esto gracias al rozamiento interno generado entre las partículas minerales, es así que el uso de agregados triturados aumenta la angulosidad de las partículas. En la actualidad esta característica es controlada por las normativas indicando un valor mínimo de angulosidad según el tipo de carretera. Las exigencias de forma para el agregado grueso varían ligeramente, con un mismo tráfico, para las mezclas asfálticas. Lo ideal es que las partículas presenten formas cuboides, evitando o restringiendo las formas planas, alargadas y en forma de lajas, ya que como lo hemos dicho antes, este tipo de forma es muy susceptible a quebrarse bajo condiciones de carga de tráfico, lo que modifica las granulometrías y las propiedades iniciales de las mezclas. (Crespín, et al., 2012, pp. 21-22).

Existen restricciones en las normativas de materiales para pavimentos en donde se restringe el uso de partículas con estas formas no deseadas, por medio de los índices de lajas y de agujas de las distintas fracciones del árido grueso. Los agregados pétreos deben de cumplir con un cierto mínimo de resistencia a la fragmentación o al desgaste, lo que da una orientación del comportamiento que tendrá dicho agregado dentro de la mezcla asfáltica al entrar en servicio el pavimento. En el ensayo de Pulimento Acelerado, determina el grado de pulimento del agregado o coeficiente de pulido acelerado con el mismo péndulo de fricción con el que se mide el coeficiente de rozamiento en una superficie de rodadura. El coeficiente de pulido acelerado depende fundamentalmente de la naturaleza petrográfica de la roca origen, fue diseñado como un medio para predecir la susceptibilidad de una piedra al pulido cuando se utiliza como ya lo hemos dicho en la capa de rodadura de un pavimento flexible. El agregado grueso deberá estar libre de terrones de arcilla, marga, materia vegetal u otras materias extrañas que afecten a la durabilidad de la capa. El contenido de impurezas del agregado grueso, según las normativas deberá ser mínimo, algo muy aproximado al cinco por mil (0,5%) en masa. Aunque se podrá exigir su limpieza por lavado, aspiración u otros, y realizando una nueva comprobación. La exigencia anterior podría cuestionarse considerando que en las plantas asfálticas modernas existen poderosos sistemas para extraer el polvo e impurezas del agregado. Sin embargo, en una secuencia lógica de exigencias de calidad y prevenciones, la limpieza inicial del agregado está totalmente justificada. El agregado grueso tiene un comportamiento específico respecto a la adhesividad y a la resistencia al desplazamiento. Se preconiza la comprobación de la adhesividad agregado –

ligante mediante una evaluación global de resistencia conservada en los ensayos de inmersión – compresión, o de pérdida por abrasión en el ensayo Cántabro. Estos criterios se refieren obviamente a las propiedades de las mezclas terminadas más que a la caracterización inicial de los materiales simples: agregados y ligantes. En cualquier circunstancia se comprobará la adhesividad agregado–ligante mediante la caracterización de la acción del agua. Se enmarcan unos parámetros mínimos en los valores de inmersión – compresión según el tipo de mezcla asfáltica a utilizar. Se podrá mejorar la adhesividad entre el agregado y el ligante asfáltico mediante activantes o cualquier otro producto sancionado por la experiencia. Se establecerán las especificaciones que tendrán que cumplir dichos aditivos y las mezclas resultantes. (Crespín, et al., 2012, pp. 23-24).

*1.6.1.4.2. Agregados finos.* Según el Sistema de Clasificación de Suelos SUCS, el agregado fino se define como el material que pasa el tamiz #4 y queda retenido en el tamiz #200. Y según la normativa europea UNE-EN 933-2, el agregado fino se define como el material que pasa el tamiz N°4. y queda retenido en el tamiz N°200. El agregado fino deberá proceder de la trituración de piedra de cantera o grava natural en su totalidad, o en parte de yacimientos naturales. Existen limitaciones en la proporción de agregado fino no triturado a emplear en las mezclas. Regularmente se emplea arena natural en la elaboración de mezclas asfálticas que van a ser empleadas en pavimentos con una baja intensidad de tráfico y a bajos niveles de cargas, se deberá señalar la proporción máxima de arena natural no triturada, a emplear en la mezcla, la cual regularmente no será superior al 10% de la masa total del agregado combinado y sin que supere el porcentaje de agregado fino triturado empleado en la mezcla, la limitación de la cantidad de arena rodada o no triturada que puede incorporarse a la mezcla, se hace por temor a una disminución de la rigidez final de esta. Hay autores y administraciones que consideran que una proporción del orden del 10% puede mejorar al tiempo la manejabilidad, la compacidad e incluso la estabilidad de la mezcla. El agregado fino deberá estar libre de terrones de arcilla, margas, materia vegetal, u otras materias extrañas, evitando malos comportamientos dentro de la mezcla, pérdida de estabilidad de la mezcla, tales como reacciones químicas, entre otros. El material triturado con el fin de obtener agregado fino debe cumplir condiciones exigidas al agregado grueso sobre el coeficiente de desgaste Los Ángeles. Se recomienda buscar un agregado fino con mejores características y que estas mejoren la propiedad de adhesividad, pero en cualquier caso procederá con coeficientes de desgaste de Los Ángeles inferior a 30 para capas de base y a

25 para capas de rodadura e intermedias. Respecto a los fenómenos de adhesividad agregado fino – ligante, teniendo en cuenta que las acciones químicas o químico – físicas son más complejas en las partículas de menor tamaño. La sensibilidad a toda clase de transformaciones químicas, fenómenos polares y de adhesividad, absorción, etc., están dadas por la facilidad para acumular humedad, mayor superficie específica y gran heterogeneidad. (Padilla, 2004, cap. 2, pp. 13-14).

*1.6.1.4.3. Polvo mineral (filler).* Según el Sistema de Clasificación de Suelos SUCS, el polvo mineral se define al agregado total que pasa el tamiz #200. Y según la normativa europea UNE-EN 933- 2., a la parte del agregado total que pasa el tamiz N°200. El fíller o polvo mineral es un producto de aportación es de naturaleza pulverulenta (cemento normalmente o cenizas volantes de central térmica) o un polvo en general calizo, preparado especialmente para ser usado en mástico de mezclas asfálticas. Cuando se trata de un producto comercial, se garantiza perfectamente su control y se conocen sus propiedades tanto físicas como químicas y su futuro comportamiento en la mezcla. Cuando se utiliza el otro tipo de filler, (de recuperación), que es aquel que se obtiene de las plantas asfálticas, no se sabe exactamente cuáles son sus componentes y en ocasiones varía su composición con el tiempo y puede estar o no, dentro de las normativas, debido a que es un residuo. (Padilla, 2004, cap. 2, p. 14).

Las características que más suelen interesar de un polvo mineral son:

*Finura.* La función del polvo mineral es rellena, y depende del volumen de vacíos existente luego de compactado la estructura granular y en función de la granulometría y de las partículas de mayor tamaño. De esta manera al ocupar los espacios libres dejados por la estructura granular compactada y conformada por las partículas de mayor tamaño, reduce el volumen de vacíos de la mezcla evitando el aumento en el porcentaje del ligante asfáltico usado. (Padilla, 2004, cap. 2, pp. 15-16).

La densidad aparente del polvo mineral en Tolueno es una medida relativa del grado de finura del polvo, cualidad muy importante para las características finales de las mezclas. La densidad aparente del polvo mineral, en algunas normas aparece comprendida entre cinco y ocho decigramos por centímetro cúbico (0,5 a 0,8 g/cm<sup>3</sup>). (Padilla, 2004, cap. 2, pp. 15-16).

La magnitud de la resistencia de la mezcla a la deformación es incrementada por el polvo mineral, sin modificar la viscosidad del ligante, consecuentemente originando en las mezclas asfálticas un aumento a la resistencia al corte. (Padilla, 2004, cap. 2, pp. 15-16).

Acción estabilizante frente al agua. Se incrementa la durabilidad de las mezclas asfálticas frente a la intervención del agua por lo que se reduce la porosidad de la estructura granular de forma parcial evitando el acceso del agua al interior, y por otro lado debido a que algunos polvos minerales presentan una mayor afinidad con el ligante asfáltico, mejoran la resistencia a la acción de desplazamiento que ejerce el agua sobre el ligante asfáltico. Las características de finura y comportamiento reológico se hayan vinculadas el tamaño y forma de las partículas. La acción estabilizante frente al agua depende además del tamaño y forma de las partículas, de la composición química de los rellenos minerales. Las funciones del polvo mineral no pueden apartarse del contenido y consistencia del ligante asfáltico en la mezcla. (Padilla, 2004, cap. 2, pp. 15-16).

Procedencia del polvo mineral. El polvo mineral podrá proceder de los agregados, separándose de ellos por medio de los ciclones de la central de fabricación, o aportarse a la mezcla por separado de aquéllos como un producto comercial o especialmente preparado. Las proporciones del polvo mineral de aportación a emplear en la mezcla deben cumplir lo que fijen las normas, debido a que es un material que se debe de utilizar en proporciones adecuadas en cada tipo de mezcla y condiciones, para obtener un resultado óptimo. (Padilla, 2004, cap. 2, pp. 15-16).

El polvo mineral que quede inevitablemente adherido a los agregados tras su paso por el secador de la planta de asfalto en ningún caso podrá rebasar ciertos límites que algunas normas contienen, este valor está aproximadamente dentro del dos por ciento (2%) de la masa de la mezcla. Si se asegurase que el polvo mineral procedente de los agregados cumple las condiciones exigidas al de aportación, se podrá rebajar la proporción mínima de éste. (Padilla, 2004, cap. 2, pp. 15-16).

Propiedades del polvo mineral como componente de las mezclas asfálticas.

En la interfase filler-asfalto y en el comportamiento de la mezcla asfáltica, tienen que ver las propiedades físicas y químicas como, propiedades de adhesión, adsorción, superficie, etc. (Padilla, 2004, cap. 2, pp. 16-17).

La forma, angulosidad y textura de superficie (irregularidad geométrica), el filler viene a ser un papel importante dentro de la mezcla asfáltica. Afectando la irregularidad geométrica de forma directa al contenido óptimo de asfalto de la mezcla, a las características de interfase del mástico y a su comportamiento reológico. Todos estos aspectos influyen directamente en el comportamiento estructural y mecánico de las mezclas. La irregularidad geométrica se puede evaluar cualitativamente y cuantitativamente mediante el microscopio electrónico, y caracterizar la forma, angulosidad, textura superficial y la porosidad accesible de las partículas. (Padilla, 2004, cap. 2, pp. 16-17).

Para la caracterización físico-química del filler y su influencia en el comportamiento y durabilidad de las mezclas asfálticas, el factor más significativo es la intensidad de adsorción. En los sistemas filler-asfalto, existe adsorción entre un sólido y una fase viscosa, los factores que influyen más en el mecanismo de adsorción son la composición del asfalto y las propiedades del filler, es decir, su composición mineralógica, sus características estructurales, la textura superficial y la superficie específica, el tipo de adsorción depende del tipo de filler principalmente, todos los procesos de adsorción son exotérmicos y la cantidad de calor liberado depende del carácter de la interacción entre los átomos y moléculas adsorbidos y de la superficie del sólido. (Padilla, 2004, cap. 2, pp. 16-17).

El efecto que se logra en un pavimento a partir de la utilización de un filler activo en la dosificación de la mezcla asfáltica, es que aumenta considerablemente su durabilidad. Existen fillers activos como cal hidratada y dolomítica que suelen mantener su resistencia en periodos de tiempo largos de tiempo en condiciones de contenido óptimo de asfalto, mientras que los filler no activos como basaltos y areniscas suelen deteriorarse rápidamente, también bajo condiciones de contenido óptimo de asfalto. (Padilla, 2004, cap. 2, pp. 16-17).

El contenido de asfalto tiene sus repercusiones en la durabilidad de una mezcla, se sabe que un incremento en el contenido de asfalto tiene un efecto favorable significativo en la durabilidad de los pavimentos, este efecto se debe principalmente, a que las capas de asfalto que recubren los agregados son más gruesas y a la reducción en el volumen de huecos, que hace disminuir la penetración del agua a las capas. La mejora en la durabilidad con el incremento de contenido de asfalto no es uniforme debido a que depende del tipo de filler involucrado en la mezcla. (Padilla, 2004, cap. 2, pp. 16-17).

Las propiedades de los fíller tienen un efecto muy importante en la durabilidad potencial de las mezclas asfálticas, el efecto del fíller suele manifestarse, si es activo suele mantener resistencia por más tiempo que si no es activo. (Padilla, 2004, cap. 2, pp. 16-17).

La durabilidad potencial de la mezcla asfáltica suele mejorar con un incremento en el contenido de asfalto por encima del óptimo básico, es decir las condiciones óptimas de durabilidad se obtienen para contenidos de asfalto superiores al óptimo convencional, en este caso las muestras con fíller no activos resultan ser más sensibles al contenido de asfalto que en aquellas que contienen filler activos. (Padilla, 2004, cap. 2, pp. 16-17).

1.6.1.5. *Consideraciones de los agregados pétreos.* Cuando se pretende hacer uso de los agregados pétreos para la construcción de pavimentos se deben considerar algunos aspectos fundamentales para su buen desempeño a la hora de formar parte en alguna de las capas del firme y principalmente en la elaboración de las mezclas asfálticas. (Padilla, 2004, cap. 2, p. 7).

1.6.1.6. *Naturaleza e identificación.* Evaluación de la naturaleza petrográfica de los agregados, grado de alteración de los componentes minerales, porosidad y propiedades químicas. (Padilla, 2004, cap. 2, p. 7).

1.6.1.7. *Propiedades geométricas.* Principal y básicamente la forma y angulosidad de las partículas; con relación al conjunto del esqueleto mineral se estudia la distribución granulométrica. (Padilla, 2004, cap. 2, p. 7).

1.6.1.8. *Propiedades mecánicas.* Engloban los parámetros básicos de resistencia al desgaste y al pulimento. (Padilla, 2004, cap. 2, p. 7).

1.6.1.9. *Ausencia de impurezas.* Es fundamental que los agregados a emplear en la construcción de pavimentos estén libres de impurezas capaces de afectar el buen comportamiento de las capas. El empleo de agregados sucios en la construcción de un pavimento, puede ser una causa suficiente para provocar su degradación. (Padilla, 2004, cap. 2, p. 7).

1.6.1.10. *Inalterabilidad.* Es imprescindible la evaluación de las posibles degradaciones que puedan sufrir los agregados pétreos que se van a utilizar en una obra; así, los materiales

evolutivos han de ser empleados con especiales precauciones para evitar comportamientos anómalos que puedan afectar la vida útil de las capas. (Padilla, 2004, cap. 2, p. 7).

1.6.1.11. *Adhesividad*. Los agregados pétreos han de ser afines con los ligantes asfálticos que vayan a ser empleados en la construcción del pavimento, y en caso de problemas de afinidad, será necesario el uso de activantes, para garantizar el buen comportamiento de las mezclas asfálticas. (Padilla, 2004, cap. 2, p. 7).

1.6.1.12. *Propiedades de los agregados pétreos*.

1.6.1.12.1. *Graduación*. Todas las especificaciones normadas de pavimento asfáltico de mezcla en caliente solicitan parámetros en las cuales requieren que los agregados se encuentren en ciertos tamaños y estos en determinadas proporciones, llamada usualmente graduación del agregado o graduación de la mezcla. Para esto es necesario saber como se mide el tamaño de las partículas y entender la gradación para determinar si cumple con las especificaciones requeridas. (Crespín, et al., 2012, pp. 37-46).

1.6.1.12.2. *Tamaño máximo de la partícula*. El tamaño máximo de las partículas se determina luego de un análisis granulométrico y estos resultados deben estar en los requisitos establecidos en las especificaciones dependiendo al uso.

1.6.1.12.3. *Tamaño máximo nominal del agregado*. Se conoce como tamaño máximo nominal del agregado al material retenido en el primer tamiz con más del 10% del total de partículas del agregado.

1.6.1.12.4. *Limpieza*. En obra las especificaciones usualmente tienen un límite a los tipos y cantidades de materiales indeseables en el agregado (vegetación, partículas blandas, arcilla esquistosa, terrones de arcilla, etc.). El comportamiento del pavimento es afectado por cantidades excesivas de estos materiales. La limpieza del agregado se determina, mayormente mediante inspección visual, pero un tamizado por lavado según la norma AASHTO T 11-97 (2000) u ASTM 117-95 (donde el peso de la mezcla es comparado antes y después de ser lavado) genera una medida exacta del porcentaje de material indeseable más fino que 0.075 mm (No. 200). El Ensayo “Finos Plásticos en Agregados Graduados y Suelos por el Uso del Ensayo del Equivalente de Arena” (AASHTO T 176-02) determina el

porcentaje indeseable de polvo fino y arcilla del agregado que pasa el tamiz de 4.75 mm (N° 4). (Crespín, et al., 2012, pp. 37-46).

*1.6.1.12.5. Dureza.* Con capacidad de resistir la abrasión (desgaste irreversible), degradación en planta, colocación, compactación y durante la vida de servicio del pavimento. En la estructura del pavimento los agregados expuestos o superiores deben de tener mayor resistencia que los inferiores ya que los superficiales conforman la carpeta de rodadura del pavimento y estarán expuestas a constantes cargas del tránsito. El Ensayo de Desgaste de Los Ángeles (AASHTO T 96-2002, o ASTM C-131-2001) mide la resistencia de un agregado al desgaste y a la abrasión.

*1.6.1.12.6. Forma de la partícula.* Esta característica afecta en la trabajabilidad de la mezcla a pavimentar durante su colocación, así como para alcanzar la densidad requerida con la fuerza necesaria para compactar. La vida útil del pavimento también es afectada en su resistencia de la estructura. El desplazamiento o movimiento es resistido por las partículas irregulares y angulares debido a que al ser compactadas tienden a entrelazarse. Esta característica generalmente la tienen las partículas de bordes puntiagudos y de forma cúbica, producidas en su mayoría por trituración. La resistencia es proporcionada por las partículas gruesas (grandes) de agregado en el pavimento y provienen generalmente de piedra o grava triturada. La trabajabilidad la proporcionan las partículas finas de agregado en la mezcla y provienen generalmente de arenas naturales. Para medir en laboratorio la forma de las partículas la prueba más utilizada es conocida como “cubicidad de las partículas” (Normas: ASTM D 692). Comprende también el procedimiento de laboratorio para determinar las partículas chancadas (caras fracturadas), lajeadas y rodadas de la fracción retenida en el tamiz N° 4 (4.75 mm). (Crespín, et al., 2012, pp. 37-46).

*1.6.1.12.7. Textura superficial.* La textura superficial de las partículas de agregado conforma otro factor muy importante que no solo determina la trabajabilidad y resistencia final de la mezcla de pavimentación, sino que también características como la resistencia al deslizamiento en la superficie de rodadura del pavimento siendo considerada así por algunos expertos más importante que la forma de la partícula. Un aspecto de textura áspera, como una lija de papel, evita que las partículas se muevan unas respecto a otras aumentando así la resistencia en el pavimento, y a la vez hace que el movimiento del tránsito sea más seguro proporcionando un coeficiente más alto de fricción superficial.

Las gravas naturales son usualmente trituradas (Este proceso genera texturas superficiales rugosas en las caras fracturadas, así como cambios en la forma de la partícula) durante su extracción, debido a que generalmente contienen superficies lisas. Generando así que las películas de asfalto se adhieran con mayor facilidad en superficies rugosas.

Para evaluar la textura superficial no existe un método directo por lo que viene a ser una característica como la forma de la partícula, pero que si se reflejada en los resultados de los ensayos de resistencia y trabajabilidad de la mezcla durante la construcción.

*1.6.1.12.8. Capacidad de absorción.* Normas: (Agregado grueso: AASHTO T 85-91 y ASTM C 127-88 (1993). Agregado fino: AASHTO T 84-00 y ASTM C 128-97).

Los agregados son porosos por su naturaleza, unos más que otros. lo cual se determina con la cantidad de líquido que absorbe un agregado cuando es sumergido en un baño, determinando así su porosidad.

Obtener información de la capacidad del agregado de absorber agua (o asfalto) es un punto muy importante: si un agregado tiene un porcentaje alto de absorción significa que continuará absorbiendo asfalto luego del mezclado inicial en la planta, disminuyendo así la cantidad de asfalto en su superficie para ligar las demás partículas de agregado. Debido a esto, un agregado poroso no es recomendable porque requiere cantidades mucho mayores de asfalto que las que requiere un agregado menos poroso.

Solo se usarán agregados altamente porosos y absorbentes cuando estos posean otras propiedades que los hagan deseables, a pesar de su alta capacidad de absorción. Algunos ejemplos de dichos materiales son ciertos los agregados sintéticos y la escoria de alto horno.

*1.6.1.12.9. Afinidad con el asfalto.* También denominada adherencia es la predisposición del agregado a retener y aceptar una capa de asfalto. Las calizas, las dolomitas, y las rocas trapecanas son conocidas como hidrofóbicas (repelen el agua) y tienen alta afinidad con el asfalto ya que resisten los esfuerzos del agua por separar el asfalto de sus superficies.

Por otro lado, tenemos a los agregados hidrofílicos (atraen el agua) que tienen poca afinidad con el asfalto. Consecuentemente estos al ser expuestos al agua tienden a separarse de las películas de asfalto. Los agregados silíceos (cuarcita y algunos granitos) son ejemplos de agregados que deben ser usados con precaución ya que son susceptibles al desprendimiento.

Aun así, no es muy claro por qué del comportamiento de los agregados hidrofóbicos e hidrofílicos. Por eso existen varios ensayos con la finalidad de determinar su afinidad con el asfalto y su tendencia al desprendimiento. En uno de estos ensayos consiste en sumergir la mezcla asfáltica en agua (sin compactar) y las partículas cubiertas son analizadas visualmente.

Otro ensayo comúnmente conocido es el de inmersión-compresión, en donde dos muestras de mezcla son preparadas con iguales características, una es sumergida en agua y la otra no. Posteriormente, ambas son ensayadas para determinar sus resistencias. La diferencia de resistencias se considerada como un indicativo de la susceptibilidad del agregado al desprendimiento.

*1.6.1.12.10. Peso específico.* (Norma: ASTM D 70, AASHTO T 228) El peso específico o gravedad específica de los agregados es la proporción entre el peso de un volumen dado de agregado y el peso de un volumen igual de agua. El peso específico es una forma práctica de determinar las características de peso y volumen de los materiales. Para la producción de mezclas asfálticas de pavimentación el agregado y el asfalto son proporcionados de acuerdo al peso de la mezcla por lo que conocer estas características son especialmente importantes. Una tonelada de agregado con un peso específico bajo tiene un volumen mayor (ocupa más espacio), al de una tonelada de agregado con un peso específico más alto. Por lo tanto, para cubrir una tonelada con un mayor volumen de partículas (peso específico bajo) es necesario una mayor cantidad de cemento asfáltico que para una tonelada de menor volumen (peso específico mayor) se requerirá una mayor cantidad de este.

Otra razón importante por la cual es necesario conocer el peso específico de los agregados usados es: influye en el cálculo de porcentaje de vacíos de aire (espacios de aire) de las mezclas compactadas. Todas las mezclas de pavimentación deben incluir un cierto porcentaje de vacíos o espacios de aire y que se encuentren dentro de los parámetros establecidos. Determinan una labor muy importante dependiendo al tipo de pavimento. Calcular el porcentaje de vacíos de aire en un volumen dado de mezcla de pavimentación únicamente es midiendo el peso específico de una muestra de la mezcla de pavimentación y luego restando, de su valor, los pesos específicos del asfalto y de los agregados que lo conforman. El resultado indica el volumen de vacíos de aire en la muestra.

En su naturaleza se considera que todos los agregados son porosos. Así se ha determinado tres tipos de peso específico a tener en cuenta en la determinación de la porosidad del agregado, por lo que afecta directamente en la cantidad de asfalto requerido para cubrir las partículas de agregado y porcentaje de vacíos de aire en la mezcla final.

Estos tres tipos son:

- Peso específico total
- Peso específico aparente, y
- Peso específico efectivo

*1.6.1.12.11. Gravedad específica y absorción del agregado.* El peso específico total de una muestra contiene todos los poros de la muestra. El peso específico aparente no incluye, como parte del volumen de la muestra, los espacios capilares y poros que se llenarían de agua al saturar. El peso específico efectivo no incluye, del volumen de la muestra, todos los poros y espacios capilares que absorben asfalto. El peso específico efectivo, el cual discrimina entre poros permeables al asfalto y poros permeables al agua, es el que más se acerca al valor correcto que debe ser usado en los cálculos de mezclas asfálticas.

### 1.6.2. Zeolita.

(Morante, 2004, pp. 7,13).

Las zeolitas son una familia de alrededor de 40 minerales cristalinos. Químicamente son Aluminio – silicatos hidratados y estructuralmente pertenecen al grupo de los tectosilicatos.

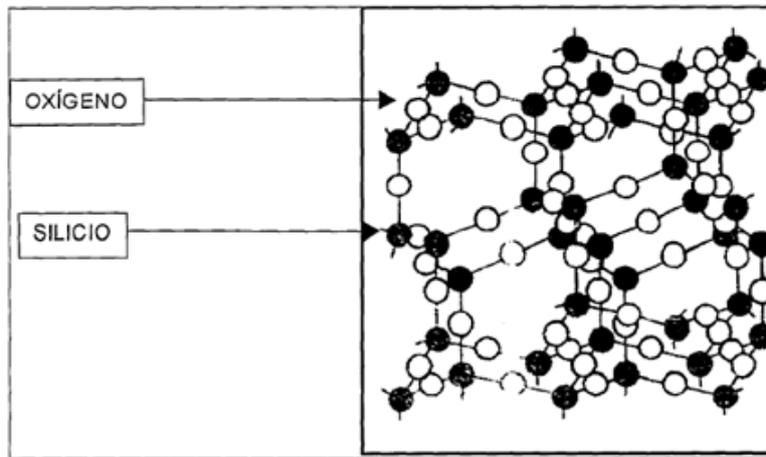
Han sido estudiadas por los mineralogistas por más de 200 años. La historia de las zeolitas comenzó con el descubrimiento de la estilbita en 1756 por el mineralogista sueco Cronstedt. (Carr, D.D. and Herz, N., 1989).

Las zeolitas se comportan como una serie de materiales micro porosos hidratados, que contienen cationes cambiables de los grupos de los elementos 1A y 2A ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Ca}^{2+}$ ) y sus estructuras internas permiten que actúen como tamices moleculares que puedan retener y liberar selectivamente las moléculas por adsorción según su tamaño y forma. (Poole C, Prijatama H., 2001). Vezzalini G. (1997) ha valorado esta definición de zeolita frente a la más reciente propuesta por la International Zeolitic Association (IZA): "una zeolita está caracterizada por una estructura de tetraedros enlazados que contiene cavidades en forma de canales y cajas que comúnmente están ocupadas por moléculas de agua y cationes. En las fases hidratadas ocurre la deshidratación a temperaturas moderadas (fundamentalmente por debajo de  $400^\circ\text{C}$ ) y ésta es altamente reversible".

Las zeolitas son incoloras a blancas, con densidades que van de 2.0 a 2.3 g/cm (aunque algunas tienen densidades mayores debido a la presencia de Ba y Sr) y dureza 3.5-5.5.

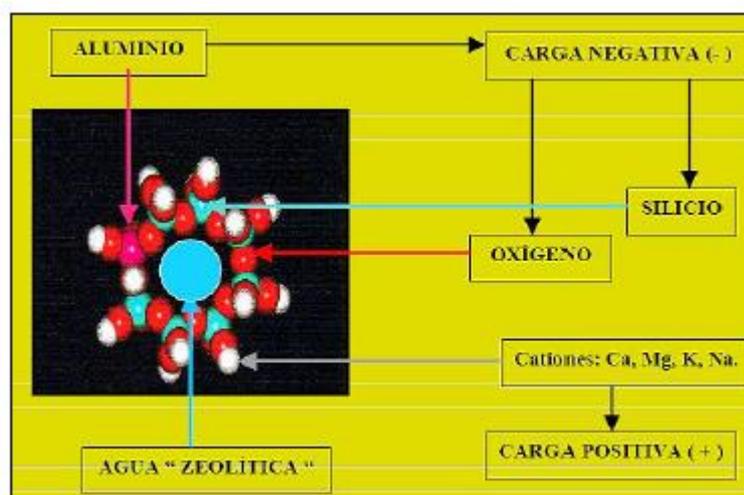
#### 1.6.2.1. *Composición química de las zeolitas.* (Morante, 2004, p. 70).

Junto con los minerales de cuarzo y feldespato las zeolitas son tectosilicatos, esto es, consisten en armazones tridimensionales de tetraedros de  $\text{SiO}_4$  en los cuales los iones de oxígeno de cada tetraedro se comparten con el tetraedro adyacente, como se muestra en la Figura 1 (Mumpton, 1976.).



**Figura 1.** Ordenación tridimensional de silicatos tetraédricos en los tectocilicatos – Adaptado de Mumpton,1993.

Esta compartición de oxígenos reduce el cociente total Si:O a 2:1, y si cada tetraedro contiene en el armazón silicio como catión central, la estructura es eléctricamente neutra, como lo es el cuarzo (SiO<sub>2</sub>). En la estructura de las zeolitas, sin embargo, algunos silicios tetravalentes son remplazados por aluminios trivalentes, con lo que se crea una deficiencia de cargas positivas. La carga se equilibra por la presencia cationes monovalentes y divalentes, tales como Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, etc., en otros lugares de la estructura.



**Figura 2.** Estructura básica de una zeolita. Adaptado de [www.relaq.mx/RLQ/cuba/zeolita.html](http://www.relaq.mx/RLQ/cuba/zeolita.html).

### 1.6.2.2. *Clasificación de las zeolitas.*

1.6.2.2.1. *Zeolitas sintéticas.* Las zeolitas sintéticas son sólidos obtenidos a partir de soluciones acuosas saturadas de composición apropiada, en un dominio de temperaturas comprendido entre 25° y 300°C. La naturaleza de la zeolita viene determinada básicamente por factores cinéticos. Haciendo variar la composición de las soluciones y las condiciones operatorias, es posible sintetizar zeolitas de diferentes estructuras o la misma zeolita con diferentes composiciones químicas. (Tacha, et al., 2014, p. 10).

1.6.2.2.2. *Zeolitas naturales.* La zeolita es un aluminosilicato presente de forma natural en rocas de origen volcánico que contiene óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ). Este mineral tiene iones grandes y moléculas de agua con, libertad de movimiento, lo cual le permite el intercambio iónico. Gracias a esta estructura molecular la zeolita natural tiene la capacidad de desprender agua de manera continua a medida que se calienta a temperaturas relativamente bajas, teniendo la posibilidad de rehidratarse sumergiéndola en agua. (Valeriano, y Catacora, 2017, pp. 47-49).

A. *Clasificación de zeolitas naturales.* Las zeolitas naturales se clasifican por grupos como se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1.***Clasificación Estructural de las Zeolitas Naturales.*

Zeolitas	Formula química
<i>Grupo de las Analcimas</i>	
Analcimas	$\text{Na}_{16}(\text{Al}_{16}\text{Si}_{32}\text{O}_{96})16\text{H}_2\text{O}$
Wairakita	$\text{Ca}_8(\text{Al}_{16}\text{Si}_{32}\text{O}_{96})16\text{H}_2\text{O}$
Leucina	$\text{K}_{16}(\text{Al}_{16}\text{Si}_{32}\text{O}_{96})$
<i>Grupo de las natrolitas</i>	
Natrolita	$\text{Na}_2(\text{Al}_{16}\text{Si}_{24}\text{O}_{30})16\text{H}_2\text{O}$
Edingtonita	$\text{Ba}_2(\text{Al}_4\text{Si}_6\text{O}_{20})6\text{H}_2\text{O}$
Thomsonita	$\text{Na}_4\text{Ca}_8(\text{Al}_{20}\text{Si}_{20}\text{O}_{30})24\text{H}_2\text{O}$
<i>Grupo de las filipsitas</i>	
Filipsita	$(\text{K},\text{Na})_5(\text{Al}_5\text{Si}_{11}\text{O}_{32})10\text{H}_2\text{O}$
Garronita	$\text{NaCa}_{16}(\text{Al}_5\text{Si}_{10}\text{O}_{32})14\text{H}_2\text{O}$
Gismondita	$\text{Ca}_4(\text{Al}_8\text{Si}_8\text{O}_{32})16\text{H}_2\text{O}$
<i>Grupo de las heulanditas</i>	
Heulandita	$\text{Ca}_4(\text{Al}_8\text{Si}_{28}\text{O}_{72})24\text{H}_2\text{O}$
Clinoptilolita	$\text{Na}_6(\text{Al}_6\text{Si}_{30}\text{O}_{72})24\text{H}_2\text{O}$
Estilbita	$\text{Na}_2\text{Ca}_4(\text{Al}_{10}\text{Si}_{26}\text{O}_{72})32\text{H}_2\text{O}$
<i>Grupo de las modernitas</i>	
Modernita	$\text{Na}_8(\text{Al}_8\text{Si}_{40}\text{O}_{96})24\text{H}_2\text{O}$
Ferrierita	$\text{Na}_{15}\text{Mg}_2(\text{Al}_5,5\text{Si}_{30},5\text{O}_{72})18\text{H}_2\text{O}$
Epistilbita	$\text{Ca}_3(\text{Al}_6\text{Si}_{18}\text{O}_{48})16\text{H}_2\text{O}$
<i>Grupo de las chabasitas</i>	
Chabasita	$\text{Ca}_2(\text{Al}_4\text{Si}_8\text{O}_{24})13\text{H}_2\text{O}$
Edionita	$(\text{Ca},\text{MgNa},\text{K})_4,5(\text{Al},\text{Si}_{27}\text{O}_{72})27\text{H}_2\text{O}$
Zeolita L	$\text{K}_6\text{Na}_3(\text{Al}_9\text{Si}_{27}\text{O}_{72})21\text{H}_2\text{O}$
<i>Grupo de las faujasitas</i>	
Faujasitas (X, Y)	$\text{Na}_{12}\text{Ca}_{12}\text{Mg}_{11}(\text{Al}_{59}\text{Si}_{153}\text{O}_{384})26\text{H}_2\text{O}$
Zeolita A	$\text{Na}_{12}(\text{Al}_{12}\text{Si}_{12}\text{O}_{48})27\text{H}_2\text{O}$
Zeolita ZK-5	$\text{Na}_{30}(\text{Al}_{30}\text{Si}_{66}\text{O}_{192})98\text{H}_2\text{O}$
<i>Grupo de las laumontitas</i>	
Laumontita	$\text{Ca}_4(\text{Al}_8\text{Si}_{16}\text{O}_{48})16\text{H}_2\text{O}$
Yugawaralita	$\text{Ca}_{16}(\text{Al}_8\text{Si}_{16}\text{O}_{48})16\text{H}_2\text{O}$
<i>Grupo de las pentasil</i>	
Zeolita ZSM-5	$\text{Na}_n(\text{Al}_n\text{Si}_{96-n}\text{O}_{192})16\text{H}_2\text{O}$

*Nota:* Adaptado de Industrial Minerals and Rocks - Kogel et al., 2006.

B. *Relación Silicio – Aluminio de Zeolitas Naturales.* Hay cerca de 50 tipos de zeolitas naturales con diferentes composiciones mineralógicas dependiendo de su estructura y la relación Si/Al (Giannetto y colbs., 2000; Gruszkiewicz y colbs, 2005; Yang y colbs., 2009). Algunos ejemplos de las zeolitas más típicas se muestran en la Tabla 2.

**Tabla 2.**  
*Relación Si/Al para diferentes tipos de Zeolitas.*

Tipos de Zeolita	Rango de Si/Al
Analcita	1.00 - 3.00
Clinoptilolita	2.92 - 5.04
Chabazita	1.43 – 4.18
Edingtonita	1.00 – 2.00
Erionita	3.05 – 3.99
Faujasita	1.00 – 3.00
Ferrierita	3.79 – 6.14
Heulandita	2.85 – 4.31
Laumontita	1.95 – 2.25
Modernita	4.19 – 5.79
Natrolita	1.50
Fillipsita	1.45 – 2.87
Stibilita	2.50 – 5.00
Wairakita	2.00

Nota: Adaptado de Aplicación de las Zeolitas naturales al tratamiento biológico de residuos – Montalvo, S. 2013.

#### 1.6.2.3. *Propiedades de las Zeolitas.* (Curi, Granda, Lima, y Sousa, 2006)

1.6.2.3.1. *Porosidad.* Esta característica de las zeolitas es a que son formadas por cavidades y canales regulares e uniformes de dimensiones moleculares (3 a 13 nm) que se comparan con los diámetros cinéticos de una gran cantidad de moléculas. Este tipo de estructura microporosa le da una peculiar característica que hace que las zeolitas presenten una superficie interna sumamente grande en relación a su superficie externa. La IUPAC (The International Union of Pure and Applied Chemistry) reconoce tres tipos de poros atendiendo a su tamaño (Sing et al. 1985). Como macroporos si son mayores de 50 nm, si su diámetro está comprendido entre 2 y 50 nm se trata de mesoporos y microporos si son menores de 2 nm, como es el caso de las zeolitas.

Cuando la distancia entre dos superficies es suficientemente corta, los potenciales de adsorción se suman, de forma que una molécula situada en el interior del poro se ve atraída por toda la superficie del poro aumentando la fuerza con la que se ve atraída. Es decir, a medida que disminuye el tamaño del poro más profundo se hace el pozo de potencial. En el

caso de que el poro sea suficientemente ancho las moléculas se irán adsorbiendo formando una monocapa a una distancia determinada de la superficie (distancia de adsorción), y a medida que aumenta la cantidad adsorbida el adsorbato se ordena en capas sucesivas (llenado en multicapas) (Gregg y Sing, 1967).

*1.6.2.3.2. Adsorción.* La superficie de los sólidos es una característica que es responsable y condiciona muchas de sus propiedades. Los átomos que se encuentran en ella no tienen las fuerzas de cohesión compensadas, como ocurre en los átomos localizados en el seno del sólido que es responsable de las propiedades de adsorción de los sólidos. A distancias mucho mayores, no existe una interacción considerable entre una molécula acercándose a una superficie se próxima a cero. A medida que la molécula se acerca a la superficie la energía del sistema disminuye debido a que las fuerzas de cohesión de los átomos de la superficie empiezan a verse compensadas. De otro punto de vista, el potencial de adsorción genera una fuerza atractiva que induce el acercamiento de la molécula a la superficie. Cuando la distancia entre la superficie y la molécula libre empieza a disminuir, las fuerzas de repulsión, debidas a la proximidad de las capas de electrones de los átomos de la superficie con los átomos de la molécula libre, comienzan a ser importantes. Entonces existe una distancia para la cual la energía del sistema es mínima. La alta eficiencia de adsorción de las zeolitas está relacionada a la gran superficie interna que esta posee. Cuando disminuye el tamaño del poro se produce un incremento significativo del potencial de adsorción, originado por el solapamiento de los potenciales de las paredes del poro. Así, para un mismo adsorbato, la interacción con las paredes del poro es mayor cuanto menor es el tamaño del poro, por tanto, mejor el confinamiento de la molécula adsorbida (García, M.J, 2002).

*1.6.2.3.3. Intercambio iónico (I.I).* Se han observado estas propiedades en minerales silicatos cristalinos como feldespatos, arcillas y zeolitas. Se considera una propiedad interior de estos minerales pues es el resultado de la sustitución isomórfica de los átomos de silicio de su estructura cristalina por otros átomos. En el caso de las zeolitas, objeto de estudio, esta sustitución sucede por átomos tetravalentes de aluminio lo que genera una carga neta negativa en la estructura que se compensa por cationes fuera de ella. Es así que estos cationes son intercambiables, de ahí la propiedad intrínseca de I.I. que también es una manifestación de su naturaleza de estructura cristalina microporosa, pues las dimensiones de sus cavidades y de los cationes que se intercambian determinan el curso del proceso.

El comportamiento de I.I. En las zeolitas varios son los factores que determinan una mayor selectividad en las zeolitas a determinados cationes: -naturaleza de los cationes en temperatura, solución, concentración de los cationes en solución, aniones asociados con los cationes en solución, solvente – agua, solvente orgánico, estructura de la zeolita – topología de la red y densidad de la carga de red.

La capacidad de intercambio iónico (C.I.I.) de una zeolita es una magnitud que da una medida del monto de equivalentes de un catión que es capaz de retener por intercambio iónico una masa de zeolita. Esta capacidad está directamente relacionada con el Al presente en la red zeolítica y depende directamente de su composición química (Breck, 1974). Una alta capacidad de intercambio iónico corresponde a zeolitas con baja relación SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Clarke, 1980). La C.I.I. teórica máxima, número de equivalentes intercambiables por masa de la celda unitaria, no siempre puede ser alcanzada debido a la existencia de sitios de intercambio inaccesibles.

### **1.6.3. Mezcla de agregados.**

(Valeriano, y Catacora, 2017, pp. 53-55).

Combinación de dos o más agregados que tienen diferentes gradaciones para originar una nueva mezcla de agregados que cumplan con las especificaciones requeridas

1.6.3.1. *Método analítico.* Consiste en determinar en forma rápida y por tanteo los porcentajes (%) de cada uno de los agregados estudiando los diferentes tamices y considerando *cuál* de los agregados controlara la cantidad del material que pasa en un determinado tamiz. Al realizar este proceso de combinación de agregados lo importante es producir una granulometría que sea lo más cercana o este dentro de los parámetros establecidos en las especificaciones. Nos permite observar que para un tamiz determinado el % con que contribuye un tipo de agregado a la mezcla deseada se obtiene multiplicando el % total que pasa por el tamiz (expresado en decimal) por el % de agregado de ese tipo contenido en la mezcla. El % del material combinado que pasa por un tamiz determinado se obtiene sumando las cantidades del material de cada tipo que pasa por dicho tamiz. La fórmula básica es la siguiente:

$$P = Aa + Bb + Cc + \dots + Nn \dots \dots \dots (a)$$

$$a + b + c + \dots + n = 1 \dots \dots \dots (b)$$

Donde:

P: % pasante correspondiente a un tamiz cualquiera.

A, B, C...N: % de material que pasa el tamiz dado en las granulometrías para cada uno de los agregados empleados en la combinación.

a, b, c, ...n: Proporciones expresadas en forma decimal resultante de la combinación para cada uno de los materiales y cuyo valor es igual a uno.

#### 1.6.3.2. *Ensayo en los agregados pétreos.*

Los ensayos se realizaron de acuerdo con el procedimiento que nos indica la norma de: MANUAL DE ENSAYO DE MATERIALES edición Mayo del 2016 del Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

#### 1.6.3.3. *Suelos*

MTC E 108: Humedad natural.

MTC E 110: Determinación del Limite Líquido.

MTC E 111: Determinación Del Limite Plástico e Índice De Plasticidad.

MTC E 114: Método de Ensayo Estándar Para el Valor Equivalente de Arena de Suelos y Agregado Fino.

#### 1.6.3.4. *Agregados*

MTC E 201: Muestreo Para Materiales de Construcción.

MTC E 204: Análisis Granulométrico de Agregados Gruesos y Finos.

MTC E 205: Gravedad Específica y Absorción de Agregados Finos.

MTC E 206: Peso Específico y Absorción de Agregados Gruesos.

MTC E 207: Abrasión Los Ángeles (L.A.) Al Desgaste de los Agregados de Tamaños Menores de 37,5 mm. (1 ½”).

MTC E 210: Método de Ensayo Estándar Para la Determinación del Porcentaje de Partículas Fracturadas en el Agregado Grueso.

MTC E 223: Partículas Chatas y Alargadas en Agregados.

#### 1.6.4. Normatividad

1.6.4.1. *Agregados*. Según el Manual de Carreteras; Especificaciones Técnicas Generales Para Construcción, (EG - 2013), del Ministerio de *Transportes* y Comunicaciones. Para el diseño de Pavimento de Concreto Asfáltico en Caliente en su sección 423, del Capítulo IV Pavimentos Flexibles, nos indica que los agregados deben cumplir con los siguientes parámetros mostrados en las tablas 3 y 4 para los agregados gruesos y finos respectivamente.

**Tabla 3.**  
*Requerimientos Para los Agregados Gruesos.*

Ensayos	Norma	Requerimiento Altitud (m.s.n.m.)	
		≤ 3,000	>3,000
Durabilidad (al sulfato de magnesio)	MTC E 209	18 % máx.	15 % máx.
Abrasión los ángeles	MTC E 207	40 % máx.	35 % máx.
Adherencia	MTC E 517	+95	+95
Índice de durabilidad	MTC E 214	35 % mín.	35 % mín.
Partículas chatas y alargadas	ASTM 4791	10 % máx.	10 % máx.
Caras fracturadas	MTC E 210	85/50	90/70
Sales solubles totales	MTC E 219	0.5 % máx.	0.5 % máx.
Absorción*	MTC E 206	1.0 % máx.	1.0 % máx.

*Nota:* Adaptado del Manual de Carreteras; EG – 2013.

**Tabla 4.**  
*Requerimientos para los Agregados Finos*

Ensayos	Norma	Requerimiento Altitud (m.s.n.m.)	
		≤ 3,000	>3,000
Equivalente de arena	MTC E 114	60	70
Angularidad del agregado fino	MTC E 222	30	40
Azul de metileno	AASTHO TP 57	8 máx.	8 máx.
Índice de plasticidad (malla N° 40)	MTC E 111	NP	NP
Durabilidad (al sulfato de magnesio)	MTC E 209	-	18 % máx.
Índice de durabilidad	MTC E 214	35 mín.	35 mín.
Índice de plasticidad (malla N° 200)	MTC E 111	4 máx.	NP
Sales solubles totales	MTC E 219	0.5 % máx.	0.5 % máx.
Absorción**	MTC E 205	0.5 % máx.	0.5 % máx.

*Nota:* Adaptado del Manual de Carreteras; EG – 2013.

La gradación de la mezcla asfáltica en caliente (MAC) deberá responder a algunos de los usos granulométricos, especificados en la Tabla 5. Alternativamente pueden *emplearse* las gradaciones especificadas en la ASTM D 3515 e Instituto del Asfalto.

**Tabla 5.**  
*La gradación de la Mezcla Asfáltica en Caliente (MAC)*

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

*Nota:* Adaptado del Manual de Carreteras; EG – 2013.

### 1.6.5. Materiales asfálticos.

(Minaya, y Ordóñez, 2006, Cap. 4)

1.6.5.1. *Antecedentes.* El cemento asfáltico es un material antiguo utilizado como aglutinante o impermeabilizante. Las primeras carreteras pavimentadas en los EE.UU. fueron en la Av. Pennsylvania, frente a la Casa Blanca. En este caso el asfalto usado fue natural proveniente de la Isla Trinidad en las Costas de Venezuela. La otra fuente de asfalto natural se encuentra en Bermudez – Venezuela.

Se pueden encontrar asfaltos naturales en la corteza terrestre formando los lagos de asfalto o aparecen impregnados en calizas, formaciones de areniscas o similares (llamadas rocas asfálticas), también se encuentra mezclados por impurezas minerales.

Durante 1800 y 1900 se incrementó la demanda de las carreteras pavimentadas tan rápido que la extracción y transporte desde los lagos de asfalto hasta la obra no se abastecía y fue limitado la construcción de estos pavimentos. Es así que se tuvo que buscar una nueva fuente para producir asfalto, y en la actualidad los asfaltos utilizados son provenientes del refino del petróleo.

1.6.5.2. *Definición de Asfalto.* ASTM (American Society for Testing and Materials ó Sociedad Americana para Ensayos y Materiales) define al asfalto como un material cementante, de consistencia variable y de color oscuro, cuya rigidez depende de la temperatura en que se encuentre. A temperatura ambiente el asfalto es sólido a semisólido, y cuando su temperatura se incrementa cambia a un estado líquido, condición que permite que los agregados sean cubiertos en su totalidad durante la mezcla. El asfalto usado en pavimentación, generalmente llamado cemento asfáltico, a altas temperaturas (135°C) es poco rígido, condición que facilita la adherencia de las partículas del agregado y por lo tanto es un excelente cemento que une los agregados en mezclas en caliente. El cemento asfáltico también es usado como impermeabilizante y no es afectado por los ácidos, las sales o los alcalis (bases). Significando que la construcción adecuada de pavimentos de concreto asfáltico es impermeable y resistente a doñas químicos. El asfalto al entrar en contacto con el oxígeno reacciona perdiendo sus propiedades elásticas y volviéndose duro y frágil. Siendo así esta característica del asfalto que trata de retardarse, pero que se desarrolla con el tiempo. En una mezcla convencional (asfalto + agregado de granulometría completa) el porcentaje de asfalto es de 6.5% y del agregado de 93.5% en peso de la mezcla, aprox.; sin embargo, es importante resaltar como un material cuya participación es mínima puede tener tanto efecto en el comportamiento de la mezcla. Figura 3. (Minaya, y Ordóñez, 2006, Cap. 4).



**Figura 3.** Cemento asfáltico, agregados y briqueta - Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos – S. Minaya y Ordoñez H.

1.6.5.3. *Tipos de asfalto.* (Valeriano, y Catacora, 2017, pp. 65-66).

1.6.5.3.1. *Cemento asfáltico (AC).* Es asfalto refinado, o una combinación de asfalto refinado y aceite fluidificante, de consistencia apropiada para la pavimentación.

Aceite fluidificante es un aceite viscoso, espeso, no volátil, obtenido por la destilación de productos volátiles livianos que se encuentran en el petróleo crudo. Se usa para ablandar los asfaltos muy duros, cuya penetración es menor de 10, hasta obtener la consistencia deseada. Con los grados de penetración: 60-70; 85-100; 120-150 y 200-300.

**Tabla 6.**

*Tipo de Cemento Asfáltico.*

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

*Nota:* Adaptado del Manual de Carreteras; EG – 2013.

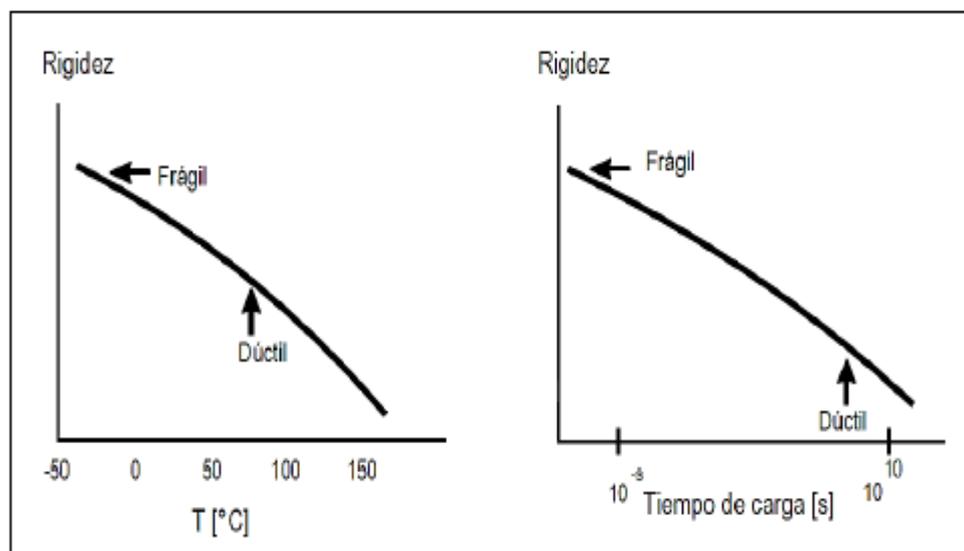
1.6.5.3.2. *Asfaltos líquidos.* Es un cemento asfáltico licuado mediante la adición de un fluidificante (destilación de petróleo ligero y volátil). Ya que cuando se encuentra expuesto se evapora el destilado volátil, quedando solamente el cemento asfáltico. Hay tres tipos:

Curado Rápido (RC – Rapid Cured). Es un cemento asfáltico fluidificado con nafta, o con un destilado del tipo de la gasolina.

Curado Medio (MC – Medium Cured). Es un cemento asfáltico fluidificado con kerosene.

Curado Lenta (SC – Slow Cured). Es un aceite asfáltico residual, o una mezcla de estos aceites con destilados de volatilización lenta.

1.6.5.4. *Comportamiento mecánico del cemento asfáltico.* La naturaleza del asfalto es viscoelástica, depende de la temperatura y el tiempo de aplicación de la carga. El asfalto a altas temperaturas tiene menor rigidez, típico durante la temperatura de mezcla (135°C). A medida que disminuye la temperatura el asfalto se vuelve más rígido. A temperaturas muy bajas el asfalto puede agrietarse porque se vuelve quebradizo y frágil. Un comportamiento análogo se observa cuando se grafica el tiempo de aplicación de la carga (velocidad) y la rigidez. Cuando las cargas sometidas son rápidas el asfalto tiene mayor rigidez y cuando las cargas son lentas hay menor rigidez y mayor deformación. (Minaya, y Ordóñez, 2006, Cap. 4).

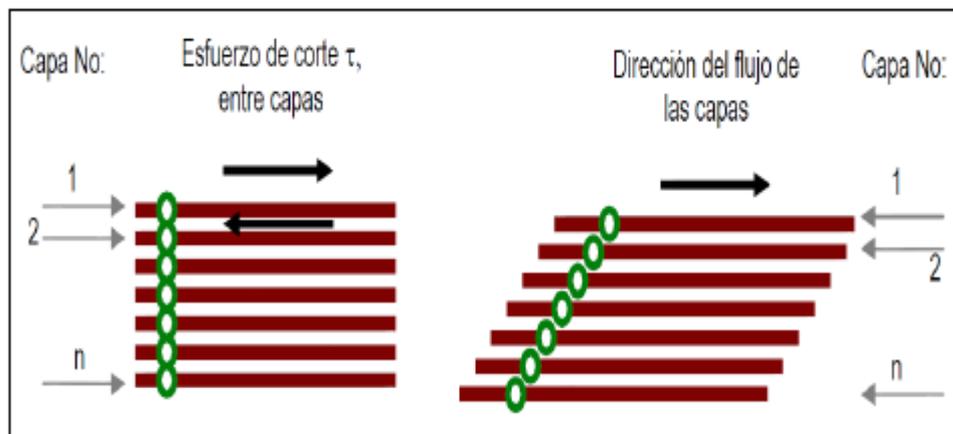


**Figura 4:** Comportamiento del Asfalto - *Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos* – S. Minaya G. y A. Ordoñez H.

*Comportamiento a altas temperaturas.* En climas cálidos o sometido a cargas de tráfico lentas (intersecciones, tramos en pendiente), el cemento asfáltico tiene un comportamiento líquido-viscoso, quedando así el agregado soportando las cargas cíclicas. Con esta condición es muy importante el rol que cumple la estructura granular de la mezcla. El asfalto solo es el aglutinante. Por definición, la viscosidad es la característica física del material que describe la resistencia de los líquidos a fluir. Si el flujo del cemento asfáltico en caliente es lento puede ser observado microscópicamente como capas adyacentes de moléculas deslizándose

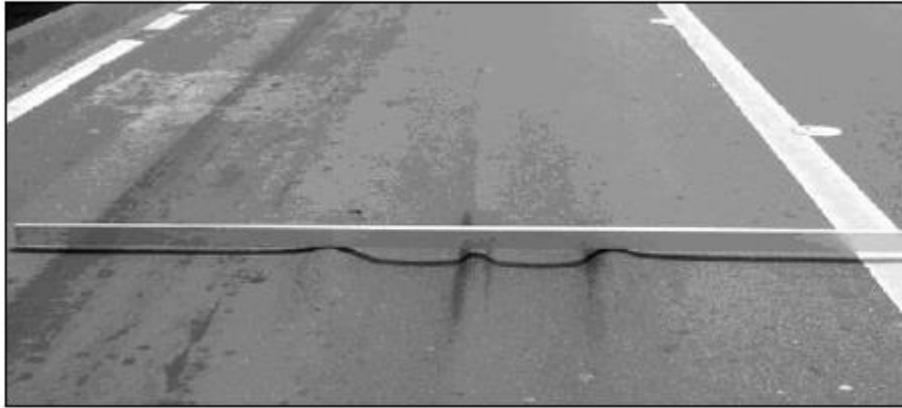
unas sobre otras. La resistencia y fricción entre capas se relaciona a la velocidad relativa de deslizamiento. La viscosidad es una característica que ayuda a diferenciar a los líquidos y se define como el esfuerzo de corte entre la velocidad de deformación por corte. La figura 5 muestra un juego de cartas que tienen una línea vertical marcada a un lado. Entonces cuando se aplica el corte en el punto superior, las cartas tratan de deslizarse una sobre la otra y los puntos marcados en las cartas empiezan a separarse. Los fluidos Newtonianos tienen una relación lineal entre el esfuerzo de corte y la velocidad relativa. La velocidad al corte es la velocidad a la cual estos puntos se separan. El aire, agua y asfalto caliente (a temperaturas mayores que 60°C) son comúnmente fluidos Newtonianos. A temperaturas moderadas, la viscosidad del asfalto decrece cuando la velocidad relativa se incrementa.

Los líquidos viscosos como el asfalto caliente son llamado en ocasiones plásticos porque una vez que comienzan a fluir no retornan a su estado original. El ahuellamiento o rutting es la acumulación de deformaciones plásticas no recuperables.



**Figura 5.** Características del Flujo de Líquidos - Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos – S. Minaya G. y A. Ordoñez H.

1.6.5.5. *Comportamiento a bajas temperaturas.* En climas fríos o bajo aplicaciones de carga rápida, el cemento asfáltico tiene un comportamiento sólido elástico. Los sólidos elásticos se caracterizan porque cuando cesa la carga que los deforma, regresan a su posición original.



**Figura 6:** Ahuellamiento o Deformación Permanente o Rutting - Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos – S. Minaya G. y A. Ordoñez H.

Cuando el material se esfuerza más allá de su capacidad, el sólido elástico puede romperse. El agrietamiento por bajas temperaturas algunas veces ocurre cuando las cargas sometidas producen esfuerzos internos que se acumulan en el pavimento asfáltico que tenderá a contraerse mientras su movimiento es restringido por las capas inferiores.



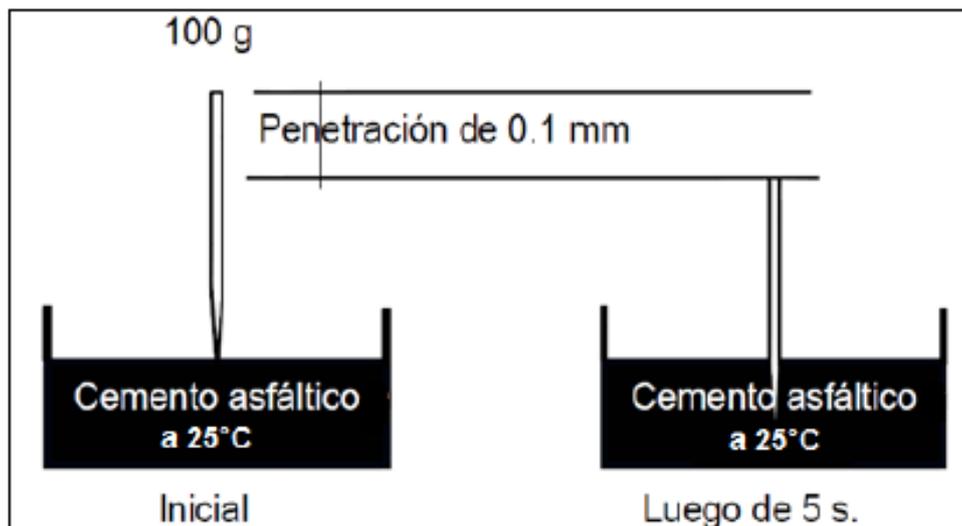
**Figura 7:** Agrietamiento por bajas temperaturas - Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos – S. Minaya G. y A. Ordoñez H.).

1.6.5.6. *Comportamiento a temperaturas intermedias.* A estas temperaturas el asfalto es un excelente material adhesivo usado en la pavimentación, muestra características de líquido viscoso y sólido elástico. Cuando se calienta el asfalto actúa como un lubricante, permitiendo mezclarse con el agregado, cubrirlo y compactarse formando una superficie lisa y densa. Tan pronto como se enfría, el asfalto actúa manteniendo juntos los agregados en la matriz sólida. En esta etapa el comportamiento del asfalto es viscoelástico, dependiendo de la temperatura y velocidad de aplicación de carga.

### 1.6.6. Normativa

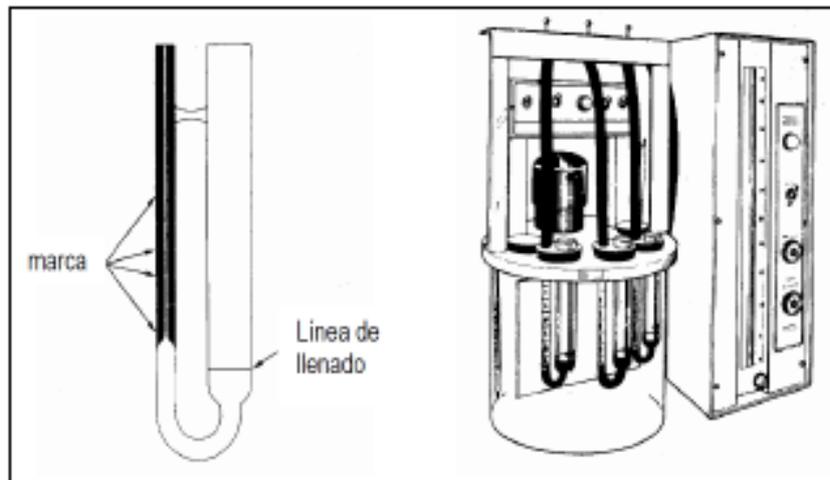
*Especificaciones y ensayos para cementos asfálticos.* Como químicamente el asfalto es un material muy complejo, las especificaciones deben estar relacionadas, con las propiedades físicas o más precisas con su comportamiento mecánico. Las especificaciones actuales en el Perú se utilizan aún ensayos de, viscosidad, penetración y ductilidad para evaluar el asfalto. Muchos de los ensayos actuales son empíricos, necesitando de la experiencia para que los resultados de los ensayos se puedan interpretar adecuadamente. Sin embargo, tal práctica tiene importantes limitaciones. Reconociendo las deficiencias de tal sistema, en los Estados Unidos las agencias estatales de carreteras tuvieron que implementar un programa de investigación para adoptar un nuevo sistema para especificar el pavimento asfáltico. En 1987, la SHRP inició estudios para desarrollar nuevos ensayos que permitan medir las propiedades físicas del asfalto. Con una inversión de \$50 millones de dólares se plasmó en las especificaciones del Ligante Superpave, que requiere de un nuevo paquete de equipos para ensayos y procedimientos. Se llamó especificaciones del “ligante” ya que engloba a los asfaltos modificados y no modificados. El avance más significativo fue probablemente cambiar ensayos empíricos por ensayos donde el ligante puede ser caracterizado a variaciones de temperaturas controladas obtenidas de campo. Los ensayos de Reómetro de Corte Dinámico (DSR), Reómetro de Viga de Flexión (BBR) y Ensayo de Tensión Directa (DTT) reemplazaron a los ensayos de viscosidad, penetración y ductilidad, respectivamente. Junto con el envejecimiento en planta (RTFO) se adoptó el envejecimiento durante la vida de servicio (PAV). (Minaya, y Ordóñez, 2006, Cap. 4)

*Ensayo de penetración.* El sistema de clasificación por penetración fue usado en los EE.UU. y Canadá en los años 40 y 50. El ensayo de penetración realizado a 25°C, temperatura que fue elegido como un promedio de servicio del pavimento, indica la rigidez del asfalto, que solo puede ser relacionado con su comportamiento en campo mediante la experiencia. Como el valor de la penetración no es una medida primordial dicho valor no puede ser racionalmente incluida en modelos mecánicos. El ensayo consiste en aplicar una carga patrón en la superficie de una muestra de cemento asfáltico a 25°C. Se debe medir la penetración de la aguja en la muestra, luego de 5 segundos. Si el asfalto es duro la penetración será menor que cuando el asfalto es blando. Se recomendó siempre la utilización de asfaltos duros para carreteras en la selva mientras que los blandos eran recomendados para carreteras en la sierra o zonas con bajas temperaturas. (Minaya, y Ordóñez, 2006, Cap. 4)



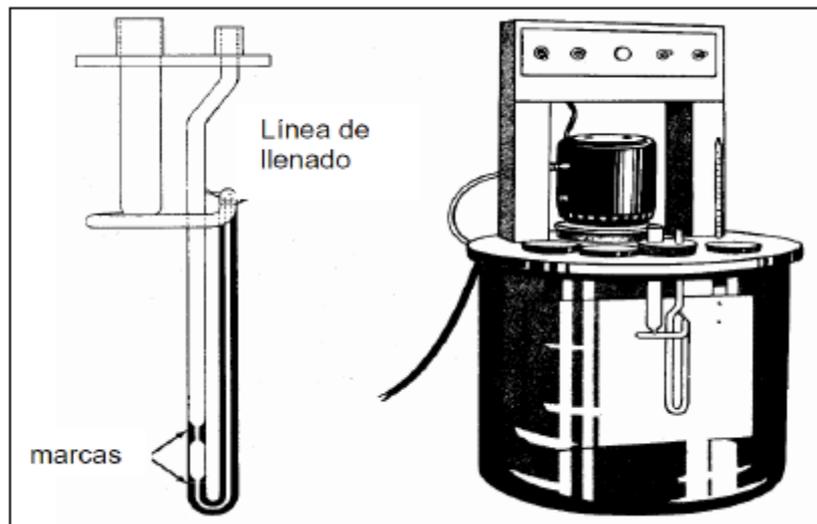
**Figura 8:** Esquema del Ensayo de Penetración - Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos – S. Minaya G. y A. Ordoñez H.

*Ensayo de viscosidad.* El sistema de gradación por viscosidad se basó en los ensayos de viscosidad del ligante, que proporciona información acerca del comportamiento viscoso a mayores temperaturas. Las temperaturas de ensayo son de 60°C y 135°C. Sin embargo, este ensayo no es el indicado para controlar el comportamiento mecánico del ligante no newtonianos (y viscoelásticos), requiriendo de ensayos adicionales al de la viscosidad. Las especificaciones generalmente se refieren a la viscosidad del asfalto a dos temperaturas diferentes, 60°C (viscosidad absoluta) y 135°C (viscosidad cinemática). La primera es para clasificar el cemento asfalto y representa la viscosidad del cemento asfáltico a la temperatura más alta de servicio; la segunda corresponde aproximadamente a la viscosidad del asfalto durante el mezclado y colocación. La viscosidad absoluta mide el tiempo que toma el asfalto para fluir a través de un tubo capilar calibrado a 60°C, como el asfalto a esa temperatura es muy rígido, se requiere someter al vacío a la muestra para que el asfalto se mueva a través del tubo en un tiempo razonable. Figura 9. (Minaya, y Ordóñez, 2006, Cap. 4)



**Figura 9.** Viscosidad Absoluta - Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos – S. Minaya G. y A. Ordoñez H.

La viscosidad cinemática se ensaya a 135°C y mide el tiempo necesario para que un volumen fijo de líquido fluya, por capilaridad, a través de un viscosímetro, debido a la temperatura solo se requiere de la gravedad para que el asfalto fluya. Figura 10.



**Figura 10:** Viscosidad Cinemática - Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos – S. Minaya G. y A. Ordoñez H.).

### 1.6.7. Mezclas asfálticas.

Las mezclas asfálticas son capas de rodadura y su función es proporcionar una superficie de rodamiento cómoda, facilitando la circulación de los vehículos, segura y económica para los usuarios, aparte de transmitir suficientemente las cargas debidas al tráfico a la explanada

para que sean soportadas por ésta. Se tienen que considerar dos aspectos fundamentales en el diseño de mezclas asfálticas. (Padilla, 2004, cap. 3, p. 40):

- La Función, que determina la resistencia de los materiales y el espesor de la capa que emplearemos en la construcción.
- La Finalidad, que determina las condiciones de textura y acabado que se deben exigir en la capa de rodadura, para que resulten seguras y confortables. A esta capa se le denomina pavimento.

1.6.7.1. *Funcionalidad de las mezclas asfálticas.* Las mezclas asfálticas soportan directamente las acciones de los neumáticos y transmiten las cargas a las capas inferiores, proporcionando condiciones adecuadas de rodadura, cuando se emplean en capas superficiales. El comportamiento de la mezcla va de la mano con el tiempo de aplicación de la carga y de la temperatura. Por esta causa su caracterización y propiedades están vinculadas a factores, como; la temperatura y duración de la carga. Las cualidades residen fundamentalmente en su superficie de su acabado y de los materiales que se hayan empleado en su construcción como: (Padilla, 2004, cap. 3, p. 41).

- La adherencia del neumático al pavimento.
- Las proyecciones de agua en tiempo de lluvia.
- El desgaste de los neumáticos.
- El ruido en el exterior y en el interior del vehículo.
- La comodidad y estabilidad en marcha.
- Las cargas dinámicas del tráfico.
- La resistencia a la rodadura.
- El envejecimiento de los vehículos.

Como resumen se puede decir que en una mezcla asfáltica hay que optimizar las siguientes propiedades:

- Estabilidad
- Durabilidad
- Resistencia a la Fatiga

Si la mezcla se usa como capa de rodadura hay que añadir las propiedades siguientes:

- Resistencia al Deslizamiento
- Regularidad
- Permeabilidad Adecuada
- Sonoridad
- Color, entre otras.

1.6.7.2. *Propiedades de las mezclas asfálticas para capas de rodadura.* La carpeta asfáltica es la que debe proporcionar una superficie de rodadura segura, confortable y estética. Como todas las exigencias necesarias para una superficie de rodadura no pueden optimizarse simultáneamente hay que equilibrar las propiedades contrapuestas para llegar a las soluciones más satisfactorias. En las capas de rodadura el uso de agregados de alta calidad y de aditivos se justifica por las solicitaciones a las que estas están sometidas. Actualmente la modificación de ligantes se ha generalizado para carreteras importantes persiguiéndose la optimización de la respuesta mecánica y de la durabilidad de la mezcla. Por la misma razón, la calidad de los agregados es absolutamente imprescindible, aunque todo ello suponga un costo mayor para el pavimento. (Padilla, 2004, cap. 3, p. 42).

1.6.7.3. *Propiedades de las mezclas asfálticas para capas inferiores.* Las capas de espesor apreciable de un firme tienen una misión estructural fundamental para absorber la mayor parte de las solicitaciones del tráfico, de tal forma de que las cargas transmitidas sean mínimas a las capas inferiores, explanada o cimiento de la carretera. Existen tendencias y países que llegan a utilizar paquetes asfálticos de gran espesor que forman la losa estructural fundamental del firme. En otros casos la función resistente radica en la colaboración con otras capas de materiales granulares o hidráulicos. (Padilla, 2004, cap. 3, p. 43).

**Tabla 7.**

*Propiedades Funcionales de las Mezclas Asfálticas*

---

Propiedades funcionales de las mezclas asfálticas
Seguridad
Resistencia al deslizamiento
Regularidad transversal
Visibilidad (marcas viales)
Comodidad
Regularidad longitudinal
Regularidad transversal
Visibilidad
Ruido
Durabilidad
Capacidad soporte
Resistencia a la desintegración superficial
Medio ambiente
Ruido
Capacidad de ser reciclado
Trabajabilidad

---

*Nota:* Mezclas Asfálticas – Alejandro Padilla Rodríguez.

1.6.7.4. *Clasificación de las mezclas asfálticas.* las clasificaciones pueden ser diversas:

1.6.7.4.1. *Por fracciones de agregado pétreo empleado.*

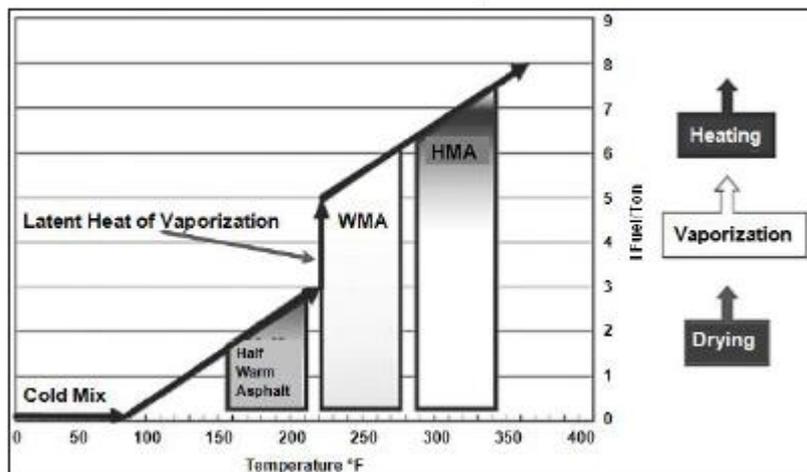
- Masilla asfáltica: Polvo mineral más ligante.
- Mortero asfáltico: Agregado fino más masilla.
- Concreto asfáltico: Agregado grueso más mortero.
- Macadam asfáltico: Agregado grueso más ligante asfáltico

1.6.7.4.2. *Por la temperatura de producción.* De acuerdo a la temperatura de producción. Características principales.; se exponen los diferentes tipos de mezcla asfáltica de acuerdo a la temperatura de elaboración en planta. Clasificación de las tecnologías WMA de acuerdo a la temperatura de producción. (Valeriano, y Catacora, 2017, pp. 75-76).

**Tabla 8.***Clasificación de las tecnologías WMA de acuerdo a la temperatura de producción.*

Nombre de la mezcla	Temperatura	Objetivo	Características
Mezclas en frío	De 25°C a 60°C	Permitir la incorporación en la mezcla de una alta proporción, de material reciclado.	Las mezclas en frío con emulsiones asfálticas donde los agregados se revisten a temperaturas bajas en una emulsión de asfalto en agua, pueden utilizarse como capas intermedias, capas de refuerzo e incluso, capas de rodadura.  Se están desarrollando varios productos y procesos para producir mezclas semi - templadas, a partir de emulsiones en planta, que resulten convencionales a los procesos de mezcla en caliente. Aunque los procesos más ambiciosos de reducción de temperatura hacen uso de las propiedades de espumado del asfalto, cuando entra en contacto con el aire y la humedad bajo presión; así a medida que se expande el volumen del asfalto, su viscosidad disminuye y se hace posible el revestimiento completo de los agregados.  Se mantienen o mejoran las características de rendimiento final de la mezcla asfáltica, para ello se requiere una tecnología para reducir la viscosidad del ligante durante las fases de mezcla y colocación, sin tener un efecto negativo a las temperaturas de uso.
Mezclas Semi - templadas	De 60°C a 100°C	Maximizar los ahorros energéticos y las emisiones aprovechando parte de la humedad presente en los agregados.	
Mezclas Tibias (WMA)	De 100°C a 135°C	Reducir los requerimientos térmicos de las mezclas en caliente.	
Mezclas en Caliente	De 135°C a 180°C	Producción de mezcla asfáltica convencional - mente.	Son mezclas convencionales donde la temperatura de producción es elevada y son consideradas mezclas de alto desempeño.

*Nota:* Diseño de mezclas asfálticas drenantes tibias – Senior Arrieta.



**Figura 11:** Clasificación de mezclas asfálticas por rango de temperaturas - Diseño de mezclas asfálticas drenantes tibias – Senior Arrieta)

1.6.7.4.3. *Por la proporción de vacíos en la mezcla asfáltica.* Este parámetro suele ser indispensable para que no se produzcan deformaciones plásticas como consecuencia de las variaciones térmicas y del paso de las cargas.

- Mezclas Cerradas o Densas: La proporción de vacíos no supera el 6 %.
- Mezclas Semi-cerradas o Semi-densas: La proporción de vacíos está entre el 6 % y el 10 %.
- Mezclas Abiertas: La proporción de vacíos supera el 12 %.
- Mezclas Porosas o Drenantes: La proporción de vacíos es superior al 20 %.

1.6.7.4.4. *Por el tamaño máximo del agregado pétreo.* (Padilla, 2004, cap. 3, p. 46).

Mezclas Gruesas: en este tipo de mezclas el tamaño del agregado pétreo excede los 10 mm.

Mezclas Finas: También pueden denominarse como morteros asfálticos, pues se trata de mezclas formadas básicamente por un árido fino incluyendo el polvo mineral y un ligante asfáltico.

1.6.7.4.5. *Por la granulometría.* (Padilla, 2004, cap. 3, p. 46).

Mezclas Continuas: cantidad bien distribuida o mezcla bien graduada de agregados pétreos de diferentes tamaños de agregado pétreo en el huso granulométrico.

Mezclas Discontinuas: cantidad muy limitada de tamaños o mezcla mal graduada de agregado pétreo en el huso granulométrico.

*1.6.7.4.6. Propiedades volumétricas.*

(Minaya, y Ordóñez, 2006, Cap. 10)

*1.6.7.4.7. Generalidades.* Las relaciones volumétricas entre el ligante asfáltico y los agregados son comportamientos muy importantes a estudiar.

Entre las propiedades volumétricas más importantes de una mezcla compactada de pavimento son: vacíos en el agregado mineral (VMA), vacíos de aire (Va), vacíos llenos con asfalto (VFA), y contenido de asfalto efectivo (Pbe), que proporcionan un índice del probable comportamiento de la mezcla durante su vida útil de servicio.

*1.6.7.4.8. Definiciones.* El agregado mineral es poroso y puede absorber agua y asfalto en diferentes grados. Además, varía con el tipo de agregado la proporción de agua a asfalto absorbido. Los tres métodos para medir las gravedades específicas de los agregados consideran estas variaciones.

Los métodos son:

*1.6.7.4.9. Gravedad específica bulk, GSB.* La relación del peso en el aire de un material permeable (incluyendo los vacíos permeables e impermeables del material) a temperatura establecida al volumen del agregado incluyendo los vacíos permeables. Figura 12.

$$G_{sb} = \frac{W_s}{(V_s + V_{pp})\gamma_w}$$

*Ecuación 1:* gravedad específica bulk. GSB

Donde:

Gsb gravedad específica bulk del agregado

Ws peso del agregado seco

Vs volumen del agregado con los vacíos impermeables

$V_{pp}$  volumen de vacíos permeables

$\gamma_w$  peso específica del agua, 1 gr/cm<sup>3</sup>

1.6.7.4.10. *Gravedad específica aparente, GSA*. Es la relación que existe entre el peso en el aire de un material impermeable, con respecto al volumen del agregado incluyendo los vacíos impermeables. Figura 12.

$$G_{sa} = \frac{W_s}{V_s \gamma_w}$$

Ecuación 2: gravedad específica aparente, GSA

Donde:

$G_{sa}$  gravedad específica aparente

$W_s$  peso del agregado seco

$V_s$  volumen del agregado con los vacíos impermeables

$\gamma_w$  peso específica del agua, 1 gr/cm<sup>3</sup>

1.6.7.4.11. *Gravedad específica efectiva, GSE*. Es la relación que existe entre el peso en el aire de un material permeable (excluyendo los vacíos permeables al asfalto) con respecto al volumen del agregado con los vacíos impermeables y vacíos permeables que no absorbieron asfalto. Figura 12.

$$G_{se} = \frac{W_s}{(V_s + V_{pp} - V_{ap}) \gamma_w}$$

Ecuación 3: gravedad específica efectiva, GSE

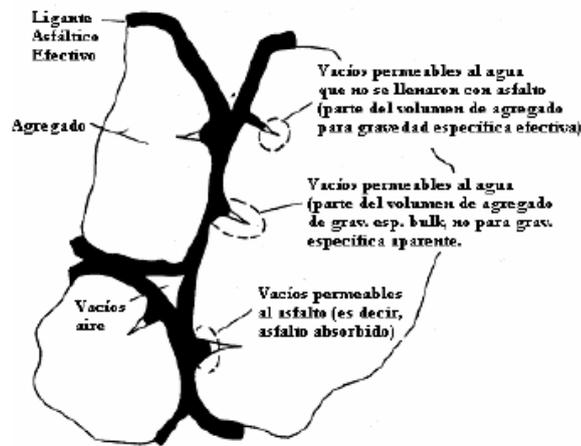
Donde:

$G_{se}$  gravedad específica efectiva

$W_s$  peso del agregado seco

$V_s$  volumen del agregado con los vacíos impermeables

$\gamma_w$  peso específico del agua, 1 gr/cm<sup>3</sup>



**Figura 12:** Propiedades Peso-Volumen en Mezclas Asfálticas Compactadas - Diseño moderno de pavimentos asfálticos– S. Minaya G. y A. Ordoñez H.).

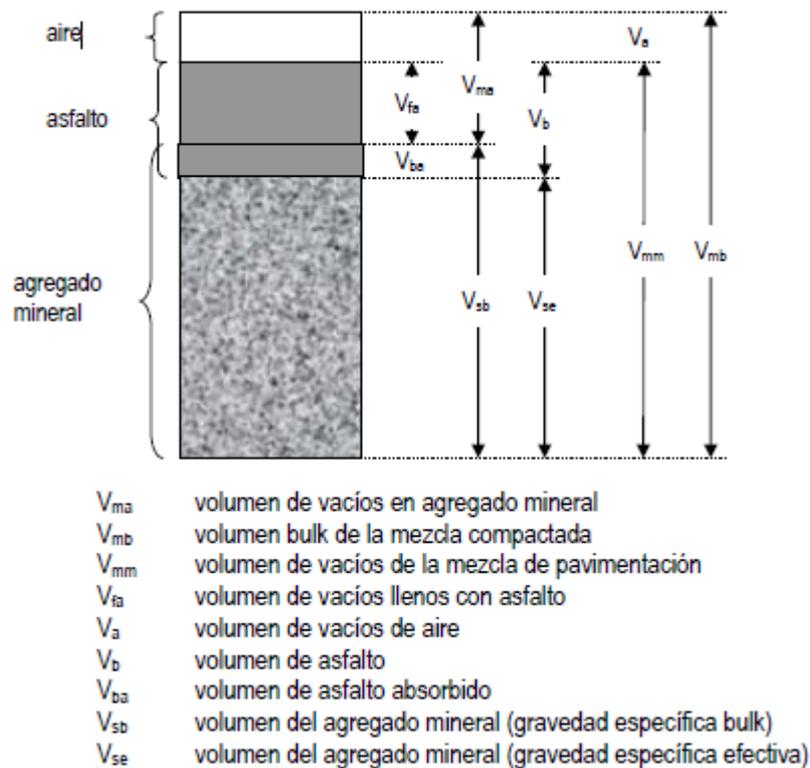
Las definiciones de vacíos en el agregado mineral (VMA), contenido de asfalto efectivo (Pbe), vacíos de aire (Va), y vacíos llenos con asfalto (VFA) son:

1.6.7.4.12. *Vacíos en el agregado mineral (VMA)*. Volumen de vacíos entre los agregados de una mezcla compactada que incluye los vacíos de aire y el contenido de asfalto efectivo. Ver figura 13.

1.6.7.4.13. *Contenido de asfalto efectivo (PBE)*. Es el asfalto total de la mezcla menos la cantidad de asfalto absorbida por el agregado. Ver figura 13.

1.6.7.4.14. *Vacíos de aire (VA)*. Volumen de las cavidades de aire entre las partículas de agregado cubiertas en toda la mezcla, expresada como porcentaje del volumen bulk de la mezcla compactada. Ver figura 13.

1.6.7.4.15. *Vacíos llenos con asfalto (VFA)*. Parte del volumen de vacíos entre las partículas de agregado (VMA) que es ocupado por el asfalto efectivo. Figura 13.



**Figura 13.** Volumen de materiales en especímenes. - Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos – S. Minaya G. y A. Ordoñez H.).

En el diseño de mezclas Superpave se requiere del cálculo de VMA en mezclas compactadas en función de la gravedad específica bulk del agregado.

Los vacíos en el agregado mineral (VMA) y los vacíos de aire ( $V_a$ ) se expresan como porcentaje por volumen de mezcla. Los vacíos llenos con asfalto (VFA) es el porcentaje de VMA lleno con asfalto efectivo.

El Instituto del Asfalto recomienda que los valores de VMA en mezclas compactadas se deben calcular en función de la gravedad específica bulk del agregado,  $G_{sb}$ .

1.6.7.5. *Análisis de mezclas compactadas.* La siguiente relación indica el procedimiento para analizar los vacíos de una mezcla compactada:

- Medida de la gravedad específica bulk del agregado grueso (AASHTO T85 o ASTM C127) y de los agregados finos (AASHTO T84 o ASTM C128).

- Medida de la gravedad específica del cemento asfáltico (AASHTO T228 o ASTM D70) y del filler mineral (AASHTO T100 o ASTM D854).
- Cálculo de la gravedad específica bulk de la combinación de agregados en la mezcla.
- Medida de la gravedad específica teórica máxima de la mezcla suelta (ASTM D2041 o AASHTO T209).
- Medida de la gravedad específica bulk de la mezcla compactada (ASTM D1188 o ASTM D2726 o AASHTO T166).
- Cálculo de la gravedad específica efectiva del agregado.
- Cálculo de la gravedad específica máxima de la mezcla a otros contenidos de asfalto.
- Cálculo del asfalto absorbido por el agregado.
- Cálculo del contenido de asfalto efectivo de la mezcla.
- Cálculo del porcentaje de vacíos en el agregado mineral en la mezcla compactada.
- Cálculo del porcentaje de vacíos de aire en la mezcla compactada.
- Cálculo del porcentaje de vacíos llenados con asfalto en la mezcla compactada.

1.6.7.5.1. *Gravedad específica bulk del agregado.* Cuando el agregado total consiste de fracciones separadas de agregados grueso, fino y filler, todos tienen diferentes gravedades específicas, se calcula usando:

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}}$$

*Ecuación 4:* gravedad específica bulk del agregado

Donde:

$G_{sb}$  gravedad específica bulk de la combinación de agregados

$P_1, P_2, P_n$  porcentajes individuales por peso del agregado

$G_1, G_2, G_n$  gravedad específica bulk individual del agregado.

La gravedad específica bulk del filler mineral es difícil determinarlo actualmente. Sin embargo, si se sustituye por la gravedad específica aparente del filler, el error es mínimo.

1.6.7.5.2. *Gravedad específica efectiva del agregado.* La gravedad específica efectiva se calcula con la gravedad específica teórica máxima de mezclas asfálticas (RICE) ASTM D-2041, con la siguiente expresión:

$$G_{se} = \frac{P_{mn} - P_b}{\frac{P_{mn}}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}}$$

*Ecuación 5:* gravedad específica efectiva del agregado

Donde:

Gse: Gravedad específica efectiva del agregado

Pmm: porcentaje en peso del total de la mezcla suelta, 100%

Pb: Porcentaje de asfalto para el peso total de la muestra

Gmm: gravedad específica teórica máxima (ASTM D-2041) de la mezcla (sin vacíos de aire)

Gb: Gravedad específica del asfalto

1.6.7.5.3. *Gravedad específica teórica máxima de mezclas con diferentes contenidos de asfalto.* Cuando se diseña una mezcla con un agregado dado, se requiere la gravedad específica teórica máxima, Gmm, con diferentes contenidos de asfalto para calcular el porcentaje de vacíos de aire para cada contenido de asfalto.

Luego de calcular la gravedad específica efectiva de los agregados considerando cada medición de las gravedades específicas teóricas máximas y promediando los resultados de Gse, la gravedad específica teórica máxima para algún otro contenido de asfalto puede obtenerse con la siguiente expresión:

$$G_{mm} = \frac{P_{mm}}{\frac{P_s}{G_{se}} + \frac{P_b}{G_b}}$$

*Ecuación 6:* gravedad específica teórica máxima de mezclas con diferentes contenidos de asfalto.

Donde:

Gmm: máxima gravedad específica teórica (ASTM D-2041) de la mezcla (sin vacíos de aire)

Pmm: porcentaje en peso del total de la mezcla suelta, 100%

Ps: contenido de agregado, porcentaje en peso del total de la mezcla

Pb: contenido de asfalto, porcentaje en peso del total de la mezcla

Gse: gravedad especifica efectiva del agregado

Gb: gravedad especifica del asfalto

1.6.7.5.4. *Absorción de asfalto.* El asfalto absorbido, Pba, a absorción de asfalto se expresa como el porcentaje en peso del agregado, se determina usando:

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

*Ecuación 7:* absorción de asfalto

Donde:

Pba: asfalto absorbido, porcentaje del peso de agregado.

Gse: gravedad especifica efectiva del agregado

Gb: gravedad especifica del asfalto

Gsb: gravedad especifica bulk del agregado

1.6.7.5.5. *Contenido de asfalto efectivo de la mezcla.* El contenido de asfalto efectivo, Pbe, viene a ser asfalto total menos la cantidad de asfalto absorbido dentro de las partículas de agregado. Se determina usando:

$$P_{be} = P_b - \frac{P_{ba}}{100} P_s$$

*Ecuación 8:* contenido de asfalto de la mezcla

Donde:

Pbe: contenido de asfalto efectivo, porcentaje del peso total de la mezcla.

Pb: contenido de asfalto, porcentaje del peso total de la mezcla.

P: asfalto absorbido, porcentaje ba del peso de agregado.

Ps: contenido de agregado, porcentaje del peso total de la mezcla.

*1.6.7.5.6. Porcentaje de vma en mezcla compactada.* Los vacíos en el agregado mineral, VMA, se definieron como los vacíos entre las partículas de agregado de la mezcla compactada, incluye los vacíos de aire y el contenido de asfalto efectivo, se expresa como un porcentaje del volumen total. El VMA se calcula en base a la gravedad específica bulk del agregado y se expresa como un porcentaje del volumen bulk de la mezcla compactada. Se determina usando:

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

*Ecuación 9:* porcentaje de vma en mezcla compactada

Donde:

VMA: vacíos en el agregado mineral, porcentaje del volumen bulk

Gsb: gravedad específica bulk del agregado total

Gmb: gravedad específica bulk de la mezcla compactada

(AASHTO T166; ASTM D1188 o D2726)

Ps contenido de agregado, porcentaje del peso total de la mezcla

*1.6.7.5.7. Porcentaje de vacíos de aire en mezcla compactada.* Los vacíos de aire, Va, consiste en determinar los pequeños espacios de aire del total de la mezcla compactada. Se determina usando:

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

*Ecuación 10:* porcentaje de vacíos de aire en mezcla compactada

Donde:

Va: vacíos de aire en la mezcla compactada, porcentaje del volumen total

Gmm: gravedad específica teórica máxima de la mezcla

Gmb: gravedad específica bulk de mezcla compactada

1.6.7.5.8. *Porcentaje VFA en mezclas compactadas.* La determinación de los vacíos llenos con cemento asfáltico, en su cálculo no incluye el asfalto absorbido, y se determina usando:

$$VFA = 100x \frac{(VMA - V_a)}{VMA}$$

*Ecuación 11:* porcentaje VFA en mezclas compactadas

Donde:

VFA: vacíos llenados con asfalto, porcentaje de VMA

VMA: vacíos en el agregado mineral, porcentaje del volumen bulk

Va: vacíos de aire en mezcla compactada, porcentaje del volumen total.

### **1.6.8. Método Marshall.**

El método Marshall en el diseño de mezclas asfálticas en caliente para la pavimentación fue formulado por Bruce Marshall, ingeniero de asfaltos del Departamento de Autopistas del estado de Mississippi. El Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos, a través de una extensa investigación y estudios de reciprocidad, adicionó y mejoró ciertos aspectos al procedimiento de prueba Marshall, a la vez que desarrolló un criterio de diseño de mezclas.

Originalmente el método era aplicable a mezclas asfálticas en caliente para pavimentación, que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1") o menor. Es así que el método Marshall modificado fue desarrollado para tamaños máximos arriba de 38 mm (1.5"), y está pensado para diseño en laboratorio y control en campo de mezclas asfálticas en caliente, con graduación densa.

Siendo esta prueba de estabilidad de naturaleza empírica, cuando se realizan modificaciones a los procedimientos estándar la importancia de los resultados en términos de estimar el comportamiento en campo se pierde. El método Marshall utiliza especímenes de prueba estándar de 64 mm (2 ½") de alto y 102 mm (4") de diámetro; y se preparan mediante un procedimiento de calentar, combinar y compactar mezclas de asfalto - agregado (ASTM D1559).

Los principales aspectos que evalúa el método Marshall son la densidad-análisis de vacíos, y la prueba de estabilidad y flujo de los especímenes compactados; sin dejar de mencionar que este proceso no estudia otras propiedades y características como pruebas para agregados minerales ni para cementos asfálticos.

### **1.6.9. Pruebas a las mezclas asfálticas compactadas.**

1.6.9.1. *Determinación de la gravedad específica.* La prueba de gravedad específica se desarrolla cuando los especímenes se encuentran a temperatura ambiente. Esta prueba se realiza de acuerdo con la Norma ASTM D1188, gravedad específica de mezclas asfálticas compactadas utilizando parafina; o la ASTM D2726, gravedad específica de mezclas asfálticas compactadas mediante superficies saturadas de especímenes secos.

Es importante recordar que para determinar cuál norma se debe utilizar, se realizan pruebas de absorción a la mezcla asfáltica compactada; si la absorción es mayor al 2%, se recurre a la norma ASTM D1188; en caso contrario la norma ASTM D2726.

1.6.9.2. *Prueba de estabilidad y flujo.* Se puede realizar inmediatamente después de haber concluido con el ensayo de gravedad específica, la prueba de estabilidad y flujo, que consiste en sumergir el espécimen en un baño María a  $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $140\text{ }^{\circ}\text{F} \pm 1.8\text{ }^{\circ}\text{F}$ ) de 30 a 40 minutos antes de la prueba. Pasado el tiempo estimado se retira el espécimen del baño María y cuidadosamente se seca la superficie. Ubicando y centrando el espécimen en la mordaza inferior, se coloca la mordaza superior y se centra completamente en el aparato de carga. Posteriormente, se aplica la carga de prueba al espécimen a una deformación constante de 51 mm (5") por minuto, hasta la falla. El punto de falla se define por la lectura de carga máxima obtenida. El número total de Newtons (lb) requeridos para que se produzca la falla del espécimen deberá registrarse como el valor de estabilidad Marshall.

Mientras la prueba de estabilidad está en proceso, si no se utiliza un equipo de registro automático, se deberá mantener el medidor de flujo sobre la barra guía y cuando la carga empiece a disminuir se deberá tomar la lectura inmediatamente, y registrarla como el valor de flujo final. La diferencia entre el valor de flujo final e inicial, expresado en unidades de 0.25 mm (1/100"), será el valor del flujo Marshall.

1.6.9.3. *Análisis de densidad y vacío.* Después de completar las pruebas de estabilidad y flujo, se realiza el análisis de densidad y vacíos para cada serie de especímenes de prueba. Se determina la gravedad específica teórica máxima (ASTM D2041) para al menos dos contenidos de asfalto, preferentemente con los porcentajes de asfalto más cercanos al óptimo.

Un calcula un valor promedio de la gravedad específica efectiva del total del agregado. Utilizando la gravedad específica y la gravedad específica efectiva del total del agregado, así como el promedio de las gravedades específicas de las mezclas compactadas, la gravedad específica del asfalto y la gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica, se calcula el porcentaje de asfalto absorbido en peso del agregado seco, porcentaje de vacíos (Va), el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA), y el porcentaje de vacíos llenados con asfalto (VFA).

## **II. MATERIAL Y MÉTODOS**

### **2.1. Tipo y diseño de la investigación**

#### **2.1.1. Tipo de investigación**

El tipo de investigación fue Aplicativo Tecnológico, tiene como objetivo la comparación de comportamiento de mezclas asfálticas convencional y modificadas.

“Este tipo tiene como objetivo crear nueva tecnología a partir de los conocimientos adquiridos a través de la investigación estratégica para determinar si éstos pueden ser útilmente aplicados con o sin mayor refinamiento para los propósitos definidos” (Tam, Vera & Oliveros; 2008).

#### **2.1.2. Diseño de investigación**

El tipo de investigación fue experimental, ya que para la elaboración de las mezclas asfálticas a 120°C y 100°C se experimentó con el porcentaje de zeolita añadido para cada caso en 1%, 2%, 3% de la misma y se analizó cada una de estas combinaciones aplicando la metodología Marshall. (Hernández, Fernández & Baptista; 2006).

### **2.2. Métodos de investigación**

Se utilizó el método analítico, ya que, una vez definidas las variables, pudo deducirse la hipótesis para un buen análisis de los agregados que se utilizaron en el diseño de las mezclas asfálticas. El método deductivo, por el hecho de que a partir de la idea que de una mezcla asfáltica caliente se puede generar una mezcla asfáltica modificada con el uso del mineral zeolita como filler. El método inductivo, dado que en un futuro se optará por realizar una mezcla modificada con mejores propiedades mecánicas cumpliendo con los requisitos establecidos en el método Marshall. (Hernández, Fernández & Baptista; 2006).

### **2.3. Población y muestra**

#### **2.3.1. Población**

La mezcla óptima para clase A, clase B y clase C, se encontró mediante ensayos previos con cantidades de asfalto en proporciones de 4.5%, 5%, 5.5%, 6%, elaborando 3 briquetas por cada porcentaje de asfalto

Se elaboró 3 briquetas con el porcentaje óptimo de asfalto encontrado y se realizaron ensayos Marshall

Las mezclas asfálticas modificadas se diseñaron a temperaturas de 140°C, 130°C, 120°C y 100°C, con adición de Zeolita en proporciones de peso en 1%, 2% y 3%, elaborando 3 briquetas por cada muestra, se consideró estas temperaturas por los criterios de mezclas asfálticas caliente (MAC), se producen entre 140 y 180 °C. Las mezclas asfálticas tibias (MAT), se producen en un rango entre 120°C y 140°C, las mezclas asfálticas semi-tibias (MAST) tienen la temperatura de producción por debajo de los 100°C, las mezclas asfálticas en frío se producen a temperatura ambiente utilizando emulsiones o asfaltos espumados. Loría, L. (Abril, 2011). Mezclas asfálticas tibias (MAT). Pitra: Programa de infraestructura del transporte, 02(15), 01.

### **2.3.2. Muestra**

144 briquetas elaboradas mediante la metodología Marshall

## **2.4. Variables**

### **Variable independiente.**

Zeolita

### **Variable dependiente.**

Mezcla asfáltica

## 2.5. Operacionalización

**Tabla 9.**  
*Operacionalización de variable independiente.*

Variable	Definición		Dimensión	Indicador	Índice	Técnica de recolección	Instrumento de recolección	Instrumento de medición
	Conceptual	Operacional						
Zeolita	Minerales aluminosilicatos micro porosos con la capacidad de hidratarse y deshidratarse (altas temperaturas) de un modo reversible.	Determinación del contenido de humedad del mineral sometido a altas temperaturas	Propiedades	Humedad	%	Análisis documentario y ensayos de laboratorio	Formatos LEM	Balanza

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 10.***Operacionalización de variable dependiente.*

Variable	Definición		Dimensión	Indicador	Índice	Técnica de recolección	Instrumento de recolección	Instrumento de medición
	Conceptual	Operacional						
Mezcla asfáltica	Combinación de asfalto y agregados minerales pétreos en proporciones exactas que se utiliza para construir carpetas asfálticas.	Medición de las propiedades como estabilidad y flujo por medio del aparato Marshall	Características y propiedades físicas	Ensayos Marshall - Flujo  Ensayos Marshall - Estabilidad	mm  N	Ensayos de laboratorio	Formatos LEM	Máquina de ensayos Marshall

Fuente: Elaboración propia.

### **2.5.1. Tipo de investigación**

El tipo de investigación fue Aplicativo Tecnológico, tiene como objetivo la comparación de comportamiento de mezclas asfálticas convencional y modificadas.

“Este tipo tiene como objetivo crear nueva tecnología a partir de los conocimientos adquiridos a través de la investigación estratégica para determinar si éstos pueden ser útilmente aplicados con o sin mayor refinamiento para los propósitos definidos” (Tam, Vera & Oliveros; 2008).

### **2.6. Hipótesis**

El uso de la zeolita influye en la trabajabilidad de mezclas asfálticas convencionales, cumpliendo con los parámetros establecidos en la metodología Marshall para las clases A, B y C de vías.

### **2.7. Técnicas de recolección de datos**

Observación. Se utilizó esta técnica con el fin de obtener todos los datos posibles al momento del desarrollo de los ensayos, evaluar comportamientos y características que se presentaron en la investigación. El análisis de documentos. Se utilizó esta técnica de recolección, con el fin de conocer la normatividad propuesta con respecto a los ensayos a realizarse, también se analizaron documentos relacionados con el tema de estudio. Ensayos en laboratorio. Se realizaron los ensayos necesarios para la debida elaboración de las mezclas. Entrevista. Se realizó el uso de entrevistas para establecer una comunicación interpersonal con los especialistas en la rama de pavimentos. La entrevista se realizará de una forma básica con respecto a los objetivos de esta investigación, para eso se utilizó preguntas estrechamente relacionadas al tema. (Sampieri., et al. 2014)

### **2.8. Instrumentos de recolección de datos**

#### **2.8.1. Guía de observación.**

Se emplearon los siguientes formatos:

- a. Formato y guías para el estudio y ensayos de materiales.
- b. Formato y guías para elaboración de diseño de mezcla.

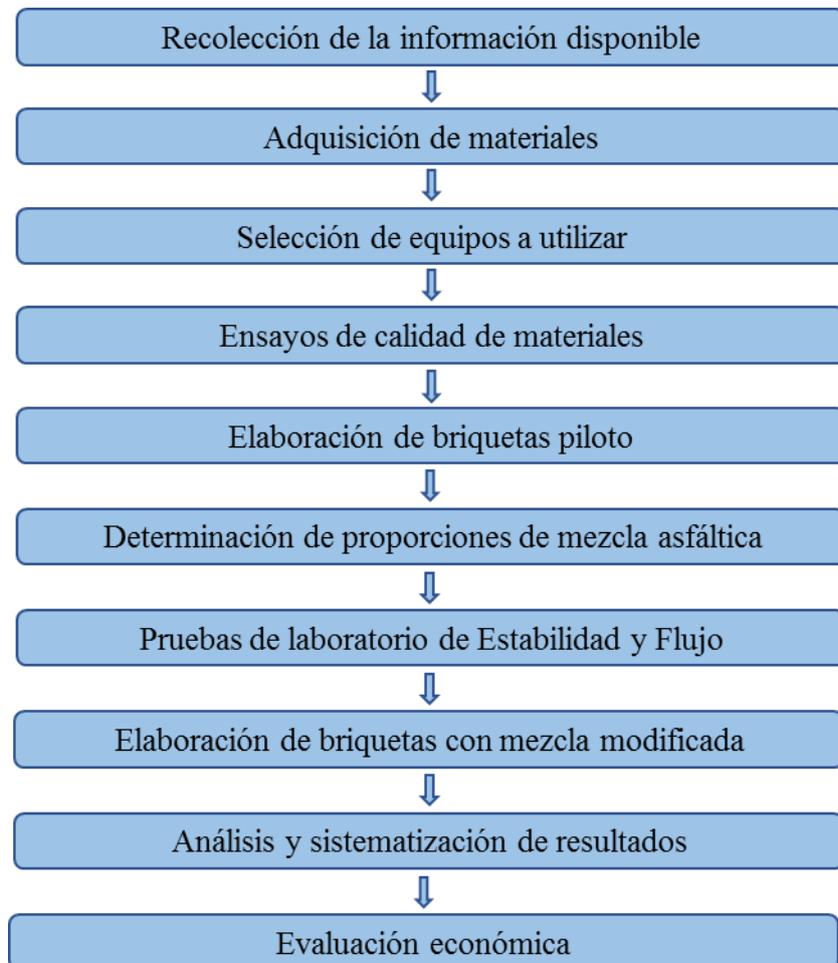
Se revisaron normas técnicas que facilitaron un adecuado desarrollo para la recolección de datos, así como también la realización de los ensayos de laboratorio conllevando a obtener resultados adecuados.

### 2.8.2. Guía de análisis documental.

Como guía documental para la realización ensayos se tuvo la norma técnica peruana y el “Manual de Carreteras – Especificaciones técnicas Generales para Construcción - EG-2013” sección 423.

### 2.8.3. Procedimiento para la recolección de datos

#### 2.8.3.1. Diagrama de flujo de procesos.



**Figura 14.** Diagrama de Procesos.

## **2.9. Validación y confiabilidad de instrumentos**

### **2.9.1. Validación de instrumentos**

La fase de validación de la investigación se realizaron ensayos de calidad y de control además de la interpretación correcta de los resultados para asegurar la veracidad de los mismos y que cumplen con los requerimientos establecidos para la evaluación de las mezclas asfálticas. (Sampieri., et al. 2014)

### **2.9.2. Confiabilidad de instrumentos**

El presente estudio es confiable a medida que la población es real además cuenta con una buena recolección de datos donde el grado del resultado de la investigación es consistente y claro. (Sampieri., et al. 2014).

### III. RESULTADOS

#### 3.1. Resultados Diseño de mezcla asfáltica en caliente a 140°C.

##### 3.1.1. Calidad de los agregados.

###### 3.1.1.1. Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos. NTP 400.012.

El ensayo de análisis granulométrico de los agregados permitió determinar cuantitativamente la distribución de tamaños de las partículas, utilizando diversos tamices desde la malla  $\frac{3}{4}$  hasta la malla N° 200.

Los tamaños de los tamices utilizados en el ensayo de granulometría de los materiales pétreos fueron  $\frac{3}{4}$ ",  $\frac{1}{2}$ ",  $\frac{3}{8}$ ",  $\frac{1}{4}$ ", N°4, N°10, N°16, N°30, N°40, N°50, N°100, N°200.

Se seleccionó por cuarteo el material a tamizar (3.002 Kg para agregado grueso y 0.500 Kg para agregado fino), se lavó el material a través de la malla N° 200, luego de su posterior secado en el horno a 110°C se procedió al proceso de tamizado obteniendo los siguientes resultados.



*Figura 15:* Tamizado de los agregados.

3.1.1.1.1. Análisis granulométrico del agregado grueso.

**Tabla 11.**  
*Análisis granulométrico del agregado grueso*

Tamiz	Porcentaje que pasa acumulado
2"	100.00
1 1/2"	100.00
1"	100.00
3/4"	100.00
1/2"	87.55
3/8"	61.33
1/4"	31.12
N°04	18.60
N°10	0.60
N°16	0.37
N°30	0.30
N°40	0.27
N°50	0.25
N°100	0.22
N°200	0.12
PASA 200	0.00

Nota: Elaboración propia.

3.1.1.2. Análisis granulométrico del agregado fino.

**Tabla 12.**  
*Análisis granulométrico del agregado fino.*

Tamiz.	Porcentaje que pasa acumulado
2"	100.00
1 1/2"	100.00
1"	100.00
3/4"	100.00
1/2"	100.00
3/8"	100.00
1/4"	100.00
N°04	99.72
N°10	93.18
N°16	77.44
N°30	52.28
N°40	42.12
N°50	32.00
N°100	18.41
N°200	7.65
PASA 200	0.00

Nota: Elaboración propia.

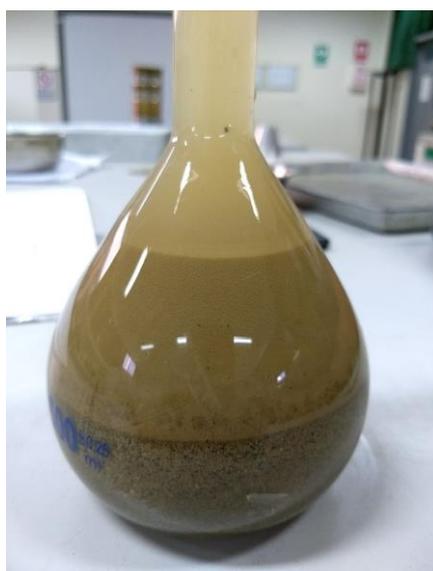
Se combinaron ambos agregados en diferentes proporciones para buscar la combinación de la granulometría que cumpla con los requerimientos establecidos en el MAC 2 del “Manual de Carreteras – Especificaciones técnicas Generales para Construcción - EG-2013” sección 423, obteniendo una relación de 48% de agregado grueso y 52% de agregado fino, el resultado de la gradación se muestra en la siguiente tabla.

**Tabla 13.**  
*Análisis granulométrico global.*

Tamiz	Porcentaje que pasa acumulado
2"	100.00
1 1/2"	100.00
1"	100.00
3/4"	100.00
1/2"	93.77
3/8"	80.66
1/4"	65.56
N°04	59.16
N°10	46.89
N°16	38.91
N°30	26.29
N°40	21.20
N°50	16.13
N°100	9.31
N°200	3.89
PASA 200	0.00

Nota: Elaboración propia.

### 3.1.1.3. *Peso específico y absorción del agregado fino.* NTP 400.022



**Figura 16.** Agregado fino en la fiola.

Este ensayo permitió calcular los vacíos en el agregado.

Para realizar los ensayos de los agregados gruesos y de los agregados finos, se realizó de acuerdo al “Manual de Ensayo de Materiales” – MTC-E 205.

Se seleccionó una muestra del material representativo mediante cuarteo (MTC E 201), se secó la muestra en horno hasta peso constante, para luego sumergirla en agua durante 24 horas, se decantó el agua evitando pérdida de finos y se extendió sobre una superficie plana para exponerla a una corriente de aire tibio, la muestra estuvo apta cuando colocada apisonándola con 25 golpes con una varilla metálica (apisonador) en el molde cónico, esta se derrumbaba al levantar el molde, esta condición es considerada material con superficie seca. Se introdujo 500 gramos de este material en una fiola y se agitó para eliminar el aire para su posterior llenado con agua hasta la marca de 500 cm<sup>3</sup>, se tomaron los pesos y se llevó al horno por 24 horas para tomar el peso seco del material.

**Tabla 14.**

*Resultados de gravedad específica y absorción de agregados finos*

Resultados			
Peso específico de la masa	2.51	gr/cm <sup>3</sup>	
Peso específico de masa saturada con superficie seca	2.53	gr/cm <sup>3</sup>	
Peso específico aparente	2.54	gr/cm <sup>3</sup>	
Absorción	0.44	%	

Nota: Elaboración propia.

En la tabla se observa que el peso específico aparente es de 2.54 gr/cm<sup>3</sup> y que el porcentaje de absorción del agregado finos es de 0.44%.

#### 3.1.1.4. *Peso específico y absorción de agregados gruesos.* NTP 400.021

Este ensayo permitió calcular los vacíos en el agregado.

Para realizar los ensayos de los agregados gruesos y de los agregados finos, se realizó de acuerdo al “Manual de Ensayo de Materiales” – MTC-E 206.

Se seleccionó una muestra del material retenido hasta la malla N°8 (2.796 Kg), se secó la muestra en horno hasta peso constante, para luego sumergirla en agua durante 24 horas, se eliminó toda película de agua secándola sobre una tela, se pesó el material obteniendo su

peso saturado con superficie superficialmente seca y se introdujo en una canastilla en agua, obteniendo su peso sumergido.

**Tabla 15.**

*Resultados de peso específico y absorción de agregados gruesos.*

Resultados		
Peso específico de masa (Pem)	2.43	(gr/cm <sup>3</sup> )
Peso específico de masa saturada con superficie seca (Pesss)	2.45	(gr/cm <sup>3</sup> )
Peso específico aparente (Pea)	2.48	(gr/cm <sup>3</sup> )
Absorción	0.93	%

Nota: Elaboración propia.

En la tabla se aprecia que el peso específico aparente es de 2.48 gr/cm<sup>3</sup> y que el porcentaje de absorción del agregado grueso es de 0.93%.

3.1.1.5. *Agregados.* Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la degradación en agregados gruesos de tamaños menores por abrasión e impacto en la máquina de los ángeles. NTP 400.019



**Figura 17.** Ensayo de abrasión en la máquina de los ángeles.

Este ensayo permitió medir la degradación de los agregados mediante abrasión, impacto y trituración (ensayo de abrasión de los ángeles).

Se lavó, secó hasta obtener peso constante a  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  y se tamizó material por las mallas  $\frac{3}{4}$ ",  $\frac{1}{2}$ " hasta obtener 2504 gr y 2503 gr respectivamente a las mallas mencionadas, según manual de ensayos se mezcló el material y se introdujo a la máquina de los ángeles con 11

esferas calibradas de acero, haciendo rotar 500 revoluciones a una velocidad de 33 RPM. Posteriormente se tamizó el material a través de la malla N°12.

Para realizar los ensayos de los agregados gruesos y de los agregados finos, se realizó de acuerdo al “Manual de Ensayo de Materiales” - MTC-E 207, se utilizó la gradación “B” (N° de esferas: 11), obteniendo los siguientes resultados.

**Tabla 16.**

*Porcentaje de desgaste de abrasión del agregado grueso*

Mallas		Porcentaje de desgaste por abrasión
PASA	RETIENE	
3/4"	1/2"	12.00 %
1/2"	3/8"	

Nota: Elaboración propia.

El ensayo de abrasión de desgaste por abrasión de los ángeles dio como resultado una degradación de agregados del 12 %.

#### 3.1.1.6. *Porcentaje de caras fracturadas.* ASTM D 4791.

Se realizó este ensayo comprobando los requerimientos de estabilidad a los tratamientos de superficies de agregados, además de verificar que proporcionen fricción incrementada por la textura para los agregados usados en los pavimentos.

Para realizar los ensayos de los agregados gruesos y de los agregados finos, se realizó de acuerdo al “Manual de Ensayo de Materiales” - MTC-E 210, obteniendo los siguientes resultados.

**Tabla 17.**

*Porcentaje de caras fracturadas.*

Malla	Porcentaje con una cara fracturada (%)	Porcentaje con dos o más caras fracturadas (%)
1/2"	95	87
3/8"	96	89
TOTAL	95	87

Nota: Elaboración propia.

Se consideró los valores calculados con aproximación al 1%, siendo 95% el total del material con una cara fracturada y 87% el material con dos caras fracturadas, haciendo una relación de 95/87.

3.1.1.7. *Partículas chatas y alargadas*. ASTM D 4791.



**Figura 18.** Calibrador de partículas chatas y alargadas.

Este ensayo permitió estudiar las partículas chatas y alargadas que pueden dificultar la colocación de los materiales e interferir con la consolidación.

Se procedió a realizar los ensayos de acuerdo al Manual de ensayo de materiales MTC E 223, obteniendo los siguientes resultados.

**Tabla 18.**

*Porcentaje de partículas chatas y alargadas.*

Malla	Porcentaje de partículas chatas y alargadas (%)
1/2	5.09
1/8	8.91
1/4	9.42
N°4	8.33
TOTAL	8.55

Nota: Elaboración propia.

Los valores obtenidos como porcentaje de partículas chatas y alargadas en las mallas 1/2", 1/8", 1/4" y N°4 se muestran en la tabla anterior, siendo todos menor a 10%.

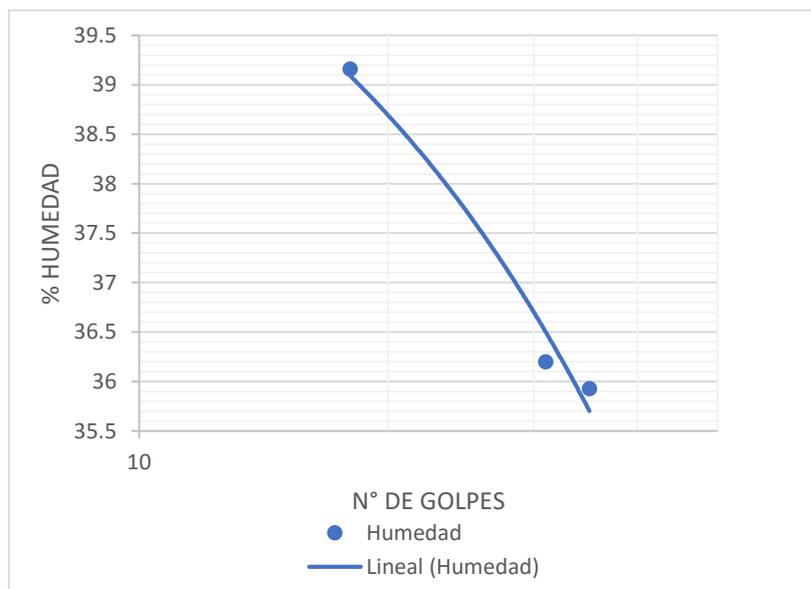
3.1.1.8. *Índice de plasticidad*. Los ensayos de límite de plasticidad y límite líquido nos permitieron estudiar los suelos finos.

Se procedió a realizar los ensayos de acuerdo al Manual de ensayo de materiales MTC E 110 y MTC E 111. El resultado de los ensayos llevó a encontrar el índice de plasticidad de materiales estudiados.

Esta muestra se obtuvo del material pasante del tamiz 4.25 mm (N° 40) de la fracción fina. Se colocó la muestra en un depósito y mezclándose completamente con 15 a 20 ml de agua destilada, amasándola con una espátula en forma alternada y repetida. Una vez preparada una pasta del material, se colocó la pasta en la Máquina de Casagrande, para luego hacer una ranura con el acanalador, según el eje de simetría de la capsula. Se giró el brazo de Casagrande a una velocidad de 2 RPS. Estas pruebas se realizaron para un cierre (distancia  $\frac{1}{2}$ " de la ranura; que requiera una prueba para un cierre entre 25 a 35 golpes, para un cierre entre 20 y 30 golpes, y una para un cierre que requiera de 15 a 25 golpes. Luego pesar la muestra y secarlo al horno.

Para el ensayo de límite plástico se humedeció material para formar cilindros de suelo de 3.2 mm de diámetro, rodando el material entre la palma de la mano y una superficie lisa (vidrio esmerilado) hasta que los cilindros se desmoronen. Este ensayo se realizó tomando como guía la norma NTP 339.129. El límite plástico (LP) es la frontera entre el estado plástico y el semisólido de un suelo. En este estado el material puede ser deformado rápidamente o moldeado sin recuperación elástica, existen cambios de volumen, agrietamiento o desmoronamiento.

Para el material pasante el tamiz N° 200 se realizó IDEM a los pasos anteriores descritos para el material pasante el Tamiz N° 40.



**Figura 19.** Límite líquido.

**Tabla 19.***Límites de Atterberg*

	Límite líquido	Límite plástico
Límites	37.70	26.07
Índice de plasticidad	11.63	

Nota: Elaboración propia.

**3.1.2. Diseño de la mezcla asfáltica a 140°C.**

3.1.2.1. *Diseño de la mezcla patrón por método Marshall.* Para el diseño de la mezcla patrón primeramente se estudió las propiedades de los agregados y asfalto, posteriormente se procedió a fabricar las briquetas para realizar los ensayos del método Marshall.

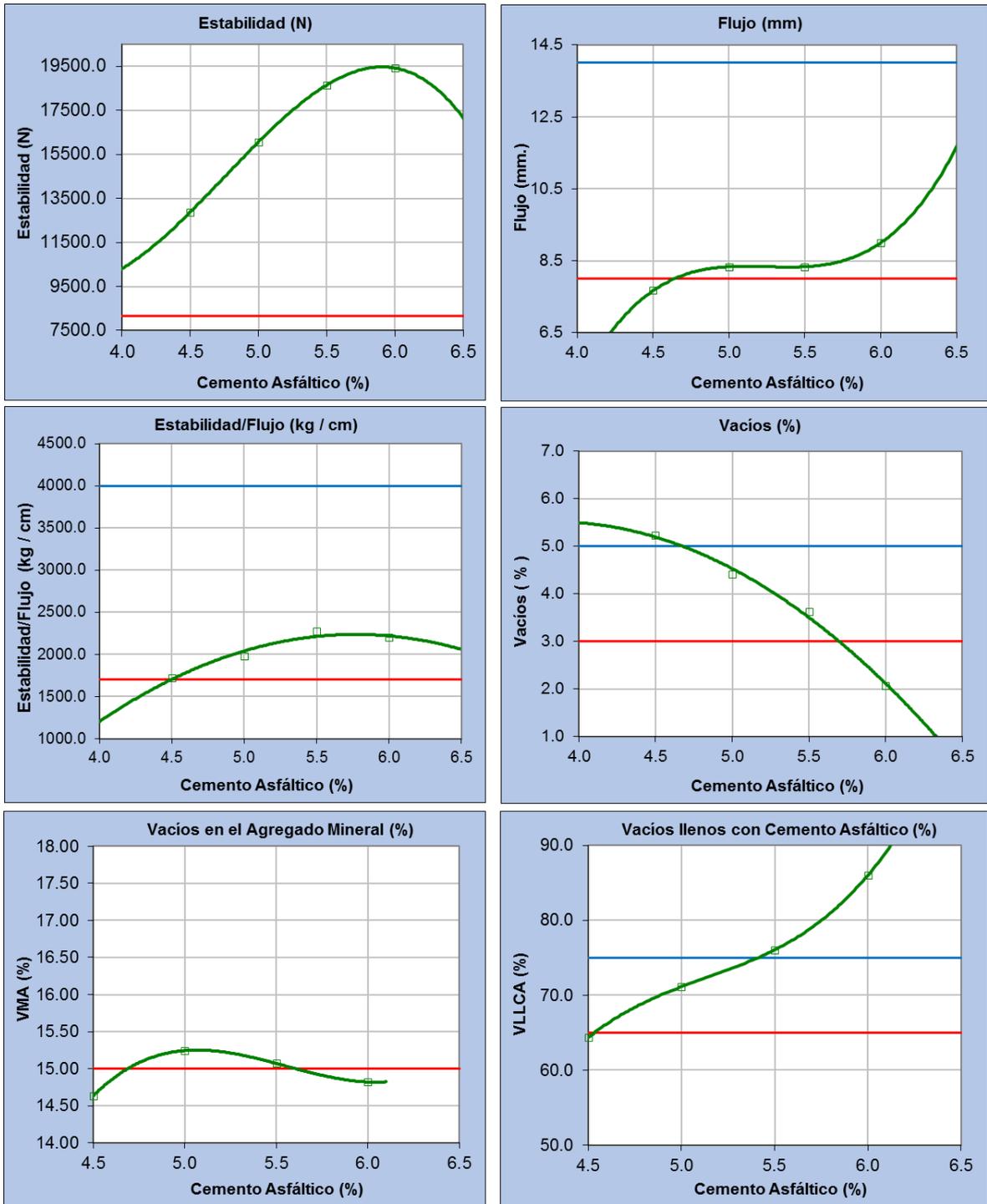
3.1.2.2. *Dosificación de los agregados.* Las especificaciones técnicas para pavimento asfáltico requieren que las partículas de los agregados cumplan los parámetros establecidos, en el siguiente procedimiento se muestra el cálculo de las proporciones para hallar el porcentaje de asfalto óptimo.

Para la obtención del porcentaje óptimo de asfalto para la clase A se elaboraron 12 briquetas, fueron 3 especímenes por cada porcentaje de 4%, 4.5%, 5% y 5.5% de asfalto, dichos especímenes tuvieron las dimensiones promedio de de 2” de altura por 4” de diámetro, los mismos procedimientos se siguieron para mezclas asfálticas de clase B y clase C, obteniendo como porcentaje de dosificación de asfalto con la misma proporción (5%).

**Tabla 20.***Dosificación de mezcla asfáltica elaborada a 140°C, clase A,B,C*

Material	Porcentaje	Peso
	100	1200.0
Asfalto	5	60.0
Agregado grueso	44.64	535.7
Agregado fino	48.36	580.3

Nota: Elaboración propia.



**Figura 20.** Porcentaje óptimo de asfalto Clase A - Elaboración propia.

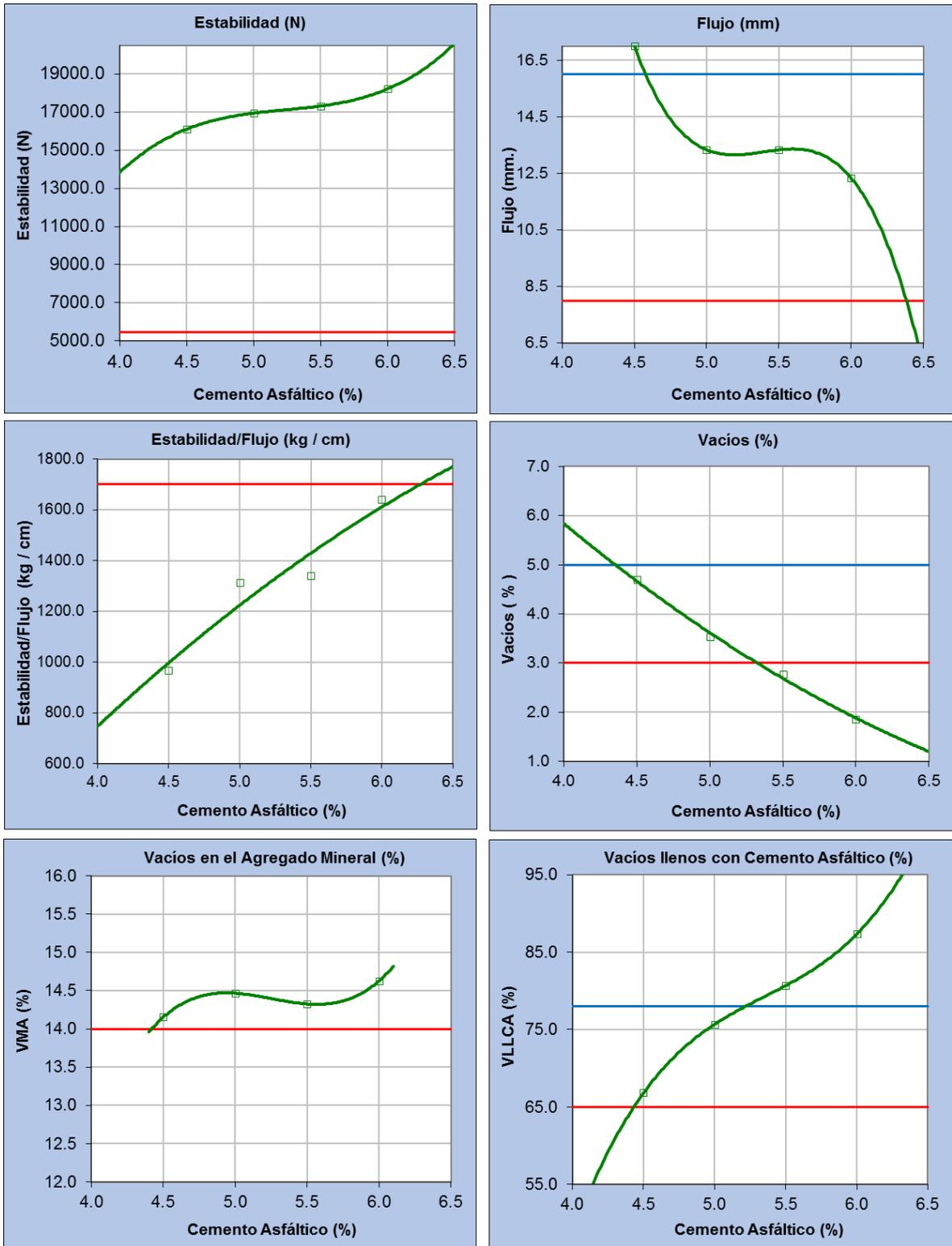
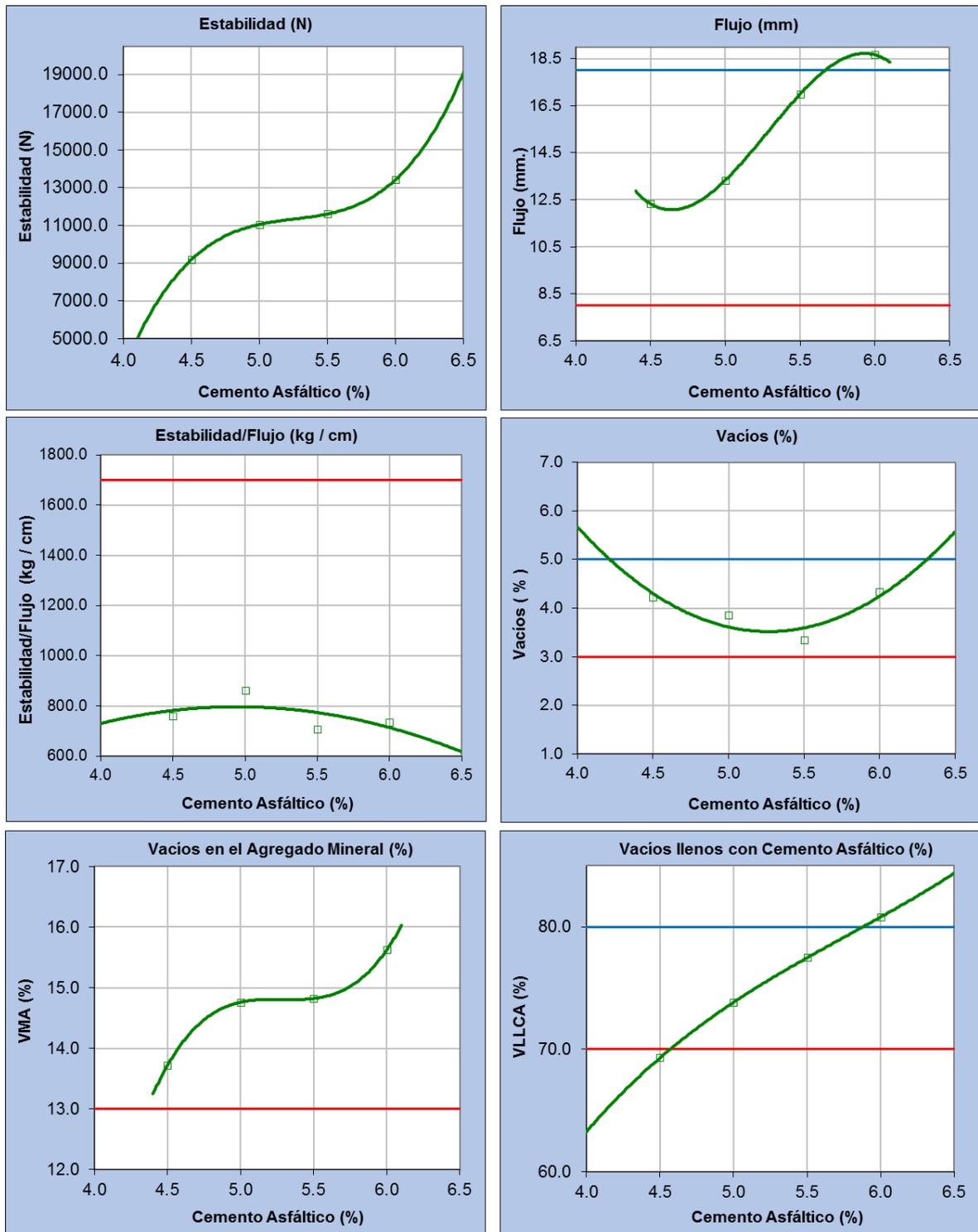


Figura 21. Porcentaje óptimo de asfalto Clase B - Elaboración propia.



**Figura 22.** Porcentaje óptimo de asfalto Clase C - Elaboración propia.

En las figuras anteriores se muestran los resultados de los ensayos ejecutados a las briquetas para las proporciones de asfalto ensayados (4.5%, 5.0%, 5.5% y 6.0%) para clase A. Para la obtención del porcentaje óptimo de asfalto, para clase B se elaboraron 12 briquetas, fueron 3 especímenes por cada porcentaje de 4%, 4.5%, 5% y 5.5% de asfalto, dichos especímenes

tuvieron las dimensiones promedio de 2” de altura por 4” de diámetro para la obtención del porcentaje óptimo de asfalto y para clase C se elaboraron 12 briquetas, fueron 3 especímenes por cada porcentaje de 4%, 4.5%, 5% y 5.5% de asfalto, dichos especímenes tuvieron las dimensiones promedio de de 2” de altura por 4” de diámetro.

### 3.2. Zeolita como filler

#### 3.2.1. Humedad de la zeolita

MTC E 108

El ensayo tuvo como finalidad determinar el contenido de humedad de la Zeolita

Se procedió a la trituración de la zeolita mecánicamente y se seleccionó el material pasante la malla N°200, se pesó y el material a temperatura ambiente y se llevó al horno para su secado y posterior a ello se obtuvo su peso seco.



**Figura 23.** Zeolita como agregado y como filler.

**Tabla 21.**

*Porcentaje de Humedad de la Zeolita.*

Muestra (gr)	Peso de agua	Porcentaje de agua
192.81	5.11	2.65
81.00	2.41	2.98
27.77	0.87	3.13

Nota: Elaboración propia.

De la tabla concluimos que el porcentaje promedio de humedad hallado en el mineral zeolita que pasa el tamiz N°200 es de 2.92 %

### **3.3. Mezclas asfálticas modificadas.**

Los especímenes de mezclas asfálticas compactadas fueron fabricados con las siguientes dimensiones, teniendo una altura de 2" y un diámetro de 4". Para la clase A, mediante la metodología Marshall, se fabricaron 3 especímenes por cada proporción de contenido de asfalto de 5 % obtenido de la mezcla patrón, adicionando 1, 2 y 3 % de Zeolita a 100° y 120°C respectivamente, además se elaboraron briquetas con las mismas combinaciones de porcentaje de Zeolita a temperaturas de 130 °C y 140°C para evaluar la influencia del mineral, también se realizaron ensayos para clase B con 5% de asfalto y para la clase C con 5% de asfalto. Los ensayos físicos como vacíos, densidad, estabilidad y flujo a tracción indirecta se estudiaron en estos especímenes.

Los agregados para el diseño de mezcla asfáltica modificada fueron secados a peso constante a una temperatura de 100°C, posteriormente se calentaron los agregados a una temperatura de 100, 120, 130 y 140°C, se utilizó un termómetro (Modelo: Xueliee GM320) de un rango de -50 °C a 380°C con sensibilidad de 1°C.

La mezcla de agregados y asfalto se realizó a una temperatura de 100°C, 120°C, 130 °C y 140°C con peso de 1200 gr. Para realizar la mezcla a la temperatura de 140°C se mezcló por 3 minutos, para la mezcla 130°C se mezcló durante 4 minutos, a 120°C se mezcló por un tiempo de 5 minutos y para realizar la mezcla a temperatura de 100°C se mezcló por un tiempo de 8 minutos.

En el proceso de compactación de los especímenes se calentó el martillo de compactación a temperaturas de 90°C, se utilizó papel no absorbente en la base del molde. Se procedió con la compactación de la mezcla a 75 golpes con el martillo compactador por ambos lados para las mezclas de clase A, 50 golpes para las mezclas de clase B y 35 golpes para las mezclas de clase C.

Posterior a la compactación los especímenes se enfriaron por dos horas al medio ambiente para prevenir daños y luego se extrajo el espécimen del molde en el extractor de especímenes, para seguidamente identificarlos con sus porcentajes de mezcla y anotar sus medidas (dos medidas de diámetro y cuatro medidas de altura)

Se determinó el peso seco de cada espécimen después de dos horas de enfriarse al aire libre y también de encontró el peso específico bulk como indica el MTC E 514 (Peso Aparente y Peso Unitario de Mezclas Asfálticas Compactadas empleando Especímenes Saturados con Superficie Seca).

Se sumergió los especímenes agua a 25°C por 5 minutos, para posteriormente hallar su peso sumergido en agua. Se determinó inmediatamente después su peso saturado superficialmente seco.

El ensayo de estabilidad y flujo se desarrolló para tres especímenes con las mismas características de materiales y preparación de muestras, los cuales se sumergieron en baño María a  $60 \pm 1^\circ\text{C}$  por el lapso de 30 min.

Para el ensayo en la máquina de carga, el cabezal se calentó en horno a una temperatura de 30°C, considerando el tiempo desde la remoción del espécimen del baño de agua María hasta el ensayo en la máquina de carga no debe exceder de 30 segundos y el ensayo se efectuó a una razón constante de 50 mm/min hasta registrar la máxima carga y flujo indicado en la máquina de carga, obteniendo los siguientes resultados.

**Tabla 22.**  
*Resultados de mezcla asfáltica elaborada a 140°C, clase A*

Cemento asfáltico 5% en peso de la mezcla	% Zeolita	1.0	2.0	3.0
Estabilidad Corregida	(N)	19713.0	19393.9	20564.5
Flujo	(mm)	10.67	13.33	15.00
Estabilidad/Flujo	(kg/cm)	1892.5	1486.0	1398.0
Vacíos	%	2.6	3.8	2.4
VMA	%	12.47	13.79	12.77
Vacíos Llenados con C.A.	%	78.78	72.53	80.87

Nota: Elaboración propia.

En la figura 23 se observa los resultados de los ensayos realizados a los especímenes fabricados a 140°C con variación de 1%, 2% y 3% de Zeolita para clase A, se muestran los valores de estabilidad y flujo encontrados tras los ensayos Marshall y la relación estabilidad/flujo de estos resultados, además de ello se muestra el porcentaje de vacíos, vacíos en el agregado mineral y vacíos llenos con cemento asfáltico.

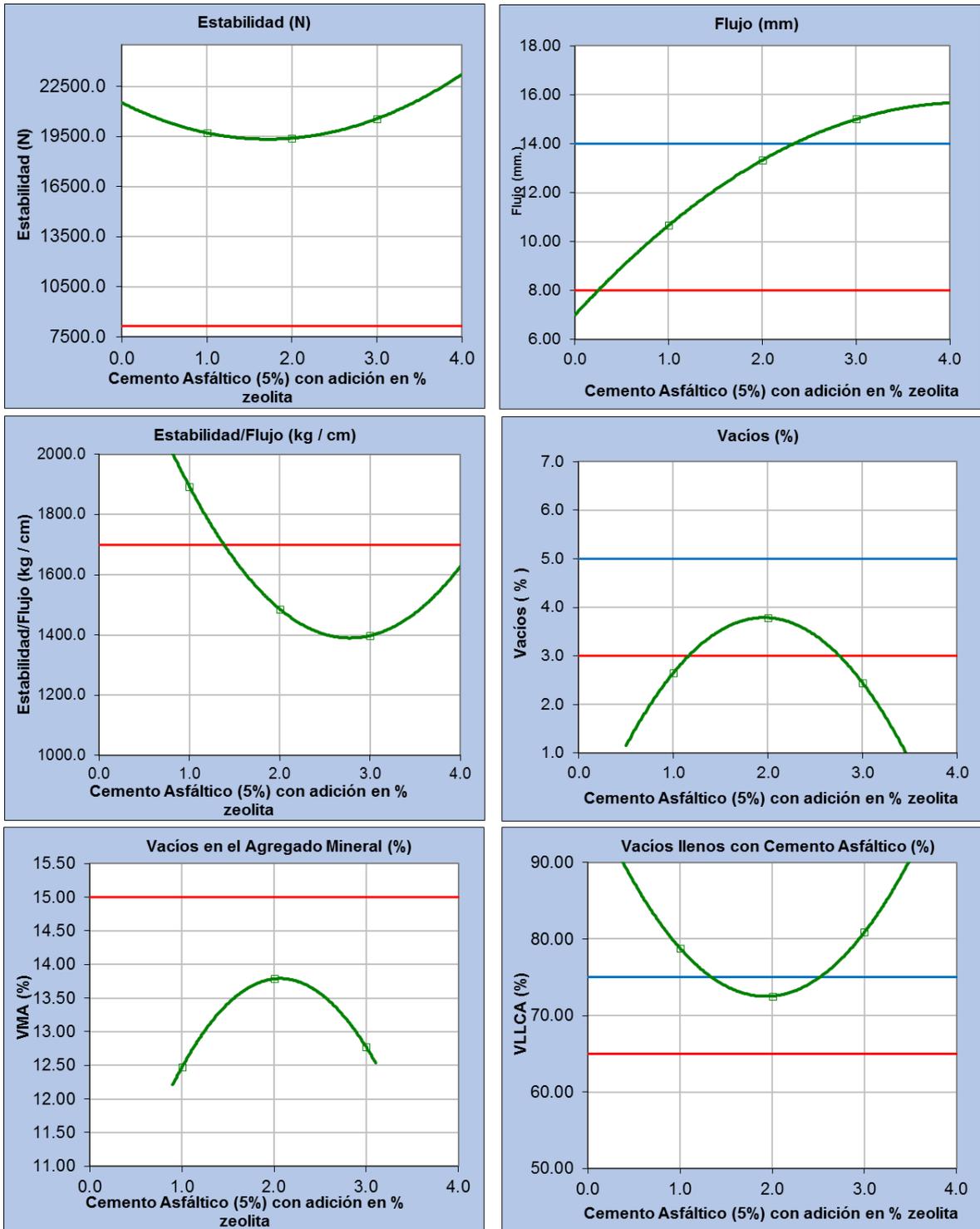


Figura 24. Ensayos realizados a 140°C con 1%, 2% y 3% de Zeolita, clase A.

**Tabla 23.***Resultados de mezcla asfáltica elaborada a 130°C, clase A.*

Cemento Asfáltico 5% en peso de la mezcla	% zeolita	1.0	2.0	3.0
Estabilidad Corregida	(N)	14711.4	15030.7	15879.7
Flujo	(mm)	15.33	16.00	14.67
Estabilidad/Flujo	(kg/cm)	982.9	956.6	1124.1
Vacíos	%	4.3	3.5	2.8
VMA	%	14.0	13.5	13.1
Vacíos Llenados con C.A.	%	69.1	74.4	78.4

Nota: Elaboración propia.

En la figura 24 se observa los resultados de los ensayos realizados a los especímenes fabricados a 130°C con variación de 1%, 2% y 3% de Zeolita para clase A, se muestran los valores de estabilidad y flujo encontrados tras los ensayos Marshall y la relación estabilidad/flujo de estos resultados, además de ello se muestra el porcentaje de vacíos, vacíos en el agregado mineral y vacíos llenos con cemento asfáltico.

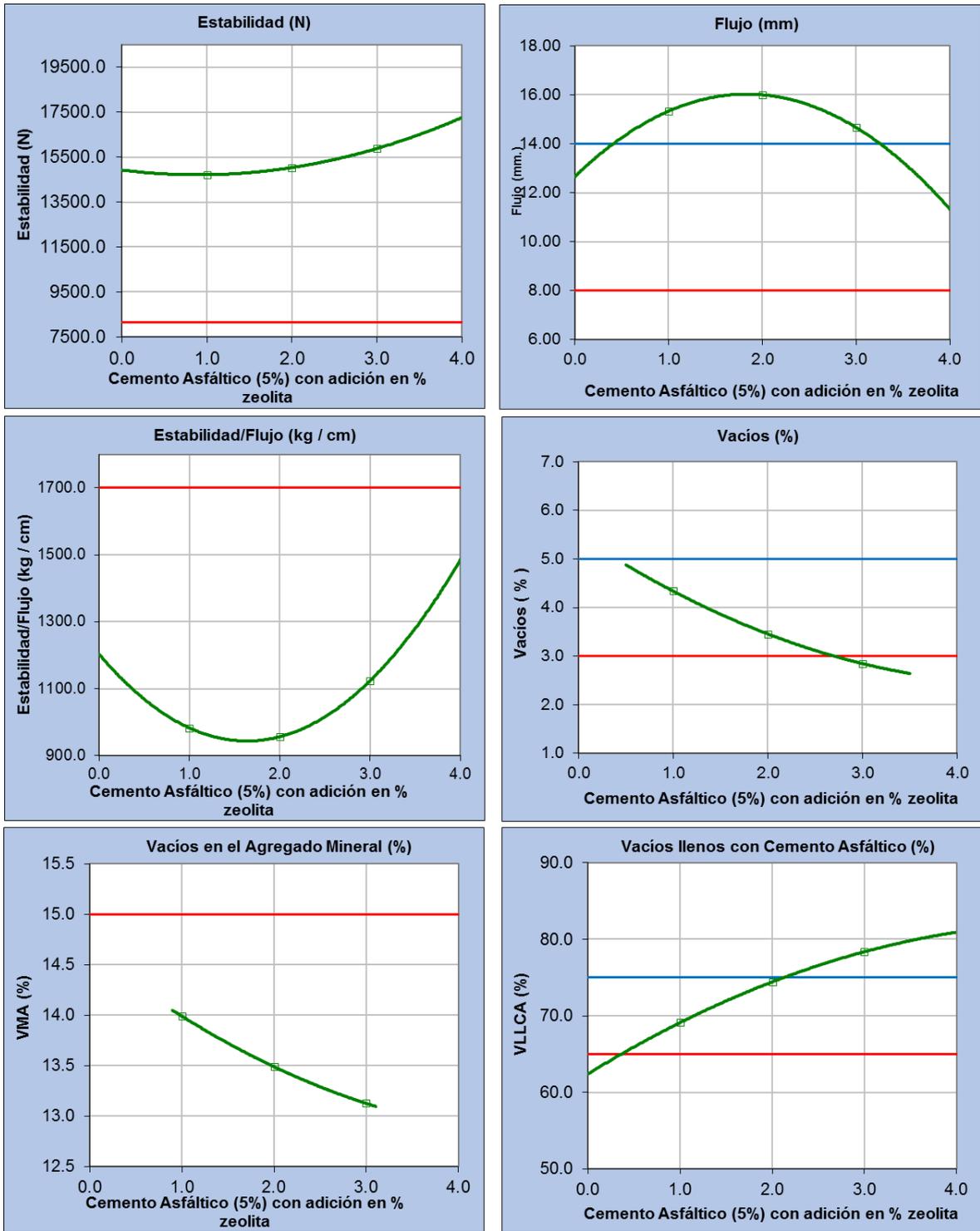


Figura 25. Ensayos realizados a 130°C con 1%, 2% y 3% de Zeolita, clase A.

**Tabla 24.***Resultados de mezcla asfáltica elaborada a 120°C, clase A.*

Cemento Asfáltico 5% en peso de la mezcla	% zeolita	1.0	2.0	3.0
Estabilidad Corregida	(N)	18564.2	13669.1	16073.9
Flujo	(mm)	13.00	11.33	10.67
Estabilidad/Flujo	(kg / cm)	1466.0	1225.0	1550.3
Vacíos	%	3.6	4.2	4.1
VMA	%	13.28	14.13	14.24
Vacíos Llenados con C.A.	%	73.36	70.55	71.28

Nota: Elaboración propia.

En la figura 25 se observa los resultados de los ensayos realizados a los especímenes fabricados a 120°C con variación de 1%, 2% y 3% de Zeolita para clase A, se muestran los valores de estabilidad y flujo encontrados tras los ensayos Marshall y la relación estabilidad/flujo de estos resultados, además de ello se muestra el porcentaje de vacíos, vacíos en el agregado mineral y vacíos llenos con cemento asfáltico.

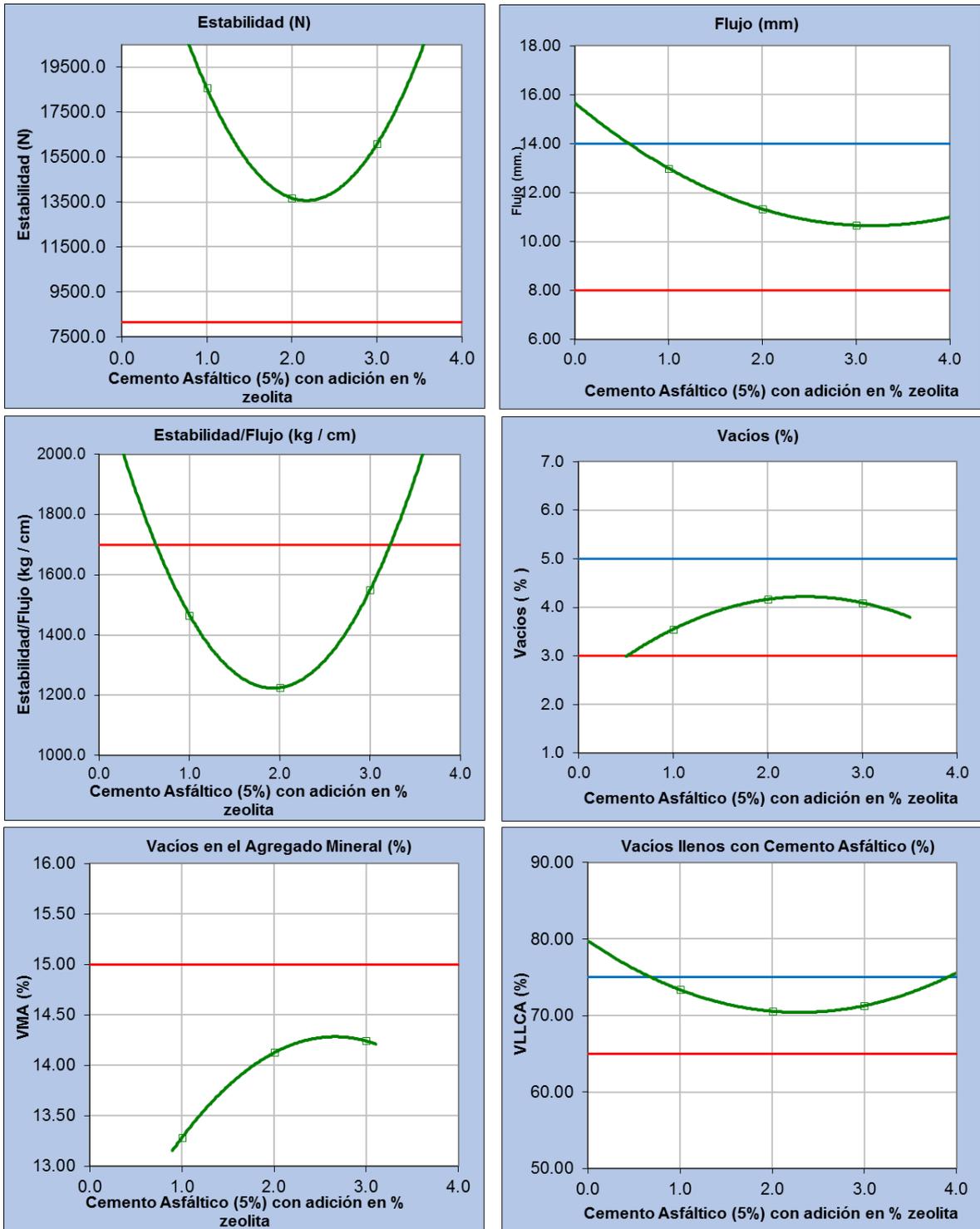


Figura 26. Ensayos realizados a 120°C con 1%, 2% y 3% de Zeolita, clase A.

**Tabla 25.***Resultados de mezcla asfáltica elaborada a 100°C, clase A.*

Cemento Asfáltico 5% en peso de la mezcla	% zeolita	1.0	2.0	3.0
Estabilidad Corregida	(N)	4947.2	7708.9	10877.0
Flujo	(mm)	15.00	14.33	15.33
Estabilidad/Flujo	(kg / cm)	339.33	552.07	719.10
Vacíos	%	6.33	5.7	4.6
VMA	%	15.78	15.47	14.71
Vacíos Llenados con C.A.	%	59.95	63.40	68.70

Nota: Elaboración propia.

En la figura 26 se observa los resultados de los ensayos realizados a los especímenes fabricados a 100°C con variación de 1%, 2% y 3% de Zeolita para clase A, se muestran los valores de estabilidad y flujo encontrados tras los ensayos Marshall y la relación estabilidad/flujo de estos resultados, además de ello se muestra el porcentaje de vacíos, vacíos en el agregado mineral y vacíos llenos con cemento asfáltico.

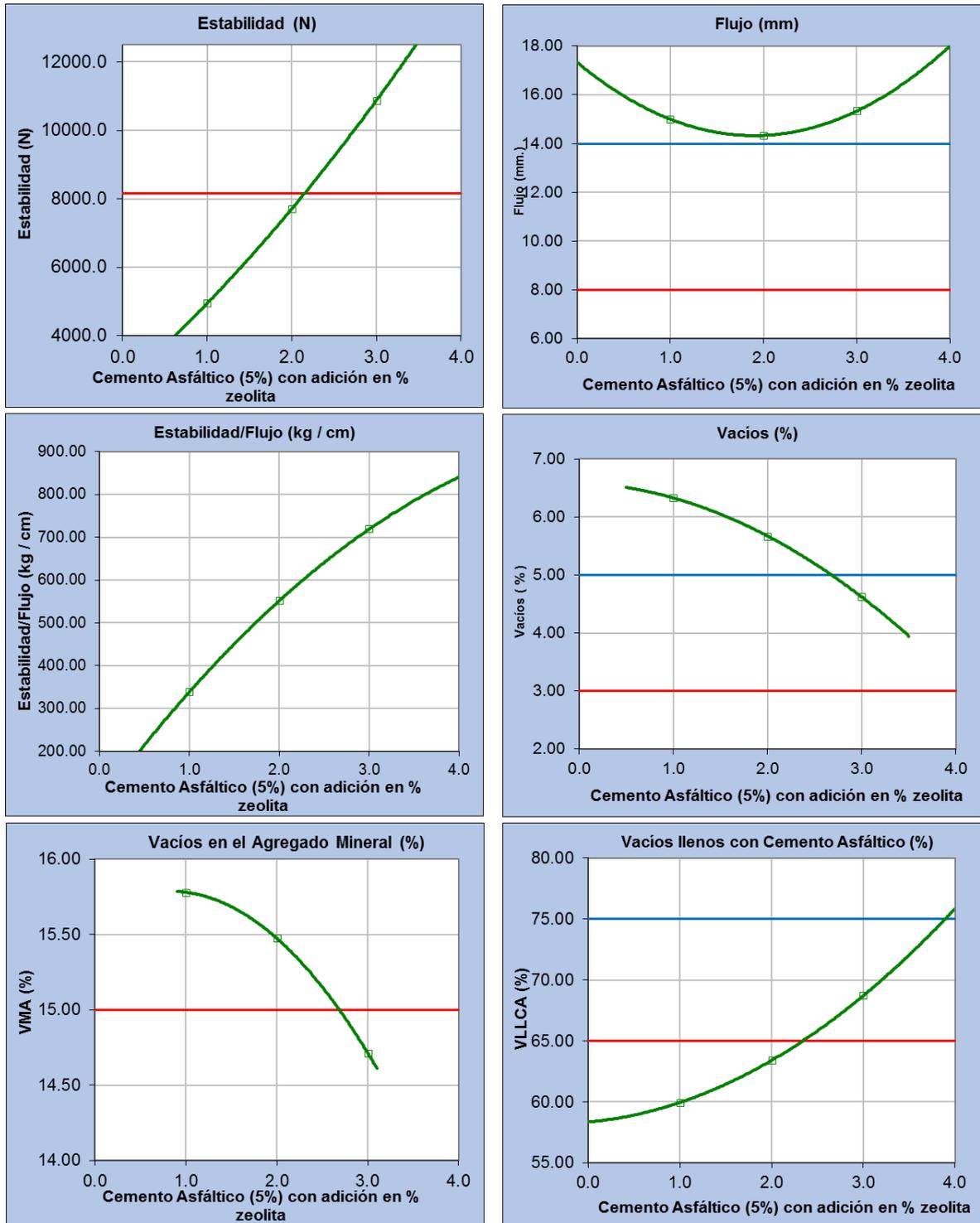


Figura 27. Ensayos realizados a 100°C con 1%, 2% y 3% de Zeolita, clase A.

**Tabla 26.***Resultados de mezcla asfáltica elaborada a 140°C, clase B.*

Cemento Asfáltico 5% en peso de la mezcla	% zeolita	1.0	2.0	3.0
Estabilidad Corregida	(N)	14179.5	13647.7	13860.2
Flujo	(mm)	13.33	13.67	10.67
Estabilidad/Flujo	(kg / cm)	1084.2	1019.7	1324.4
Vacíos	%	5.2	4.8	4.6
VMA	%	14.8	14.7	14.7
Vacíos Llenados con C.A.	%	64.8	67.3	68.7

Nota: Elaboración propia.

En la figura 27 se observa los resultados de los ensayos realizados a los especímenes fabricados a 140°C con variación de 1%, 2% y 3% de Zeolita para clase B, se muestran los valores de estabilidad y flujo encontrados tras los ensayos Marshall y la relación estabilidad/flujo de estos resultados, además de ello se muestra el porcentaje de vacíos, vacíos en el agregado mineral y vacíos llenos con cemento asfáltico.

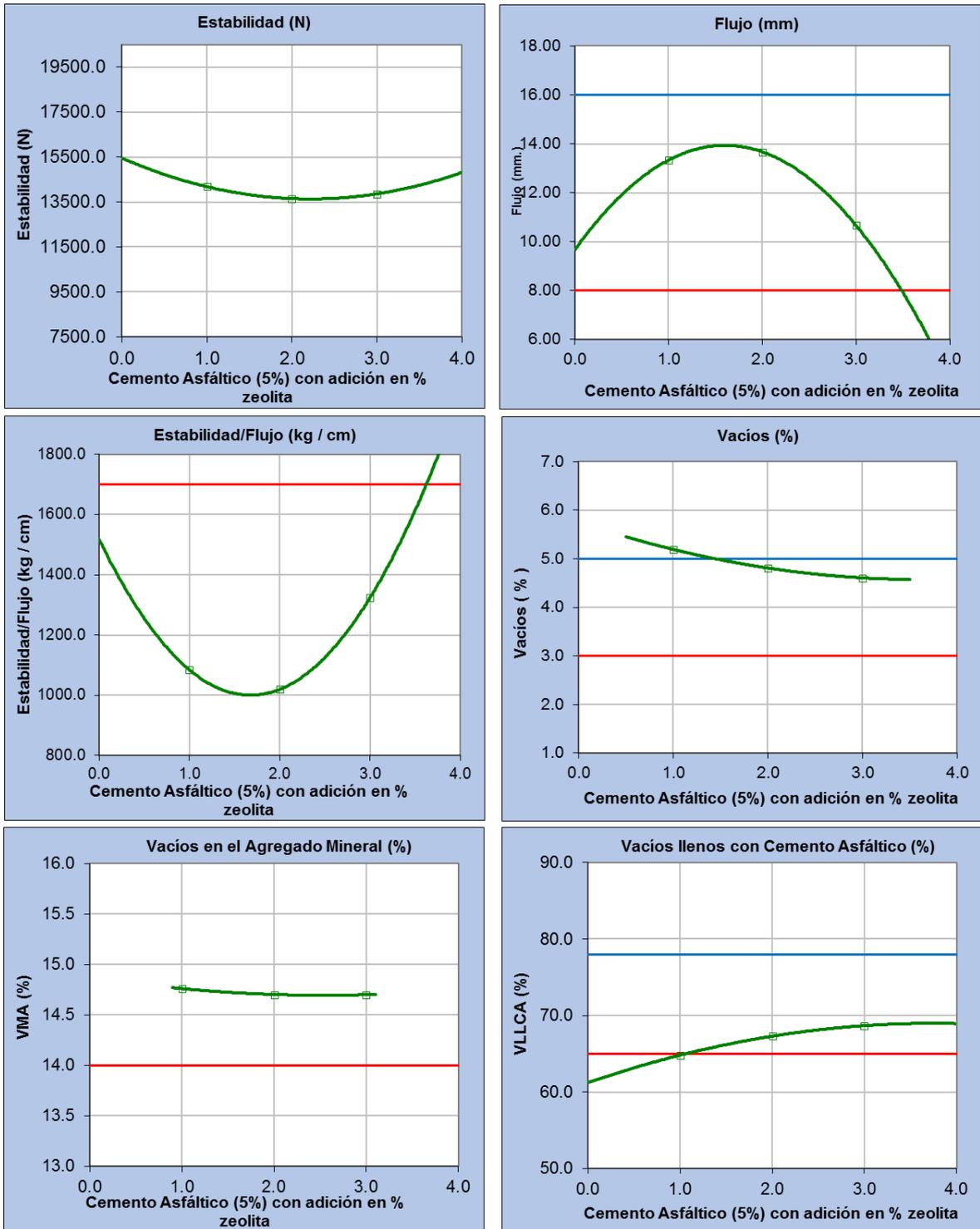


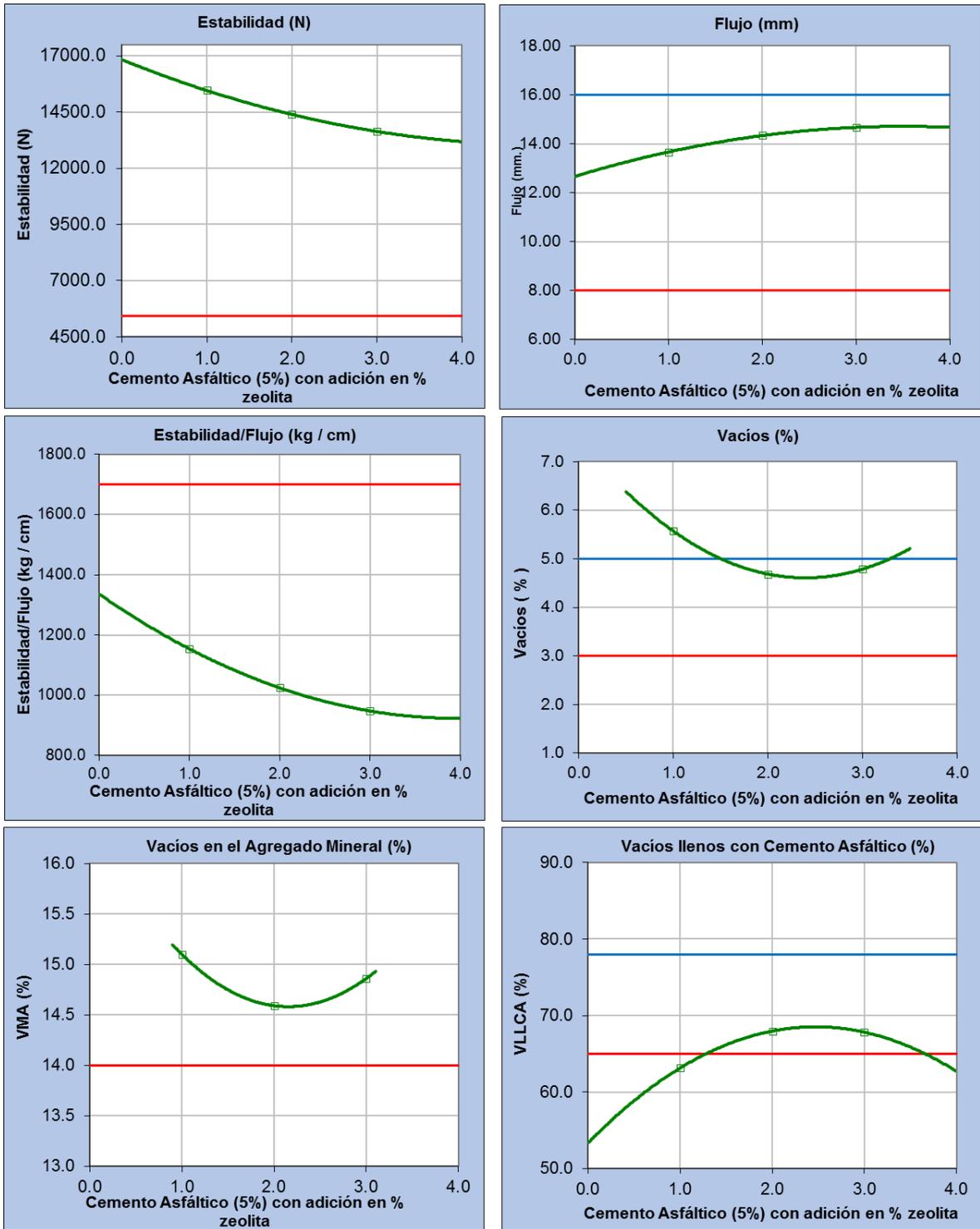
Figura 28. Ensayos realizados a 140°C con 1%, 2% y 3% de Zeolita, clase B.

**Tabla 27.***Resultados de mezcla asfáltica elaborada a 130°C, clase B.*

Cemento Asfáltico 5% en peso de la mezcla	% zeolita	1.0	2.0	3.0
Estabilidad Corregida	(N)	15457.0	14392.3	13634.5
Flujo	(mm)	13.67	14.33	14.67
Estabilidad/Flujo	(kg / cm)	1153.9	1024.5	947.6
Vacíos	%	5.6	4.7	4.8
VMA	%	15.1	14.6	14.9
Vacíos Llenados con C.A.	%	63.1	68.0	67.8

Nota: Elaboración propia.

En la figura 28 se observa los resultados de los ensayos realizados a los especímenes fabricados a 130°C con variación de 1%, 2% y 3% de Zeolita para clase B, se muestran los valores de estabilidad y flujo encontrados tras los ensayos Marshall y la relación estabilidad/flujo de estos resultados, además de ello se muestra el porcentaje de vacíos, vacíos en el agregado mineral y vacíos llenos con cemento asfáltico.



**Figura 29.** Ensayos realizados a 130°C con 1%, 2% y 3% de Zeolita, clase B.

**Tabla 28.***Resultados de mezcla asfáltica elaborada a 120°C, clase B.*

Cemento Asfáltico 5% en peso de la mezcla	% zeolita	1.0	2.0	3.0
Estabilidad Corregida	(N)	12476.8	11519.4	11731.8
Flujo	(mm)	15.00	15.33	15.67
Estabilidad/Flujo	(kg / cm)	848.2	766.3	764.9
Vacíos	%	5.2	4.6	4.8
VMA	%	14.72	14.54	14.90
Vacíos Llenados con C.A.	%	65.05	68.24	67.59

Nota: Elaboración propia.

En la figura 29 se observa los resultados de los ensayos realizados a los especímenes fabricados a 120°C con variación de 1%, 2% y 3% de Zeolita para clase B, se muestran los valores de estabilidad y flujo encontrados tras los ensayos Marshall y la relación estabilidad/flujo de estos resultados, además de ello se muestra el porcentaje de vacíos, vacíos en el agregado mineral y vacíos llenos con cemento asfáltico.

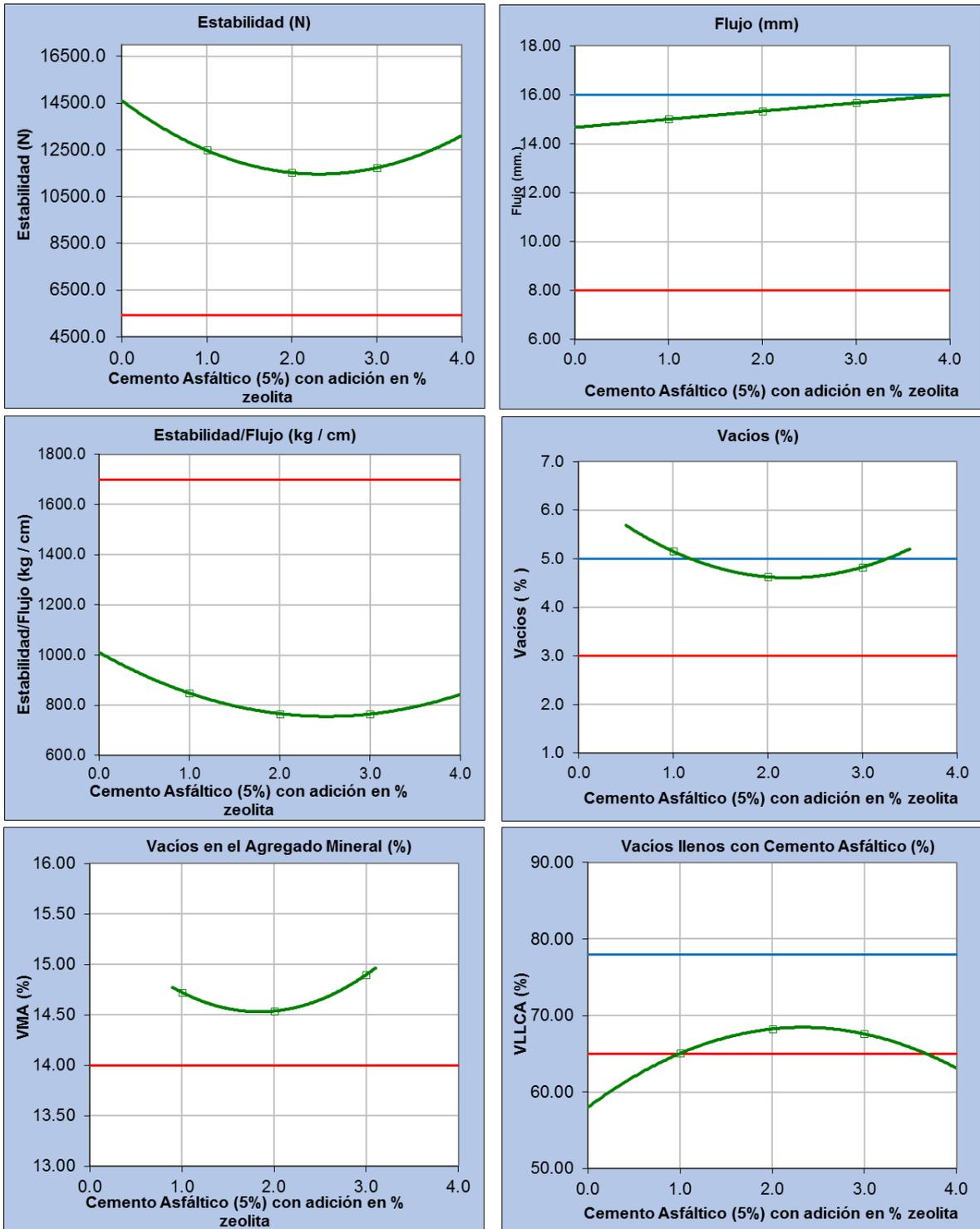


Figura 30. Ensayos realizados a 120°C con 1%, 2% y 3% de Zeolita, clase B.

**Tabla 29.***Resultados de mezcla asfáltica elaborada a 100°C, clase B.*

Cemento Asfáltico 5% en peso de la mezcla	% zeolita	1.0	2.0	3.0
Estabilidad Corregida	(N)	4818.0	5278.2	4719.4
Flujo	(mm)	16.67	17.67	17.67
Estabilidad/Flujo	(kg / cm)	295.21	304.72	272.35
Vacíos	%	6.39	6.0	5.84
VMA	%	15.84	15.77	15.81
Vacíos Llenados con C.A.	%	59.67	61.95	63.11

Nota: Elaboración propia.

En la figura 30 se observa los resultados de los ensayos realizados a los especímenes fabricados a 100°C con variación de 1%, 2% y 3% de Zeolita para clase B, se muestran los valores de estabilidad y flujo encontrados tras los ensayos Marshall y la relación estabilidad/flujo de estos resultados, además de ello se muestra el porcentaje de vacíos, vacíos en el agregado mineral y vacíos llenos con cemento asfáltico.

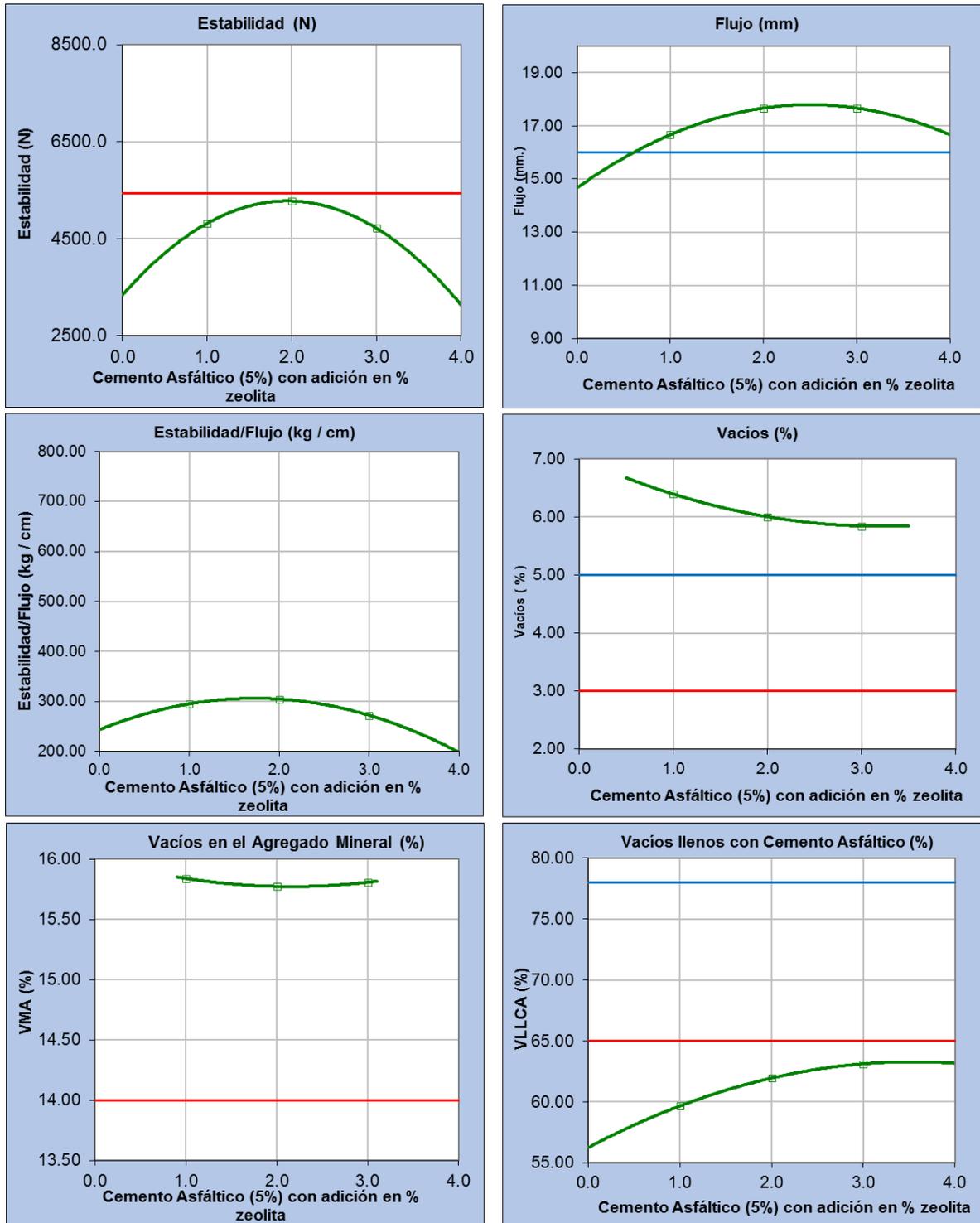


Figura 31. Ensayos realizados a 100°C con 1%, 2% y 3% de Zeolita, clase B.

**Tabla 30.***Resultados de mezcla asfáltica elaborada a 140°C, clase C.*

Cemento Asfáltico 5% en peso de la mezcla	% zeolita	1.0	2.0	3.0
Estabilidad Corregida	(N)	12190.1	12086.9	13427.0
Flujo	(mm)	13.67	14.33	15.00
Estabilidad/Flujo	(kg / cm)	910.5	860.3	912.8
Vacíos	%	4.6	4.0	4.1
VMA	%	14.2	14.0	14.3
Vacíos Llenados con C.A.	%	67.9	71.3	71.2

Nota: Elaboración propia.

En la figura 31 se observa los resultados de los ensayos realizados a los especímenes fabricados a 140°C con variación de 1%, 2% y 3% de Zeolita para clase C, se muestran los valores de estabilidad y flujo encontrados tras los ensayos Marshall y la relación estabilidad/flujo de estos resultados, además de ello se muestra el porcentaje de vacíos, vacíos en el agregado mineral y vacíos llenos con cemento asfáltico.

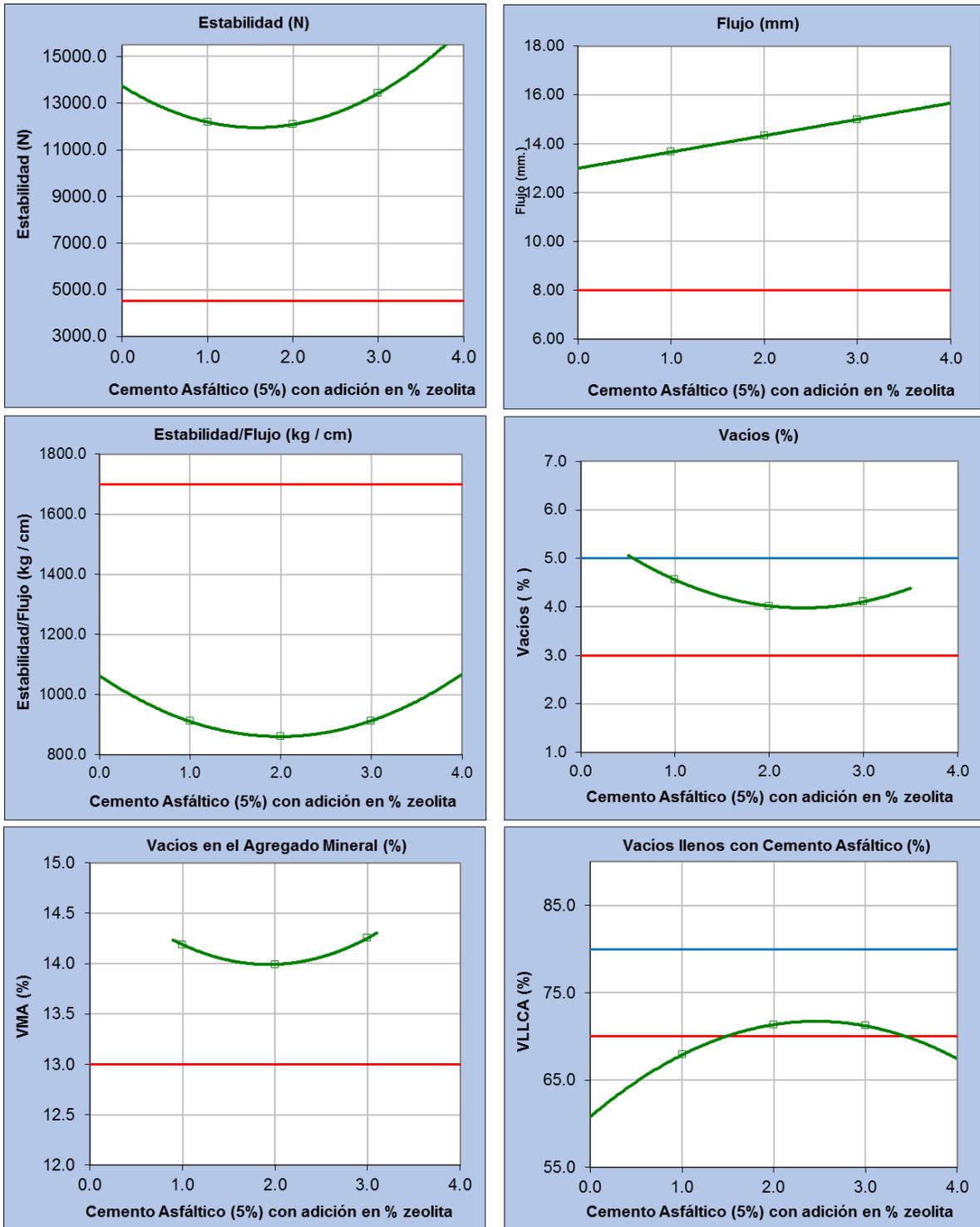


Figura 32. Ensayos realizados a 140°C con 1%, 2% y 3% de Zeolita, clase C

**Tabla 31.***Resultados de mezcla asfáltica elaborada a 130°C, clase C.*

Cemento Asfáltico 5% en peso de la mezcla	% zeolita	1.0	2.0	3.0
Estabilidad Corregida	(N)	10850.0	11406.8	11674.6
Flujo	(mm)	13.33	14.33	15.00
Estabilidad/Flujo	(kg / cm)	830.81	812.27	793.65
Vacíos	%	4.3	3.9	3.7
VMA	%	14.0	13.9	13.9
Vacíos Llenados con C.A.	%	69.2	72.0	73.2

Nota: Elaboración propia.

En la figura 32 se observa los resultados de los ensayos realizados a los especímenes fabricados a 130°C con variación de 1%, 2% y 3% de Zeolita para clase C, se muestran los valores de estabilidad y flujo encontrados tras los ensayos Marshall y la relación estabilidad/flujo de estos resultados, además de ello se muestra el porcentaje de vacíos, vacíos en el agregado mineral y vacíos llenos con cemento asfáltico.

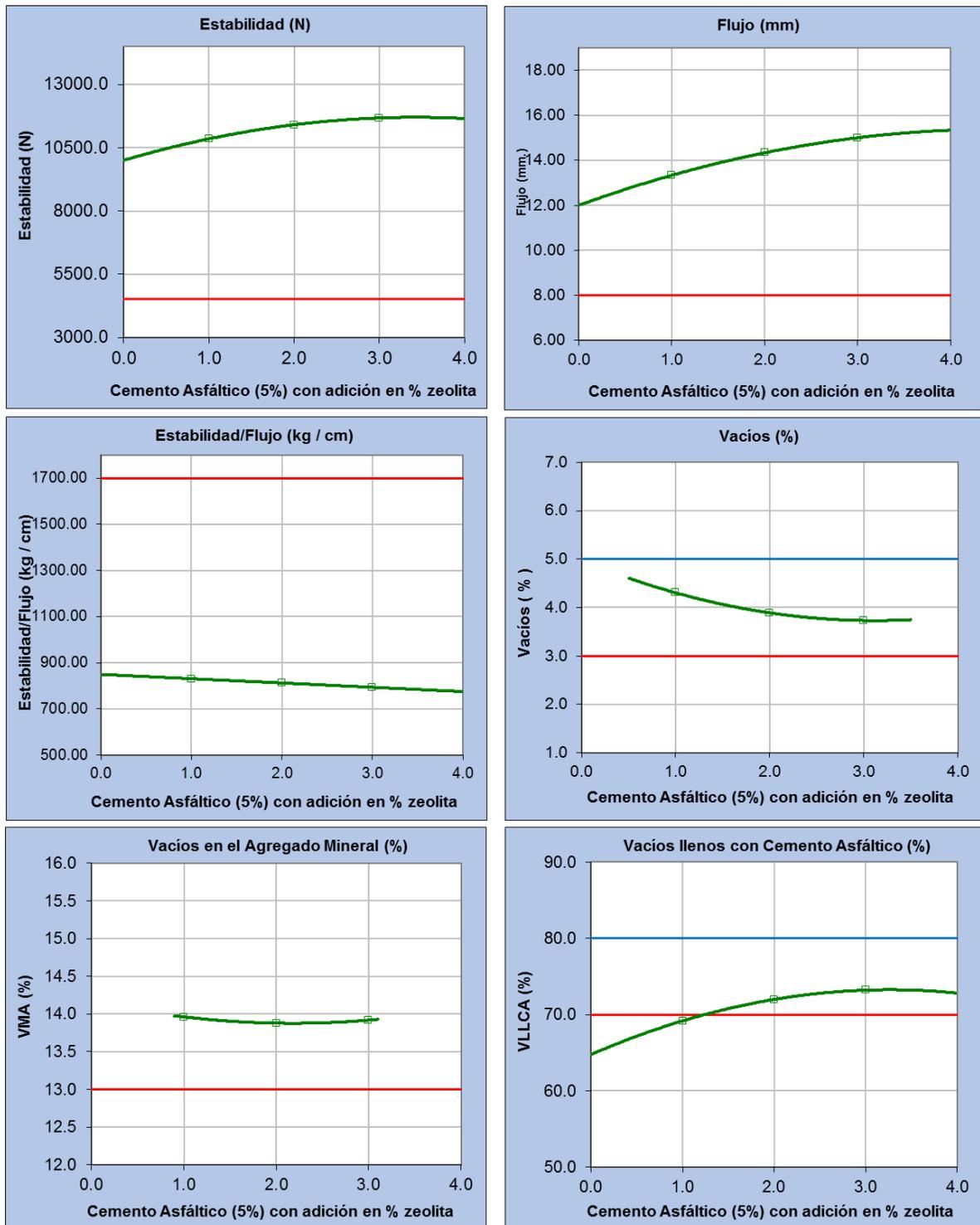


Figura 33. Ensayos realizados a 130°C con 1%, 2% y 3% de Zeolita, clase C.

**Tabla 32.***Resultados de mezcla asfáltica elaborada a 120°C, clase C.*

Cemento Asfáltico 5% en peso de la mezcla	% zeolita	1.0	2.0	3.0
Estabilidad Corregida	(N)	12476.8	11519.4	11731.8
Flujo	(mm)	15.00	15.33	15.67
Estabilidad/Flujo	(kg / cm)	848.2	766.3	764.9
Vacíos	%	5.2	4.1	3.8
VMA	%	14.72	14.10	13.97
Vacíos Llenados con C.A.	%	65.05	70.64	72.85

Nota: Elaboración propia.

En la figura 33 se observa los resultados de los ensayos realizados a los especímenes fabricados a 120°C con variación de 1%, 2% y 3% de Zeolita para clase C, se muestran los valores de estabilidad y flujo encontrados tras los ensayos Marshall y la relación estabilidad/flujo de estos resultados, además de ello se muestra el porcentaje de vacíos, vacíos en el agregado mineral y vacíos llenos con cemento asfáltico.

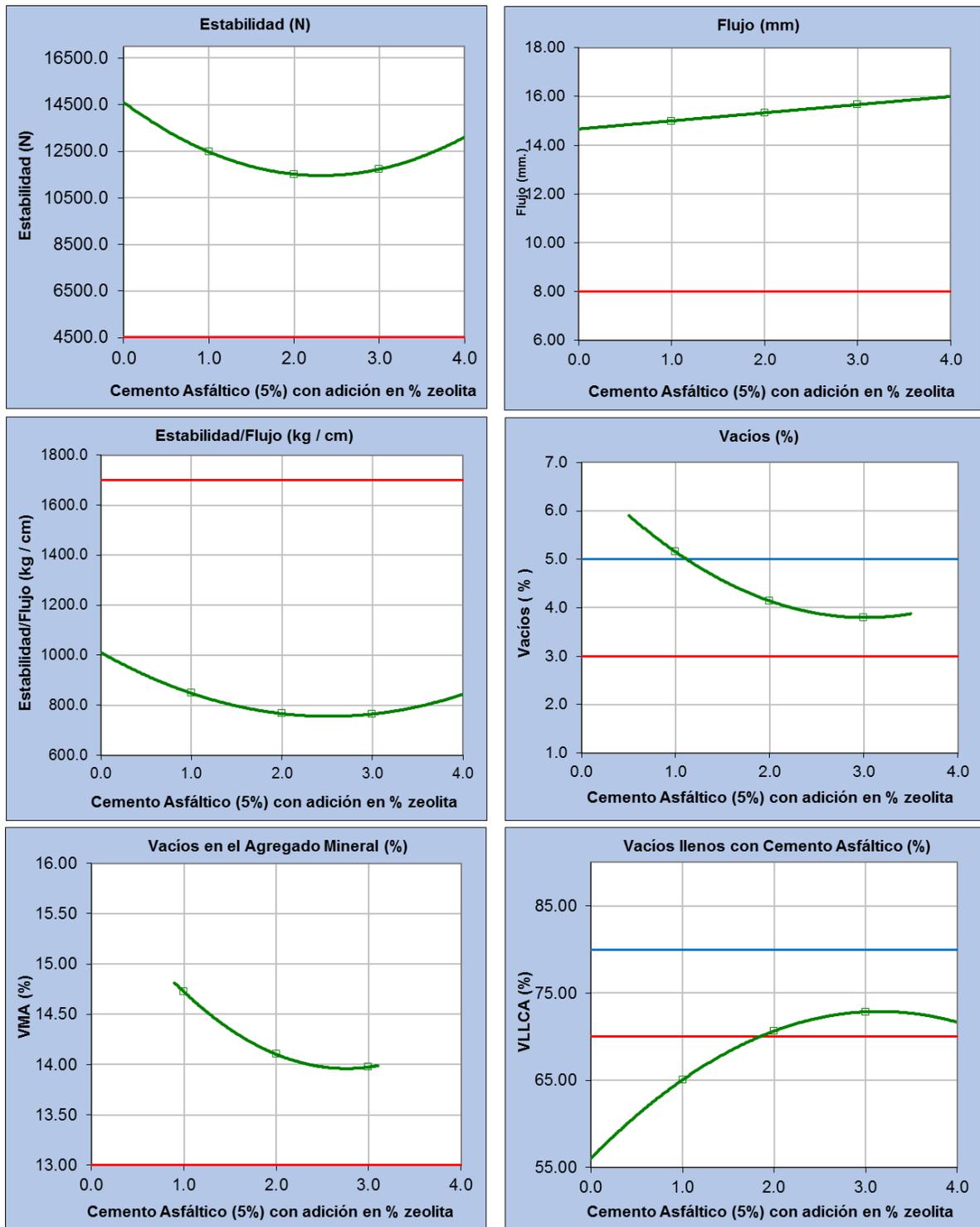


Figura 34. Ensayos realizados a 120°C con 1%, 2% y 3% de Zeolita, clase C.

**Tabla 33.***Resultados de mezcla asfáltica elaborada a 100°C, clase C.*

Cemento Asfáltico 5% en peso de la mezcla	% zeolita	1.0	2.0	3.0
Estabilidad Corregida	(N)	3674.8	4406.7	3579.9
Flujo	(mm)	17.33	18.33	18.67
Estabilidad/Flujo	(kg / cm)	216.46	245.16	196.77
Vacíos	%	5.85	5.9	6.09
VMA	%	15.35	15.67	16.03
Vacíos Llenados con C.A.	%	61.87	62.45	62.09

Nota: Elaboración propia.

En la figura 34 se observa los resultados de los ensayos realizados a los especímenes fabricados a 100°C con variación de 1%, 2% y 3% de Zeolita para clase C, se muestran los valores de estabilidad y flujo encontrados tras los ensayos Marshall y la relación estabilidad/flujo de estos resultados, además de ello se muestra el porcentaje de vacíos, vacíos en el agregado mineral y vacíos llenos con cemento asfáltico.

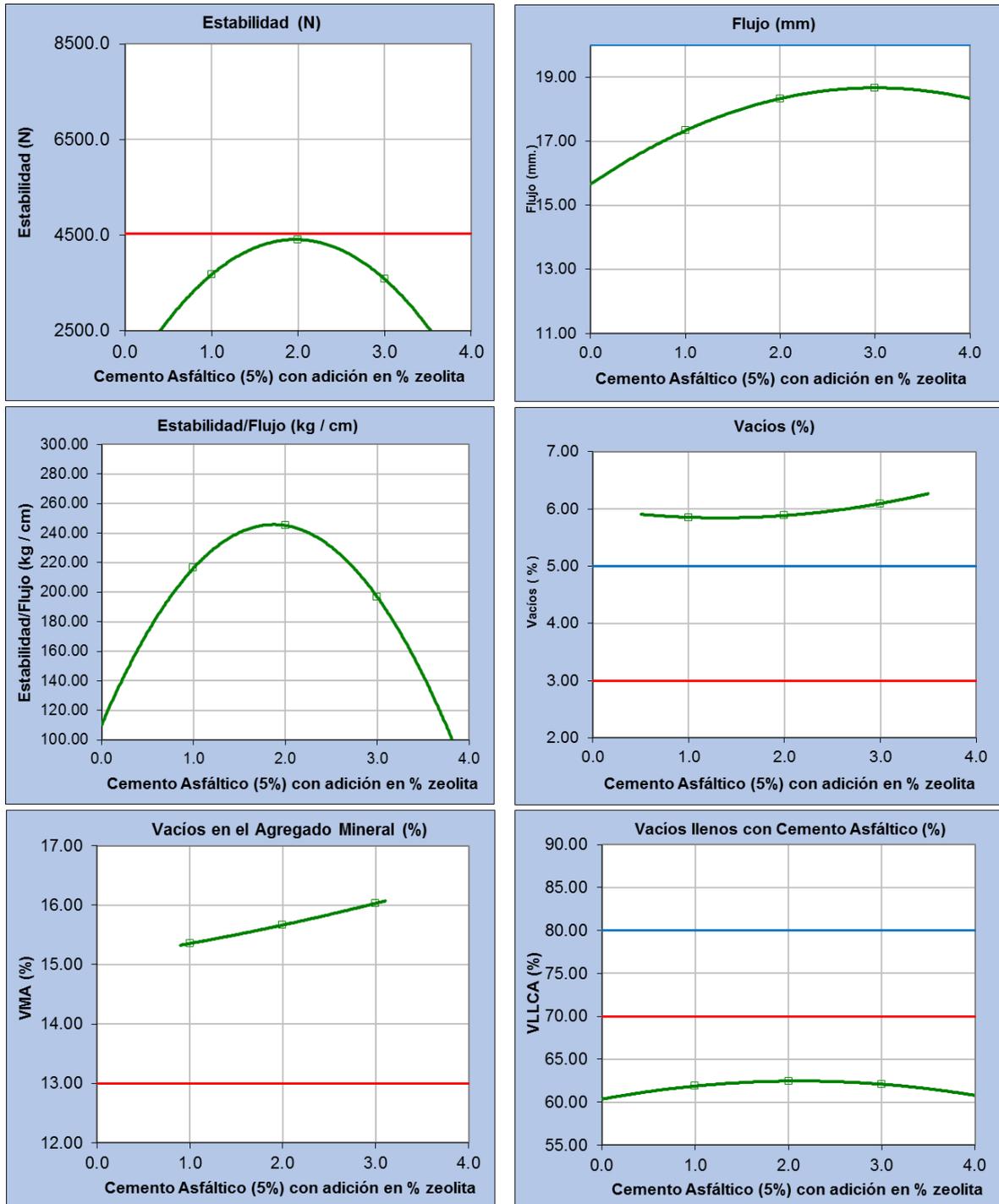
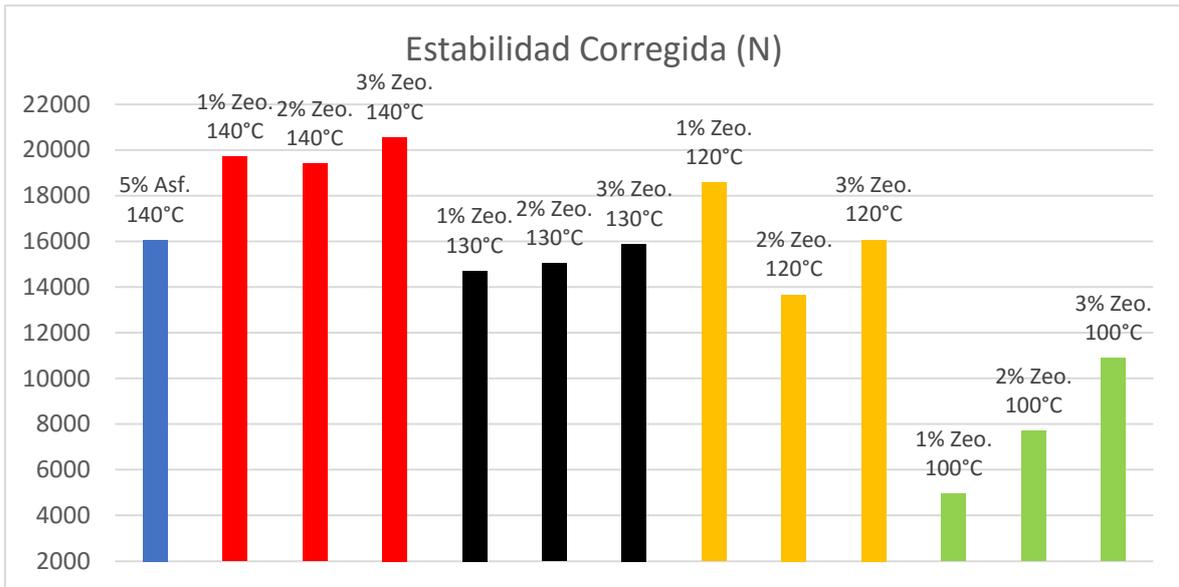


Figura 35. Ensayos realizados a 100°C con 1%, 2% y 3% de Zeolita, clase C.

**3.4. Resultados evaluación de resultados de una mezcla asfáltica convencional con las mezclas asfálticas a 140°C, 130°C, 120°C y 100°C con adición de zeolita.**

**3.4.1. Clase A.**

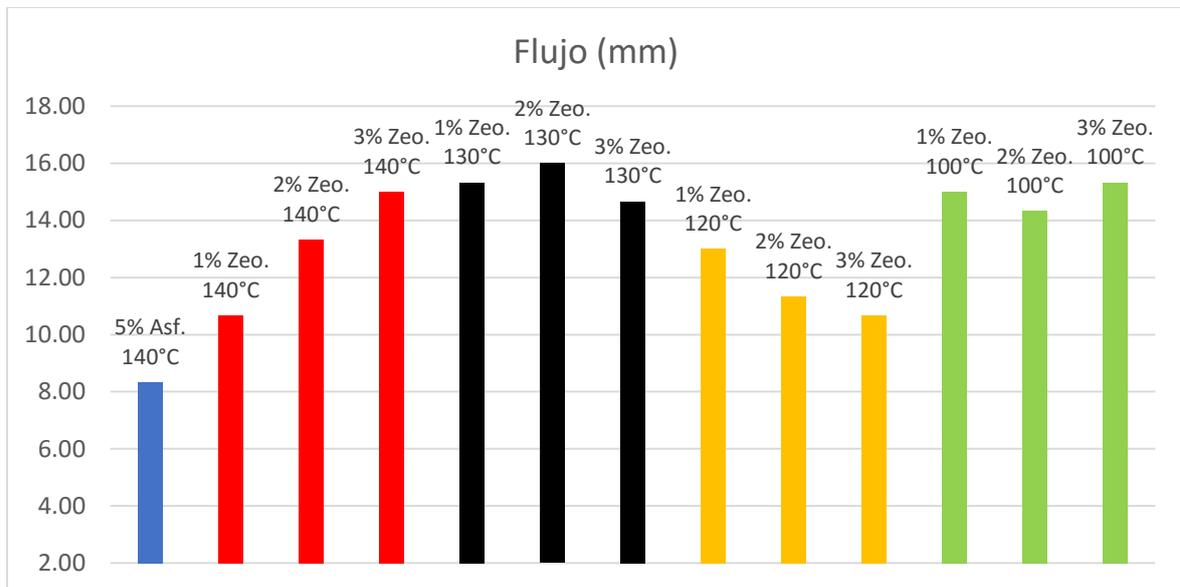
3.4.1.1. Estabilidad (N).



**Figura 36.** Estabilidad Corregida (N).

En la figura se aprecia que los resultados de estabilidad de los especímenes diseñados a 120°C, 130°C, 140°C con adición de 1%, 2% y 3% de Zeolita se encuentran en estabilidad promedio con el diseño patrón, mientras que la estabilidad de los especímenes diseñados a 100°C se encuentra muy por debajo de este promedio

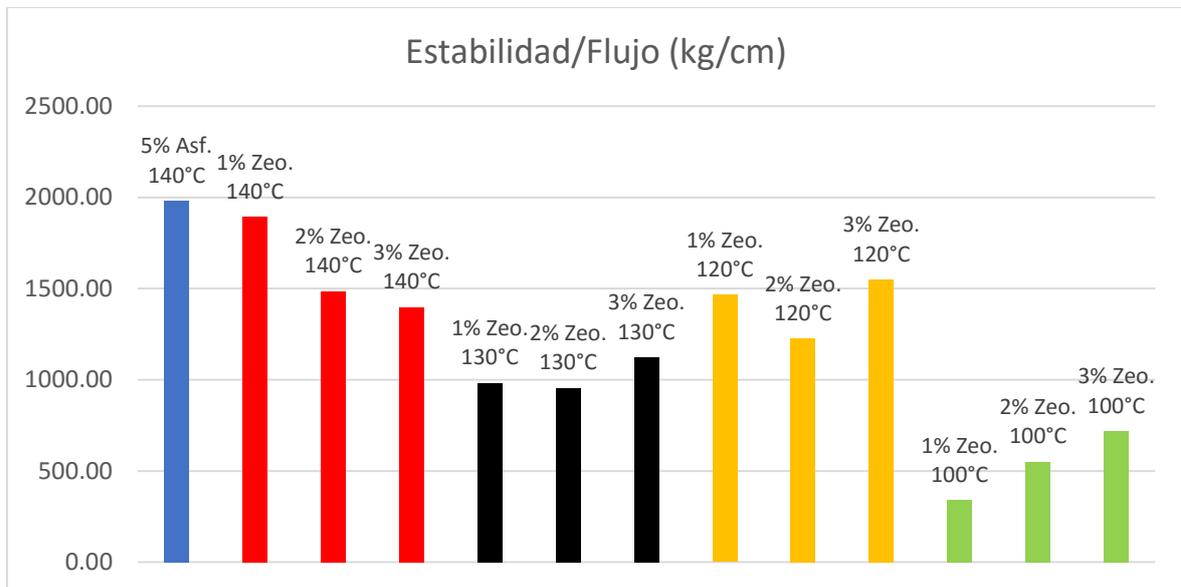
### 3.4.1.2. Flujo (mm).



**Figura 37.** Flujo (mm).

En la figura se aprecia que los resultados de flujo de los especímenes diseñados a 100°C, 120°C, 130°C y 140°C con adición de 1%, 2% y 3%, tienen un mayor flujo que la mezcla patrón.

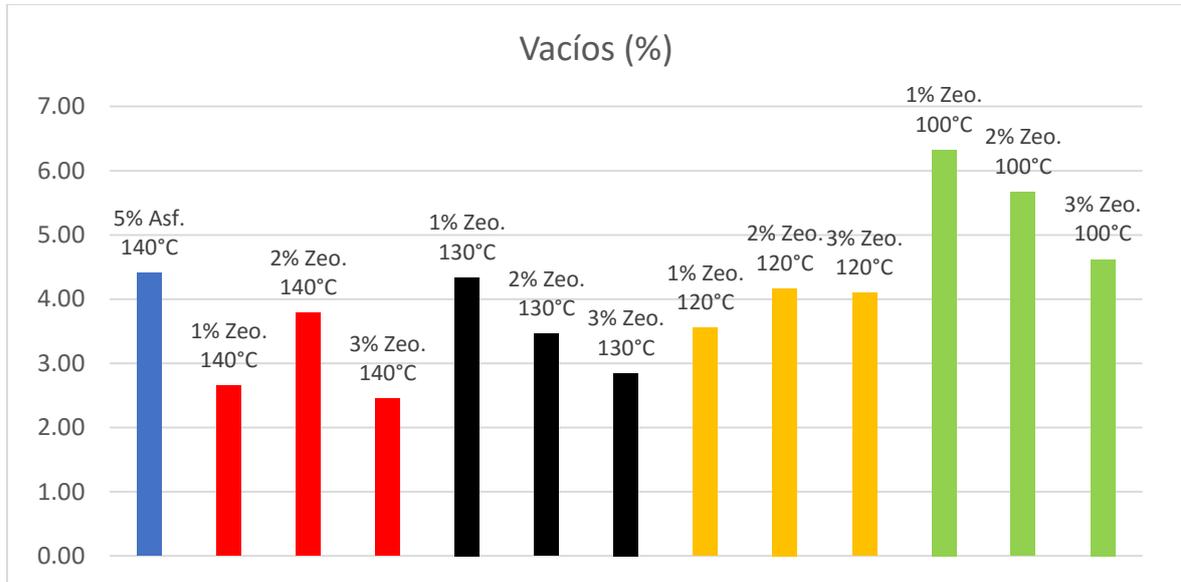
### 3.4.1.3. Estabilidad/Flujo (kg/cm).



**Figura 38.** Estabilidad/Flujo (kg/cm)

En la figura se aprecia que los resultados de relación/flujo de los especímenes, diseñados a 140°C, 130°C, 120°C y 100°C con adición de 1%, 2% y 3%, de Zeolita, es menor que la relación estabilidad/flujo de la mezcla patrón.

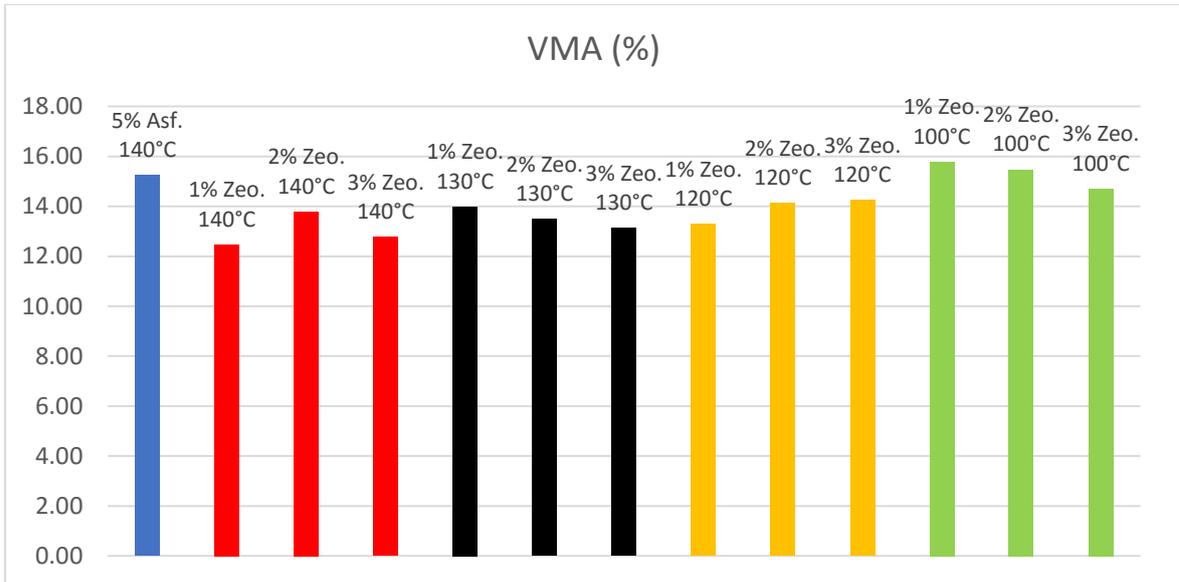
### 3.4.1.4. Vacíos (%).



**Figura 39.** Vacíos (%)

En la figura se aprecia que los porcentajes de vacíos de los especímenes diseñados a 140°C, 130°C y 120°C con adición de 1%, 2% y 3% de Zeolita tienen un menor porcentaje de vacíos que la muestra patrón. Los porcentajes de vacíos de los especímenes diseñados a 100°C con adición de 1%, 2% y 3% de Zeolita tienen un mayor porcentaje de vacíos que la muestra patrón.

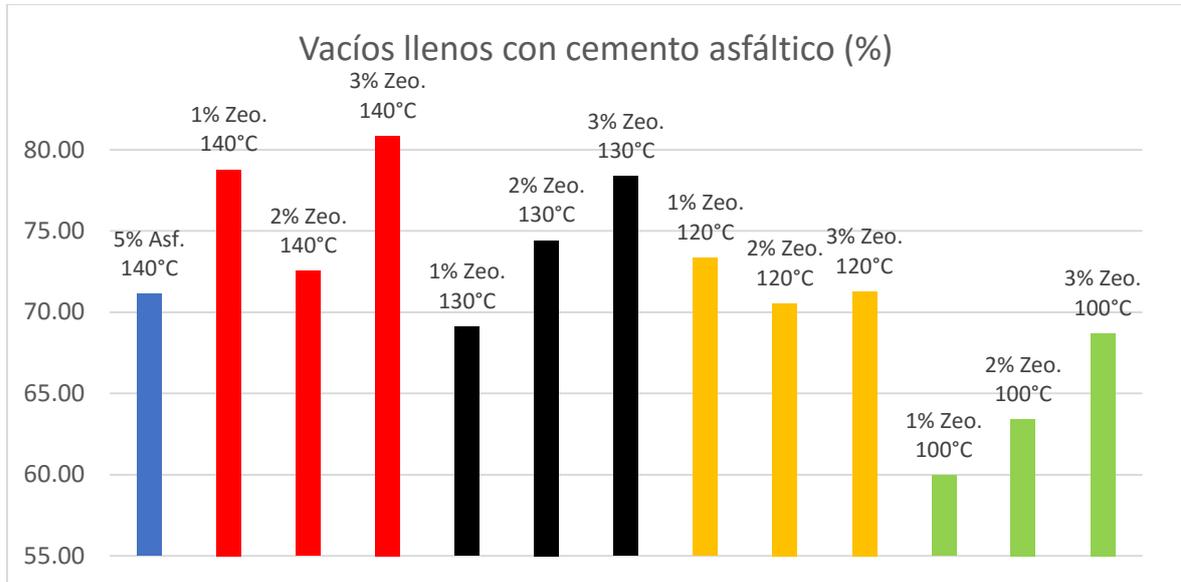
3.4.1.5. Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA).



**Figura 40.** VMA (%).

En la figura se aprecia que los porcentajes de vacíos en el agregado mineral (VMA) de los especímenes diseñados a 140°C, 130°C, 120°C y 100°C con adición de 1%, 2% y 3% de Zeolita, son menores en promedio cercanas al porcentaje de vacíos de agregado mineral de la muestra patrón

### 3.4.1.6. Vacíos llenos con cemento asfáltico (%).

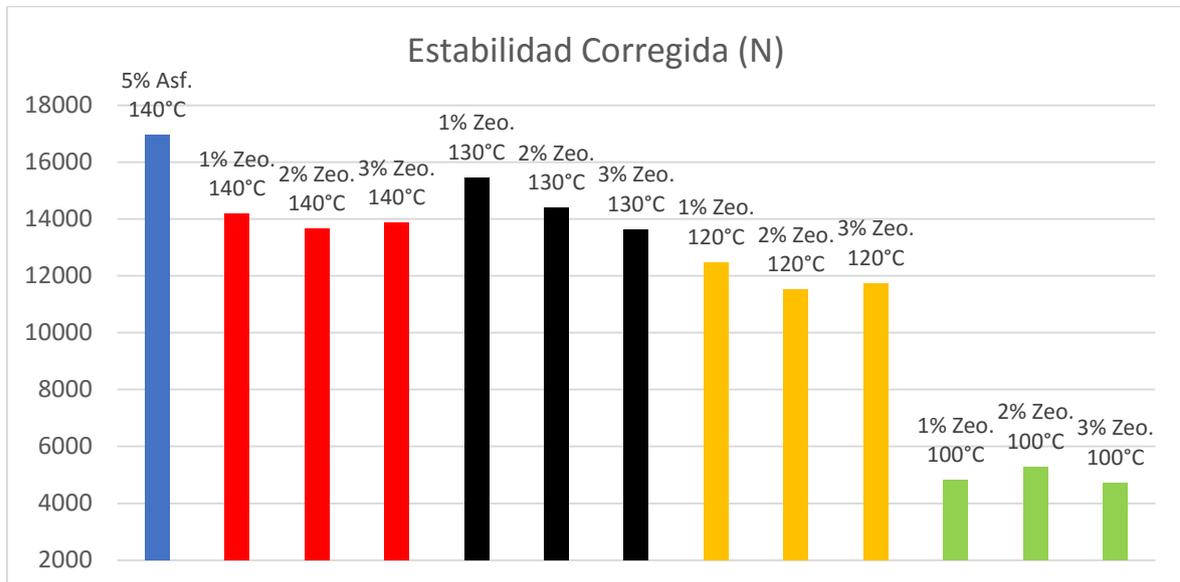


**Figura 41.** Vacíos llenos con cemento asfáltico (%).

En la figura se aprecia que los porcentajes de vacíos llenos con cemento asfáltico de los especímenes diseñados a 140°C, 130°C, 120°C con adición de 1%, 2% y 3% de zeolita, tienen un mayor porcentaje de vacíos llenos con cemento asfáltico que el diseño patrón. Mientras que los especímenes elaborados a 100°C tienen menor porcentaje de cemento asfáltico en sus vacíos.

### 3.4.2. Clase B.

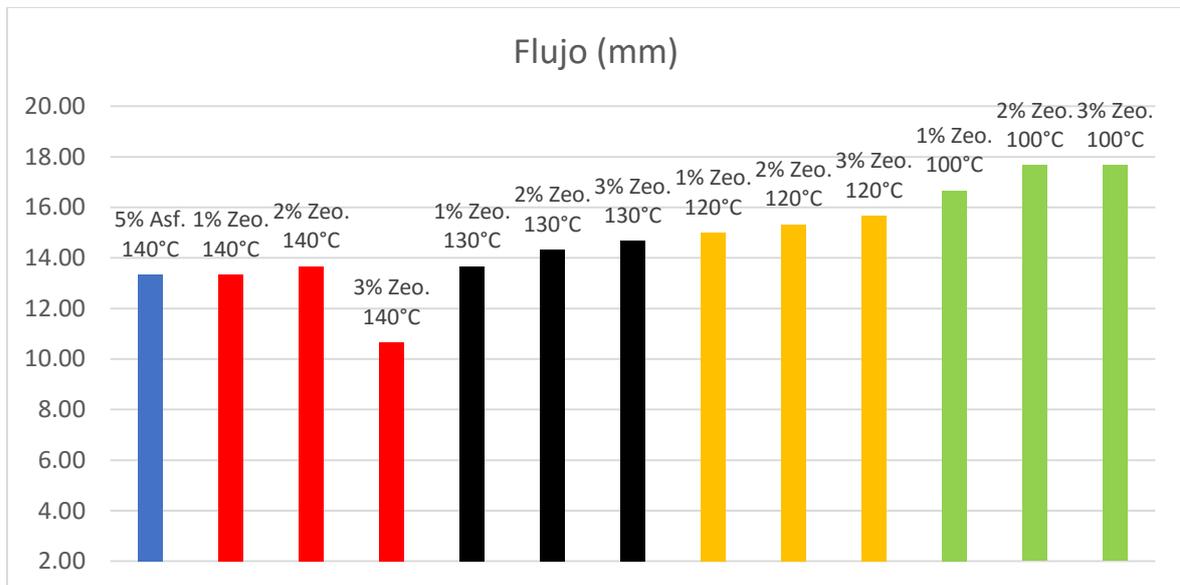
#### 3.4.2.1. Estabilidad (N).



**Figura 42.** Estabilidad Corregida (N).

En la figura se aprecia que los resultados de estabilidad de los especímenes diseñados a 120°C, 130°C, 140°C con adición de 1%, 2% y 3% de Zeolita se encuentran en estabilidad promedio con el diseño patrón, mientras que la estabilidad de los especímenes diseñados a 100°C se encuentra muy por debajo de este promedio

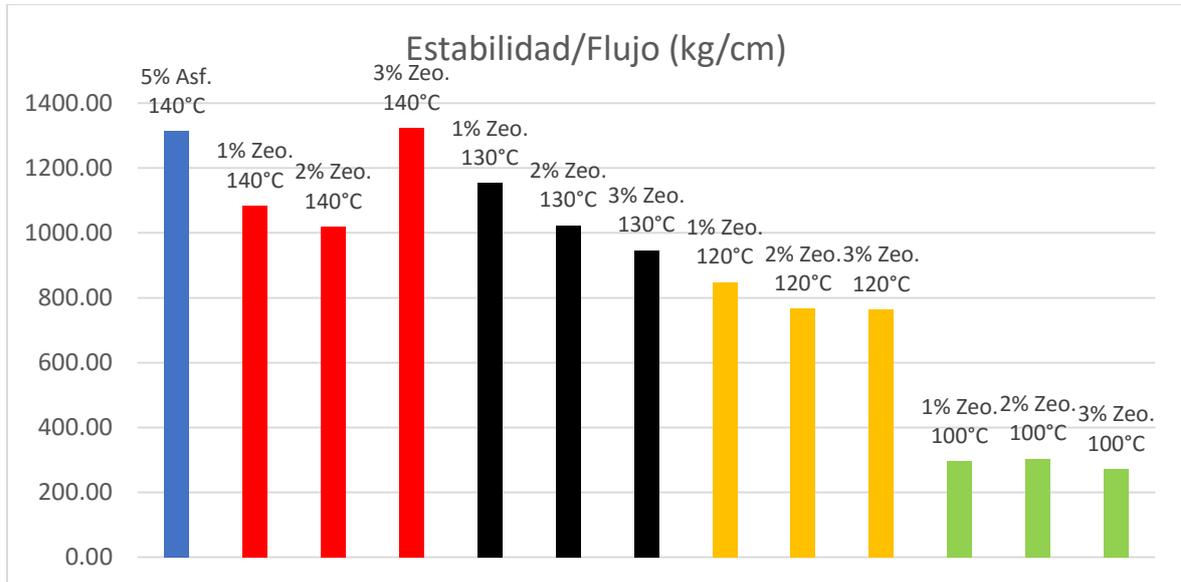
### 3.4.2.2. Flujo (mm).



**Figura 43.** Flujo (mm).

En la figura se aprecia que los resultados de flujo de los especímenes diseñados a 140°C con adición de 1%, 2% y 3%, tienen un flujo promedio a la muestra patrón, mientras que los especímenes elaborados 100°C, 120°C, 130°C con adición de 1%, 2% y 3%, tienen un mayor flujo que la mezcla patrón.

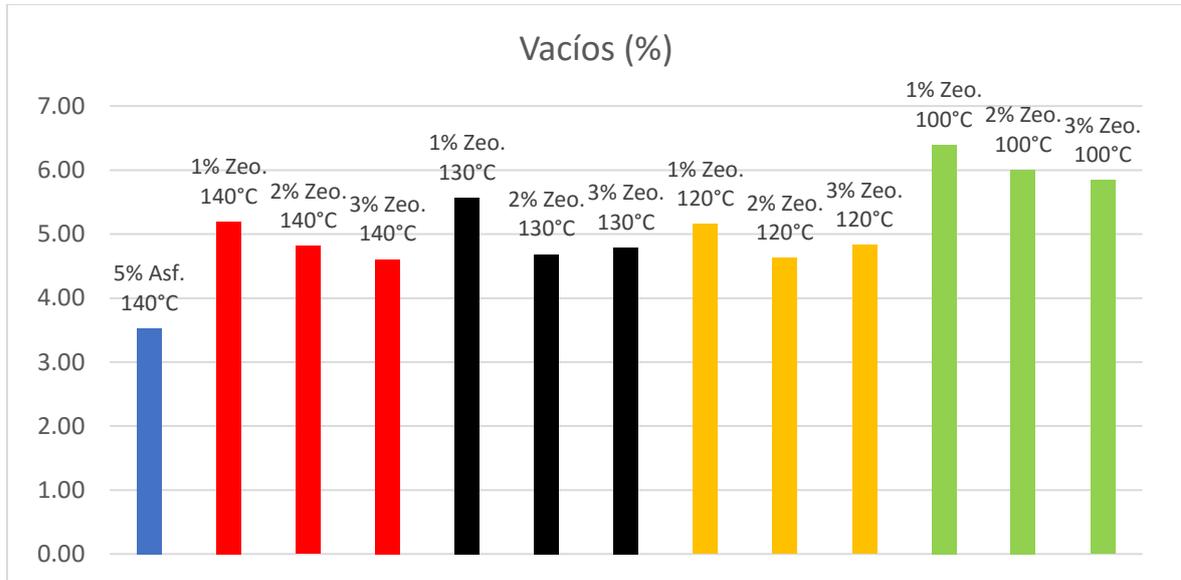
### 3.4.2.3. Estabilidad/Flujo (kg/cm).



**Figura 44.** Estabilidad/Flujo (kg/cm).

En la figura se aprecia que los resultados de relación/flujo de los especímenes, diseñados a 140°C, 130°C, 120°C y 100°C con adición de 1%, 2% y 3%, de Zeolita, es menor que la relación estabilidad/flujo de la mezcla patrón, a excepción de la muestra elaborada a 140° con adición de 3% de Zeolita.

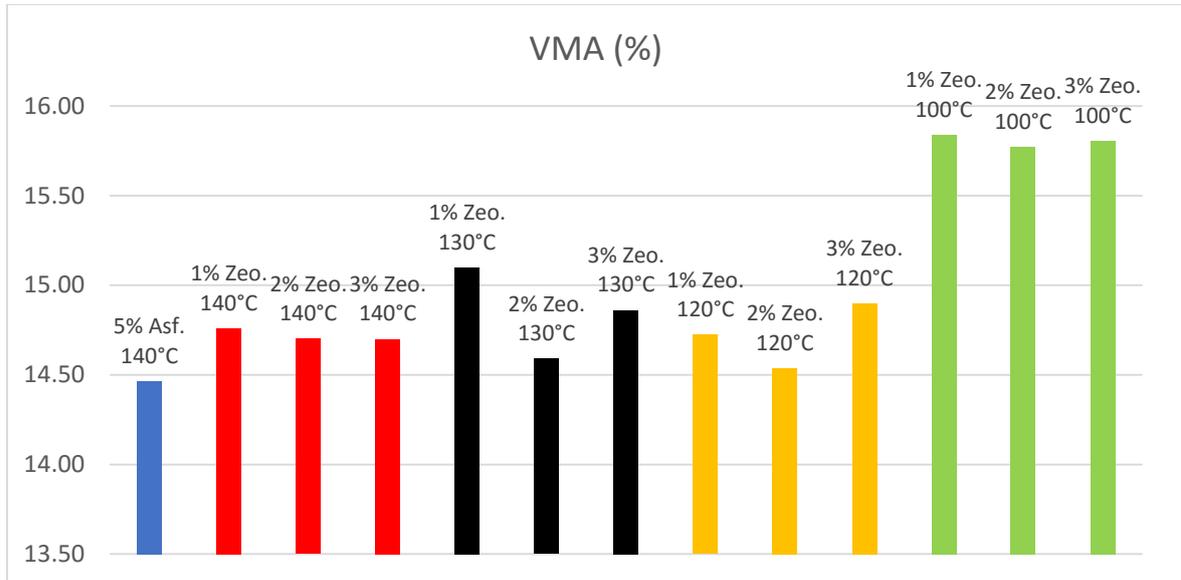
### 3.4.2.4. Vacíos (%).



**Figura 45.** Vacíos (%).

En la figura se aprecia que los porcentajes de vacíos de los especímenes diseñados a 140°C, 130°C, 120°C y 100°C con adición de 1%, 2% y 3% de Zeolita tienen un mayor porcentaje de vacíos que la muestra patrón.

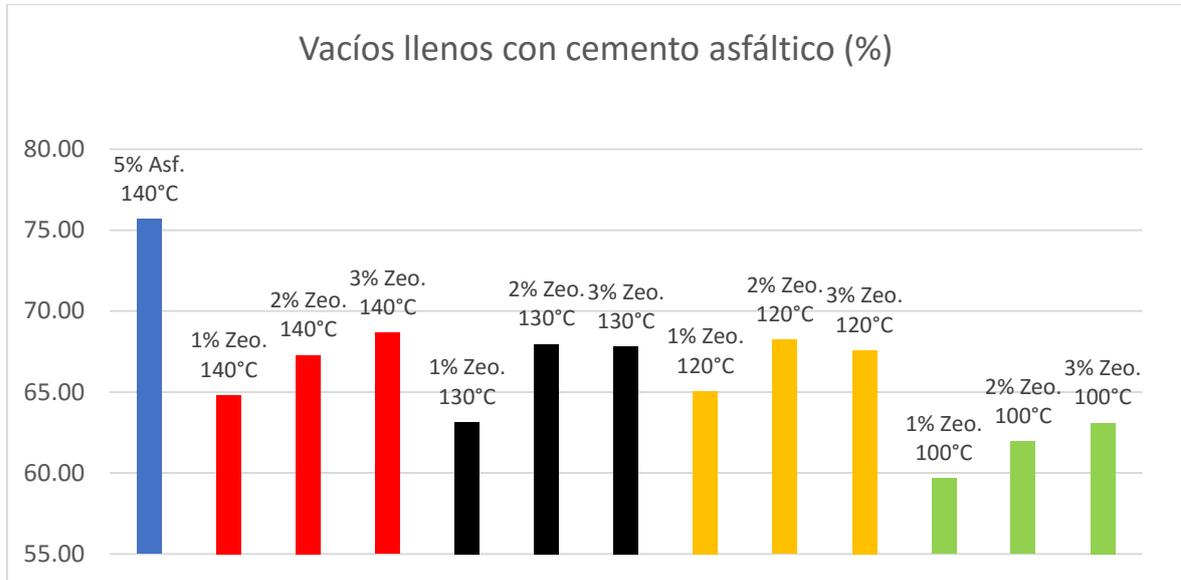
3.4.2.5. Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA).



**Figura 46.** Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA).

En la figura se aprecia que los porcentajes de vacíos en el agregado mineral (VMA) de los especímenes diseñados a 140°C, 130°C, 120°C y 100°C con adición de 1%, 2% y 3% de Zeolita, es mayor que el porcentaje de vacíos de agregado mineral de la muestra patrón

### 3.4.2.6. Vacíos llenos con cemento asfáltico (%).

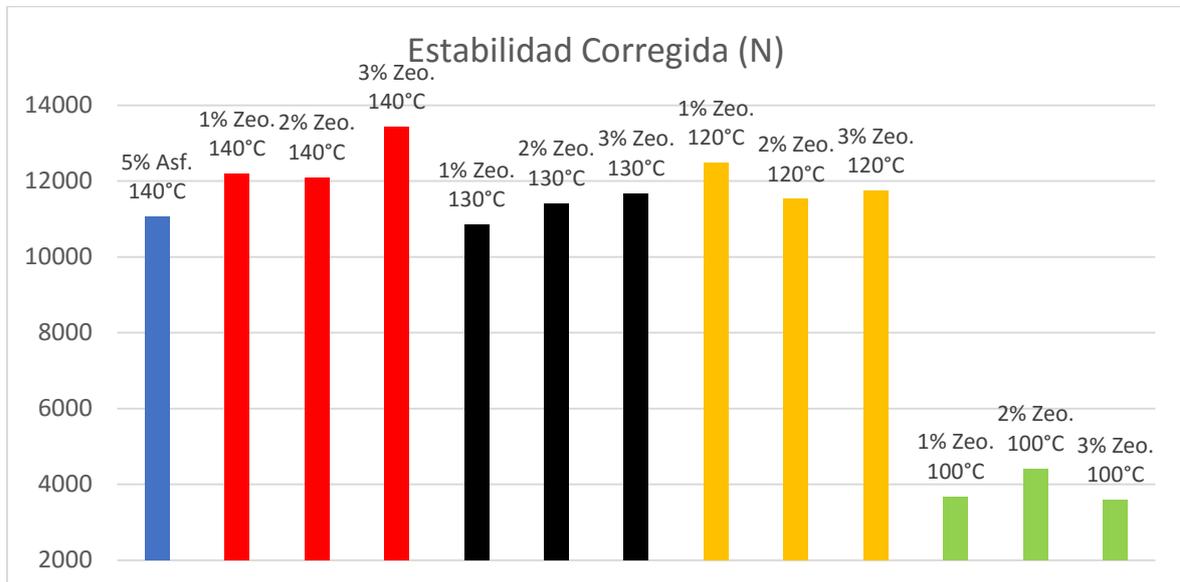


**Figura 47.** Vacíos llenos con cemento asfáltico (%).

En la figura se aprecia que los porcentajes de vacíos llenos con cemento asfáltico de los especímenes diseñados a 120°C con adición de 1% y 2% de zeolita, tienen una mayor proporción que el diseño patrón. Los porcentajes de vacíos en el agregado mineral (VMA) de los especímenes diseñados a 100°C con adición de 1%, 2% y 3%, además de los especímenes diseñados a 120°C con adición de 3% de Zeolita tienen una menor proporción que el diseño patrón.

### 3.4.3. Clase C.

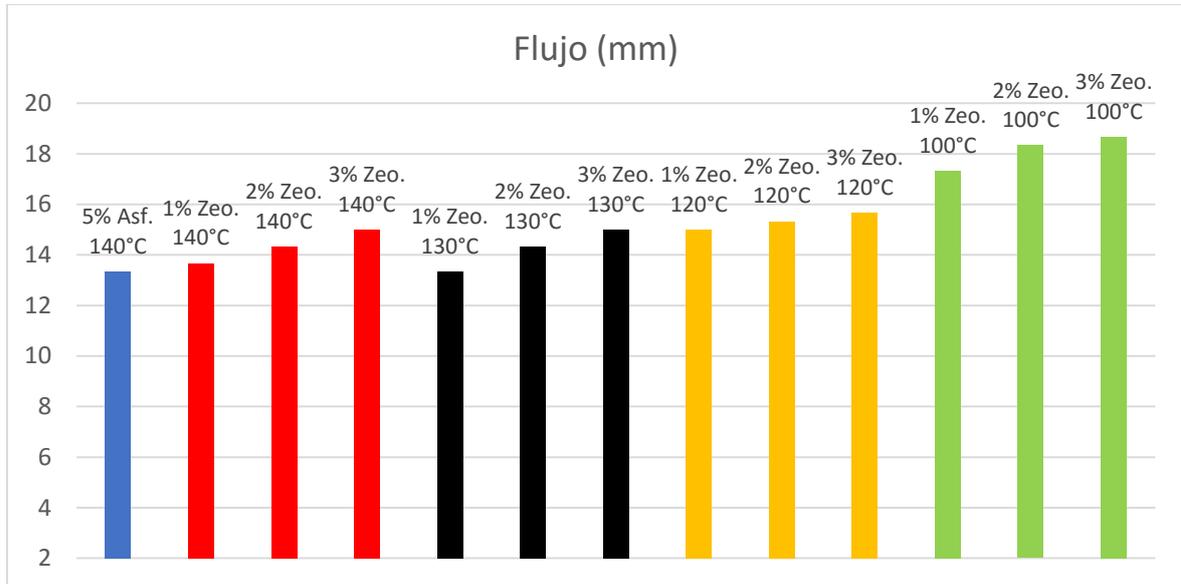
#### 3.4.3.1. Estabilidad (N).



**Figura 48.** Estabilidad (N).

En la figura se aprecia que los resultados de estabilidad de los especímenes diseñados a 120°C con adición de 1% y 3% de Zeolita se encuentran a una mayor estabilidad que la mezcla patrón. Los resultados de estabilidad de los especímenes diseñados a 120°C con adición de 2%, así como los especímenes diseñados a 100°C con adición de 1%, 2% y 3% de Zeolita se encuentran a una menor estabilidad que la mezcla patrón.

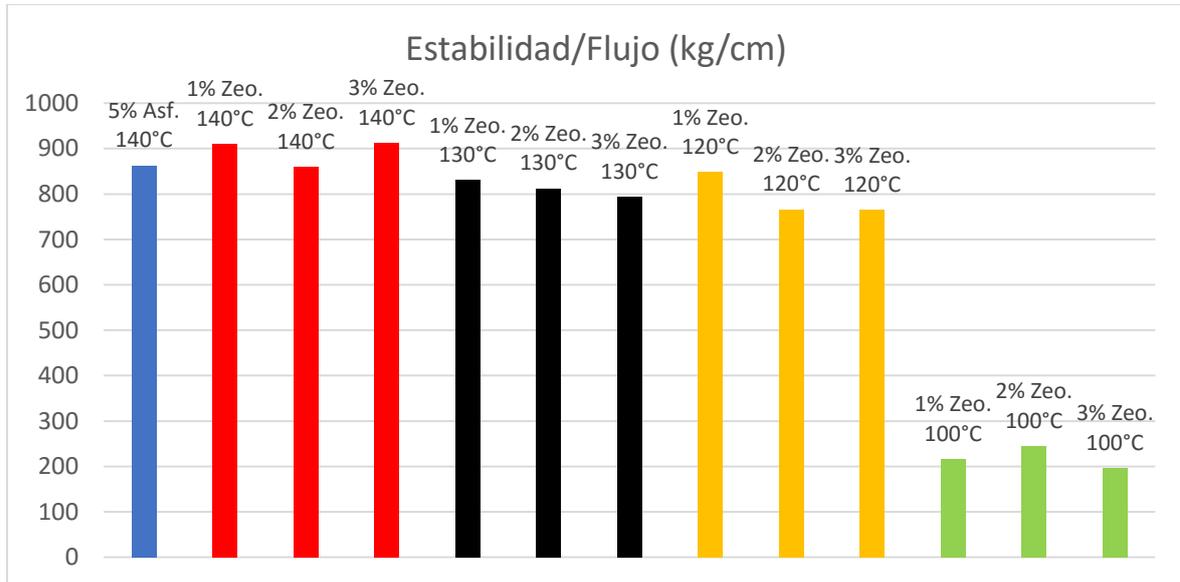
### 3.4.3.2. Flujo (mm).



**Figura 49.** Flujo (mm).

En la figura se aprecia que los resultados de flujo de los especímenes diseñados a 120°C con adición de 1%, 2% y 3%, así como los especímenes diseñados a 100°C con adición de 1%, 2% y 3% de Zeolita poseen un mayor flujo que la mezcla patrón.

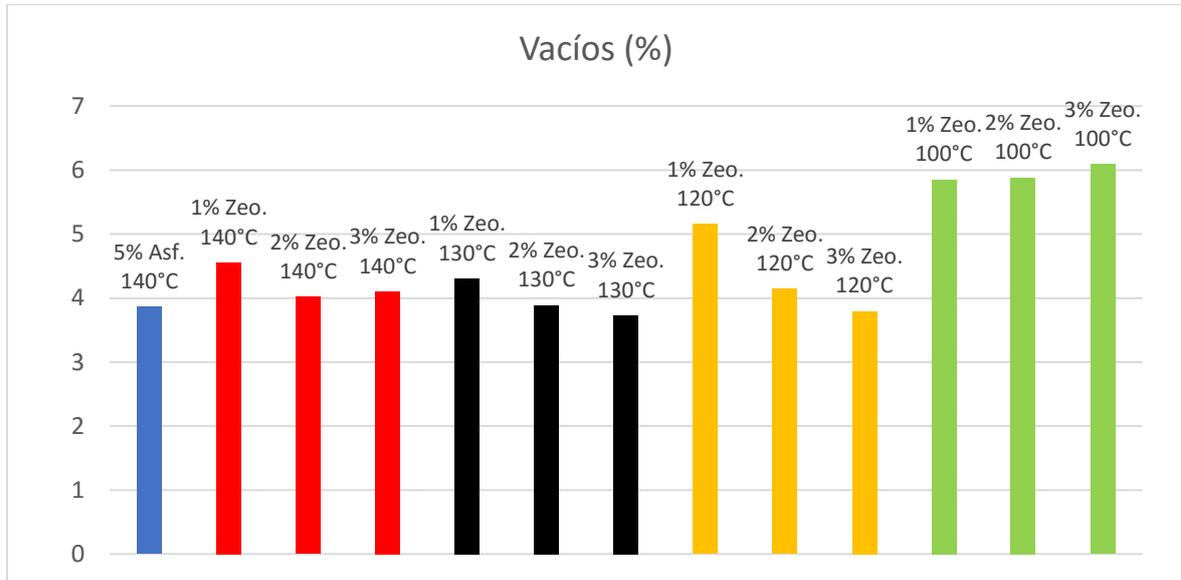
### 3.4.3.3. Estabilidad/Flujo (kg/cm).



**Figura 50.** Estabilidad/Flujo (kg/cm).

En la figura se aprecia que los resultados de relación/flujo de los especímenes, diseñados a 120°C con adición de 1%, 2% y 3%, así como los especímenes diseñados a 100°C con adición de 1%, 2% y 3% de Zeolita, es menor que la relación estabilidad/flujo de la mezcla patrón.

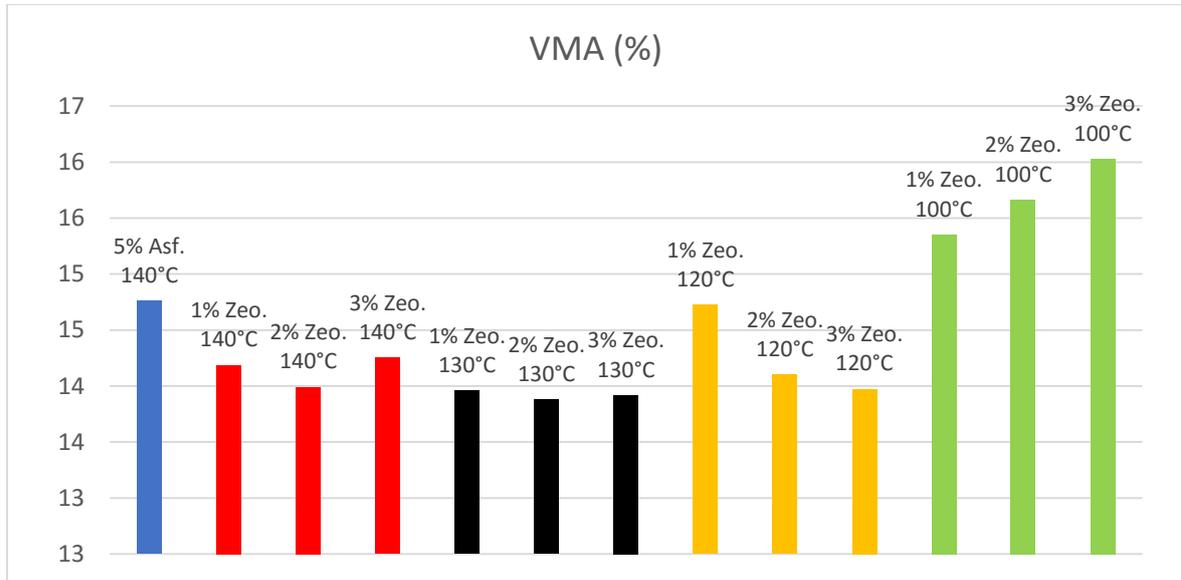
### 3.4.3.4. Vacíos (%).



**Figura 51.** Vacíos (%).

En la figura se aprecia que los porcentajes de vacíos de los especímenes diseñados a 120°C con adición de 1%, 2% y 3% de Zeolita tienen una menor proporción que el diseño patrón. Los porcentajes de vacíos de los especímenes diseñados a 100°C con adición de 1%, 2% y 3% de Zeolita tienen una mayor proporción que el diseño patrón.

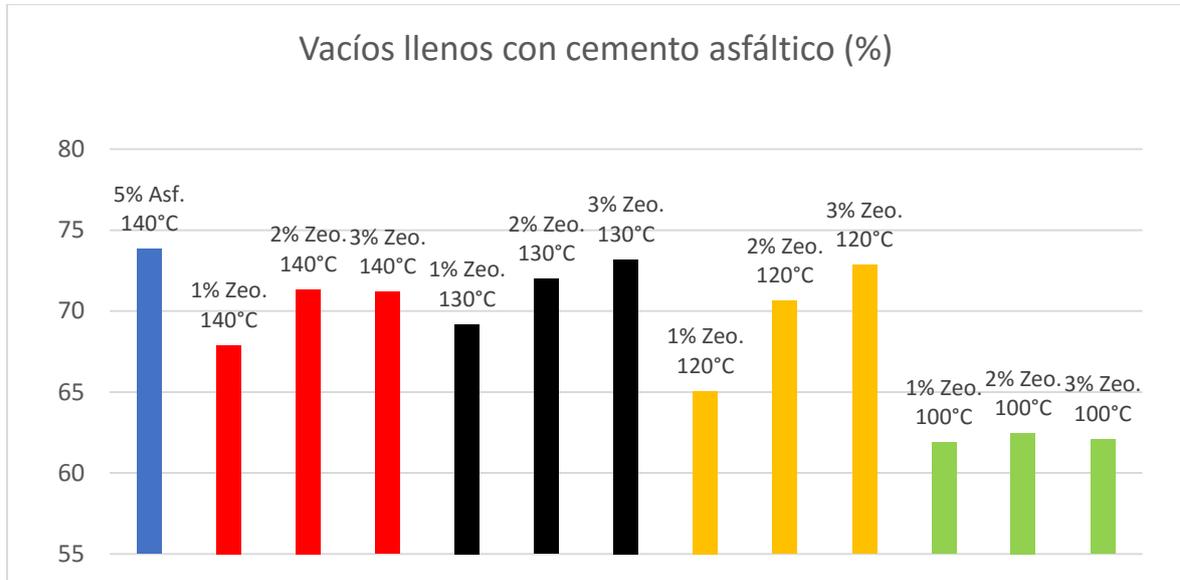
### 3.4.3.5. Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA).



**Figura 52.** Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA).

En la figura se aprecia que los porcentajes de vacíos en el agregado mineral (VMA) de los especímenes diseñados a 120°C con adición de 1%, 2% y 3% de Zeolita, además de los especímenes diseñados a 120°C con adición de 3% de Zeolita tienen una menor proporción que el diseño patrón. Los porcentajes de vacíos en el agregado mineral (VMA) de los especímenes diseñados a 100°C con adición de 1% y 2% de Zeolita tienen una mayor proporción que el diseño patrón.

### 3.4.3.6. Vacíos llenos con cemento asfáltico (%).



**Figura 53.** Vacíos llenos con cemento asfáltico (%).

En la figura se aprecia que los porcentajes de vacíos llenos con cemento asfáltico de los especímenes diseñados a 120°C con adición de 1% y 2% de zeolita, tienen una mayor proporción que el diseño patrón. Los porcentajes de vacíos en el agregado mineral (VMA) de los especímenes diseñados a 100°C con adición de 1%, 2% y 3%, además de los especímenes diseñados a 120°C con adición de 3% de Zeolita tienen una menor proporción que el diseño patrón.

## 3.5. Costos.

### 3.5.1. Costo a nivel de laboratorio del diseño asfáltico óptimo con adición de zeolita.

En la figura se muestra que el precio de elaboración de mezclas asfálticas con adición de Zeolita por metro cuadrado es S/. 38.03 nuevos soles, mientras que el precio por metro cuadrado de una mezcla asfáltica convencional es de S/. 30.22 nuevos soles.

**Tabla 34.***Análisis de precios unitarios.*

Partida	<b>1.01</b> MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE E= 5.0 CM							
Rendimiento	<b>m3/DIA</b>	MO	<b>25.0000</b>	EQ	<b>25.0000</b>			
<b>Código</b>	<b>Descripción del recurso</b>				<b>Costo unitario por: m3</b>		<b>467.37</b>	
	<b>Materiales</b>			<b>Unidad</b>	<b>Cuadrilla</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio S/.</b>	<b>Parcial S/.</b>
213000006	ASFALTO RC-25			gln		0.5	9.32	4.66
213000025	CONCRETO ASFÁLTICO EN CALIENTE			m3		1.05	440.68	462.71
								<b>467.37</b>

**Tabla 35.** *Análisis de precios unitarios con adición de Zeolita.*

Partida	<b>1.01</b> MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE E= 5.0 CM							
Rendimiento	<b>m3/DIA</b>	MO	<b>25.0000</b>	EQ	<b>25.0000</b>			
<b>Código</b>	<b>Descripción del recurso</b>				<b>Costo unitario por: m3</b>		<b>609.974</b>	
	<b>Materiales</b>			<b>Unidad</b>	<b>Cuadrilla</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio S/.</b>	<b>Parcial S/.</b>
213000006	ASFALTO RC-25			gln		0.5	9.32	4.66
213000025	CONCRETO ASFÁLTICO EN CALIENTE			m3		1.05	440.68	462.71
	Zeolita			Kg		46	3.1	142.60
								<b>609.97</b>

En las figuras anteriores se muestra el precio de la mezcla asfáltica convencional y de la mezcla asfáltica con adición de Zeolita en 2%

### 3.5.2. Presupuesto de investigación

**Tabla 36.**

*Presupuesto.*

Materiales	Cant.	P.U.	Parcial	Total
Copias e impresiones de formatos	1	100	100	
Materiales para pruebas piloto				
Agregado Grueso	1	60.49	60.49	
Agregado Fino	1	42.7	42.7	
Cemento asfáltico 60/70	1	150	150	
Zeolita	1	125	125	
ENSAYOS				478.19
Análisis granulométrico por tamizado (F y G)	1	50	50	
Análisis granulométrico por tamizado global	1	40	40	
Límite líquido, Límite plástico e índice de plasticidad	1	40	40	
Peso específico y absorción del agregado grueso	3	30	90	
Peso específico y absorción del agregado fino	3	30	90	
Abrasión de los ángeles al desgaste de los agregados	1	120	120	
Porcentaje de partículas chatas y alargadas	1	40	40	
Porcentaje de caras fracturadas	1	20	20	
Estabilidad Marshall (elaboración, estabilidad, flujo) por briqueta	144	350	50400	
Contenido de humedad de Zeolita	3	10	30	
RECURSOS HUMANOS				50920.00
Técnico de laboratorio	2	1500	3000	
Otros	1	1238	1238	
				4238
Total				55636.19

Nota. Elaboración propia

La tabla anterior muestra los costos de materiales, ensayos, consultoría técnica y otros gastos generales, siendo un total de S/. 55,636.19 nuevos soles.

## **IV. DISCUSIÓN**

### **4.1. Diseño de mezcla asfáltica en caliente a 140°C.**

#### **4.1.1. Calidad de los agregados.**

4.1.1.1. Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos. Al combinaron ambos agregados en diferentes proporciones se buscar la proporción de la granulometría que cumpla con los requerimientos establecidos en el MAC 2 del “Manual de Carreteras – Especificaciones técnicas Generales para Construcción - EG-2013” sección 423, obteniendo una relación de 48% de agregado grueso y 52% de agregado fino, el resultado de la gradación matemática se comprobó en el laboratorio obteniendo los resultados exigidos por las especificaciones.

4.1.1.2. Peso específico y absorción del agregado fino. Según los parámetros establecidos en el “Manual de Carreteras – Especificaciones técnicas Generales para Construcción - EG-2013” sección 423, indica un valor máximo de 0.5%, la absorción encontrada (0.44) valor que cumple comparando a los ensayos realizados.

4.1.1.3. Peso específico y absorción de agregados gruesos. Según los parámetros establecidos en el “Manual de Carreteras – Especificaciones técnicas Generales para Construcción - EG-2013” sección 423, indica un valor máximo de 1%, el valor calculado en los ensayos es de 0.93%, valor con el cual se acepta el ensayo.

4.1.1.4. Agregados. Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la degradación en agregados gruesos de tamaños menores por abrasión e impacto en la máquina de los ángeles. Según los parámetros establecidos en el “Manual de Carreteras – Especificaciones técnicas Generales para Construcción - EG-2013” sección 423, el desgaste de los agregados mediante el ensayo de abrasión de los ángeles tiene un valor máximo de 40%, en nuestro ensayo el desgaste de los agregados es de 12%, valor que está dentro de los parámetros requeridos.

4.1.1.5. Porcentaje de caras fracturadas. Según los parámetros establecidos en el “Manual de Carreteras – Especificaciones técnicas Generales para Construcción - EG-2013” sección 423, el porcentaje de caras fracturadas mínimo es 85/50, los valores calculados en los

agregados estudiados, con aproximación al 1% son 95/87, valores que cumple con los requerimientos exigidos.

4.1.1.6. Partículas chatas y alargadas. Según los parámetros establecidos en el “Manual de Carreteras – Especificaciones técnicas Generales para Construcción - EG-2013” sección 423, para el ensayo de partículas chatas y alargadas, el valor máximo es de 10%, los materiales estudiados tienen un porcentaje de 8.55% de partículas chatas y alargadas, porcentaje que se encuentran dentro del valor máximo permitido.

4.1.1.7. Índice de plasticidad. Los resultados obtenidos fueron comparados con “Manual de Carreteras – Especificaciones técnicas Generales para Construcción - EG-2013” sección 423, que indica los requerimientos de los agregados finos para un MAC, no presentando índice de plasticidad el material seleccionado a través de la malla N°40 pero presentando un índice de plasticidad de 11, valor que es mayor 4 que es el requerimiento máximo, pero se acepta el material ya que se comprueba la durabilidad de la mezcla asfáltica

#### **4.1.2. Diseño de la mezcla asfáltica convencional.**

4.1.2.1. Diseño de la mezcla patrón por método Marshall.

4.1.2.1.1. Dosificación de los agregados. Según los estudios realizados y de acuerdo a los requerimientos exigidos por la sección 423 del Manual de carreteras se concluye que el porcentaje de asfalto óptimo se encuentra en 5% para la clase A, clase B y clase C.

#### **4.2. Zeolita**

##### **4.2.1. Humedad de la zeolita**

El valor de humedad hallado en la zeolita es de 2.92%, este ensayo se realiza en la ciudad de Chiclayo a una temperatura de 24°C y considerando el material que pasa el tamiz N°200

#### **4.3. Mezclas asfálticas modificadas.**

Los resultados de los ensayos con zeolita a 140°C – clase A, 1%, 2% y 3% cumple con la estabilidad mínima, 1% y 2% con los parámetros de flujo, 1% con la relación estabilidad-flujo, 2% con los parámetros de porcentaje de vacíos, ninguno con el porcentaje de vacíos en el agregado mineral mínimo, 2% con los parámetros de vacíos llenos con cemento

asfáltico requeridos por el “Manual de Carreteras – Especificaciones técnicas Generales para Construcción - EG-2013”

Los resultados de los ensayos con zeolita a 130°C – clase A, 1%, 2% y 3% cumple con la estabilidad mínima, ninguno con los parámetros de flujo, ninguno con la relación estabilidad-flujo, 1% y 2% con los parámetros de porcentaje de vacíos, ninguno con el porcentaje de vacíos en el agregado mineral mínimo, 1% y 2% con los parámetros de vacíos llenos con cemento asfáltico requeridos por el “Manual de Carreteras – Especificaciones técnicas Generales para Construcción - EG-2013”

Los resultados de los ensayos con zeolita a 120°C – clase A, 1%, 2% y 3% cumple con la estabilidad mínima, 1%, 2% y 3% con los parámetros de flujo, ninguno con la relación estabilidad-flujo, 1%, 2% y 3% con los parámetros de porcentaje de vacíos, ninguno con el porcentaje de vacíos en el agregado mineral mínimo, 1%, 2% y 3% con los parámetros de vacíos llenos con cemento asfáltico requeridos por el “Manual de Carreteras – Especificaciones técnicas Generales para Construcción - EG-2013”

Los resultados de los ensayos con zeolita a 100°C – clase A, 3% cumple con la estabilidad mínima, ninguno con los parámetros de flujo, ninguno con la relación estabilidad-flujo, 3% con los parámetros de porcentaje de vacíos, 1% y 2% con el porcentaje de vacíos en el agregado mineral mínimo, 3% con los parámetros de vacíos llenos con cemento asfáltico requeridos por el “Manual de Carreteras – Especificaciones técnicas Generales para Construcción - EG-2013”

Los resultados de los ensayos con zeolita a 140°C y 130°C – clase B, 1%, 2% y 3% cumple con la estabilidad mínima, 1%, 2% y 3% con los parámetros de flujo, ninguno con la relación estabilidad-flujo, 2% y 3% con los parámetros de porcentaje de vacíos, 1%, 2% y 3% con el porcentaje de vacíos en el agregado mineral mínimo, 2% y 3% con los parámetros de vacíos llenos con cemento asfáltico requeridos por el “Manual de Carreteras – Especificaciones técnicas Generales para Construcción - EG-2013”

Los resultados de los ensayos con zeolita a 120°C – clase B, 1%, 2% y 3% cumple con la estabilidad mínima, 1%, 2% y 3% con los parámetros de flujo, ninguno con la relación estabilidad-flujo, 2% y 3% con los parámetros de porcentaje de vacíos, 1%, 2% y 3% con el porcentaje de vacíos en el agregado mineral mínimo, 1%, 2% y 3% con los parámetros de

vacíos llenos con cemento asfáltico requeridos por el “Manual de Carreteras – Especificaciones técnicas Generales para Construcción - EG-2013”

Los resultados de los ensayos con zeolita a 100°C – clase B, ninguno cumple con los parámetros de vacíos llenos con cemento asfáltico requeridos por el “Manual de Carreteras – Especificaciones técnicas Generales para Construcción - EG-2013”

Los resultados de los ensayos con zeolita a 140°C y 130°C – clase C, 1%, 2% y 3% cumple con la estabilidad mínima, 1%, 2% y 3% con los parámetros de flujo, ninguno con la relación estabilidad-flujo, 1%, 2% y 3% con los parámetros de porcentaje de vacíos, 1%, 2% y 3% con el porcentaje de vacíos en el agregado mineral mínimo, 2% y 3% con los parámetros de vacíos llenos con cemento asfáltico requeridos por el “Manual de Carreteras – Especificaciones técnicas Generales para Construcción - EG-2013”

Los resultados de los ensayos con zeolita a 120°C – clase C, 1%, 2% y 3% cumple con la estabilidad mínima, 1%, 2% y 3% con los parámetros de flujo, ninguno con la relación estabilidad-flujo, 2% y 3% con los parámetros de porcentaje de vacíos, 1%, 2% y 3% con el porcentaje de vacíos en el agregado mineral mínimo, 2% y 3% con los parámetros de vacíos llenos con cemento asfáltico requeridos por el “Manual de Carreteras – Especificaciones técnicas Generales para Construcción - EG-2013”

Los resultados de los ensayos con zeolita a 100°C – clase C, ninguno cumple con la estabilidad mínima, 1%, 2% y 3% con los parámetros de flujo, ninguno con la relación estabilidad-flujo, ninguno con los parámetros de porcentaje de vacíos, ninguno con el porcentaje de vacíos en el agregado mineral mínimo, ninguno con los parámetros de vacíos llenos con cemento asfáltico requeridos por el “Manual de Carreteras – Especificaciones técnicas Generales para Construcción - EG-2013”

#### **4.4. Evaluación de resultados de una mezcla asfáltica en caliente a 140°C con las mezclas asfálticas modificadas con adición de zeolita**

##### **4.4.1. Estabilidad (N).**

Según el “Manual de Carreteras – Especificaciones técnicas Generales para Construcción - EG-2013” – sección 423-06 indica que la estabilidad mínima para:

La clase A es 8.15 KN, de los ensayos realizados cumplen con estos requerimientos los especímenes fabricados a 140°C, 130°, 120°C con adición de 1%, 2% y 3% de Zeolita y a 100°C con adición de 3% de Zeolita.

La clase B es 5.44 KN, de los ensayos realizados cumplen con estos requerimientos los especímenes fabricados a 140°C, 130°, 120°C con adición de 1%, 2% y 3% de Zeolita.

La clase C es 4.53 KN, de los ensayos realizados cumplen con estos requerimientos los especímenes fabricados a 140°C, 130°, 120°C con adición de 1%, 2% y 3% de Zeolita.

##### **4.4.2. Flujo (mm).**

Según el “Manual de Carreteras – Especificaciones técnicas Generales para Construcción - EG-2013” – sección 423-06 indica que los valores de flujo deben encontrarse para:

La clase A entre 8 mm y 14 mm, los especímenes fabricados a 140°C con adición de 1% y 2%, 120°C con adición de 1%, 2% y 3% de Zeolita sí cumplen con los parámetros establecidos.

La clase B entre 8 mm y 16 mm, los especímenes fabricados a 140°C, 130°C y 120°C con adición de 1%, 2% y 3% de Zeolita sí cumplen con los parámetros establecidos.

La clase B entre 8 mm y 20 mm, los especímenes fabricados a 140°C, 130°C, 120°C y 100°C con adición de 1%, 2% y 3% de Zeolita sí cumplen con los parámetros establecidos.

##### **4.4.3. Estabilidad/Flujo (Kg/cm).**

Según el “Manual de Carreteras – Especificaciones técnicas Generales para Construcción - EG-2013” – sección 423-06 indica que esta relación debe encontrarse entre 1700 y 4000 Kg/cm, la relación encontrada en las mezclas modificadas es menor a la mínima requerida,

según los resultados estudiados se entiende que esta relación es menor a la mínima, debido al valor de flujo alto de los especímenes con mezcla asfáltica modificada.

#### **4.4.4. Vacíos**

Según el “Manual de Carreteras – Especificaciones técnicas Generales para Construcción - EG-2013” – sección 423-06 indica que el porcentaje de vacíos con aire para:

La clase A entre 3% y 5 %, de los ensayos realizados cumplen a 140°C con adición de 2% de zeolita, 130°C con adición de 1% y 2% de zeolita, 120°C con adición de 1%, 2% y 3% de zeolita y a 100°C con adición de 3% de zeolita.

La clase B entre 3% y 5 %, de los ensayos realizados cumplen a 140°C, 130°C y 120°C con adición de 2% y 3% de zeolita.

La clase C entre 3% y 5 %, de los ensayos realizados cumplen a 140°C, 130°C con adición de 1%, 2% y 3% de zeolita y 120°C con adición de 2% y 3% de zeolita.

#### **4.4.5. Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA).**

Según el “Norma CE.010 Pavimentos Urbanos –2010” – tabla 32 indica para:

La clase A el porcentaje mínimo de vacíos en el agregado mineral debe ser 15%, los especímenes fabricados a 100°C con 1% y 2% de zeolita.

La clase B el porcentaje mínimo de vacíos en el agregado mineral debe ser 14%, los especímenes fabricados a 140°C, 130°C y 120°C con 1%, 2% y 3% de zeolita.

La clase C el porcentaje mínimo de vacíos en el agregado mineral debe ser 13%, los especímenes fabricados a 140°C, 130°C y 120°C con 1%, 2% y 3% de zeolita.

#### **4.4.6. Vacíos llenos con cemento asfáltico (%).**

Según el “Norma CE.010 Pavimentos Urbanos –2010” – tabla 31 indica que el porcentaje de vacíos llenos de asfalto para:

La clase A entre 65% y 75%, de los ensayos realizados cumplen a 140°C con adición de 2% de zeolita, 130°C con adición de 1% y 2% de zeolita, 120°C con adición de 1%, 2% y 3% de zeolita y 100°C con adición de 3% de zeolita.

La clase B entre 65% y 78%, de los ensayos realizados cumplen a 140°C, 130°C con adición de 2% y 3% de zeolita y 120°C con adición de 1%, 2% y 3% de zeolita.

La clase C entre 70% y 80%, de los ensayos realizados cumplen a 140°C, 130°C y 120°C con adición de 2% y 3% de zeolita.

#### **4.5. Costos.**

##### **4.5.1. Costo a nivel de laboratorio del diseño asfáltico óptimo con adición de zeolita.**

Los costos unitarios indican que la producción Mezcla Asfáltica con adición de Zeolita son mayores que los costos de Mezclas convencionales, este costo se ve elevado principalmente por el transporte del mineral desde la ciudad de Arequipa.

##### **4.5.2. Presupuesto de investigación**

El presupuesto de la investigación incluye los costos de los ensayos, materiales y gastos generales realizados durante toda la investigación.

## V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. CONCLUSIONES

1. Se diseñó una mezcla asfáltica convencional en caliente para la clase A, B y C de vías mediante la metodología Marshall con material proveniente de la cantera la pluma ubicada en Batangrande, y con asfalto PEN 60/70 en porcentaje de 5%, los ensayos realizados cumplieron con los requerimientos de la Norma CE.010 Pavimentos Urbanos – 2010.
2. Se estudió las propiedades físicas de la zeolita como filler (humedad), comprobando su característica de hidratación y deshidratación y obteniendo un porcentaje de humedad de 2.92% en estado natural.
3. Se elaboró mezclas asfálticas a 140°C, 130°C, 120°C y 100°C con adición de zeolita como agregado filler en proporciones de 1%, 2% y 3% mediante la metodología Marshall. Se observó que para la elaboración de los especímenes se requirió mayor tiempo de mezclado para lograr la homogeneidad de la mezcla y que la variación de la trabajabilidad de la mezcla disminuía conforme a la temperatura de elaboración.
4. Se evaluó los resultados de las mezclas asfálticas en caliente con las mezclas asfálticas a 140°C, 130°C, 120°C y 100°C con adición de zeolita, obteniendo mejor trabajabilidad con la mezcla diseñada a 140°C, 130°C y 120°C para las clases B y C de vías con resultados dentro de los parámetros requeridos para estabilidad, flujo, vacíos y vacíos llenos con cemento asfálticos, exigidos por la Norma CE.010 Pavimentos Urbanos – 2010. A 100 °C no cumple debido a que a esta temperatura la mezcla es muy viscosa impidiendo la trabajabilidad y el compactado. Para la clase A de vías solo cumple con la estabilidad y flujo requeridos, mas no para vacíos y vacíos llenos con cemento asfáltico debido a que el material utilizado cuenta con mucho porcentaje de finos en su granulometría.
5. En los especímenes diseñados con mezcla asfáltica modificada con adición del 2% de Zeolita, el costo de elaboración de mezclas asfálticas con Zeolita aumenta en un 23.38 % (S/. 142.60) por metro cúbico (m<sup>3</sup>).

## **5.2.RECOMENDACIONES**

1. Verificar que los ensayos de los materiales a emplear en las mezclas asfálticas cumplan con los requerimientos establecidos por el Manual de ensayo de materiales y el Manual de carreteras, el estudio granulométrico es el principal ya que de esto el tipo de MAC usado para el diseño de la mezcla. El uso de un termómetro laser es fundamental para una correcta lectura de la temperatura instantánea en el proceso de elaboración y así obtener resultados reales con la temperatura a trabajar.
2. Estudiar el comportamiento del mineral zeolita con otros materiales como el cemento para el curado del concreto debido a que la zeolita tiende a hidratarse y deshidratarse con los cambios de temperatura.
3. Utilizar materiales con menos porcentaje de finos y que esté dentro de un MAC establecido según la Norma CE.010 Pavimentos Urbanos –2010, se obtendrán mejores resultados para la clase A de vías en los vacíos en el agregado mineral y vacíos llenos con cemento asfáltico.
4. Se recomienda el uso de la zeolita para las clases B y C de vías a temperaturas de 140°C, 130°C y 120°C.
5. Se recomienda hidratar la zeolita natural y realizar nuevas investigaciones en mezclas asfálticas en caliente.

## VI. REFERENCIAS

- Alonso, A., Tejada, E., Moreno, F., Rubio, M. C., y Medel, E. (2013, abril-junio) Estudio de laboratorio sobre utilización de zeolita natural versus zeolita sintética en la fabricación de mezclas semicalientes. *Materiales de Construcción*, vol. 63 (310), 195-217. doi: 10.3989/mc.2013.05911
- Benítez, A., Mauricio, K., y Araujo, E., (2015). *Evaluación de la resistencia de una mezcla asfáltica tibia, sustituyendo en su fabricación, parte del agregado pétreo, por escoria de alto horno* (trabajo de grado de especialidad). Universidad Católica de Colombia, Bogotá D.C.
- Break, D. W. (1974). *Zeolite Molecular Sieves*. Wiley Interscience.
- Costa, A. (marzo de 2014). El desarrollo de mezclas bituminosas a menor temperatura. Su aplicación a las carreteras locales. Ajuste a la modalidad de Compra Pública Innovadora. *Anticipando el Futuro de las Carreteras Locales*. Congreso llevado a cabo en el 22º Symposium Nacional de Vías y Obras de la Administración Local (VYODEAL), Zaragoza, España
- Crespin R., Santa Cruz I., y Torres P. (2012). *Aplicación del método Marshall y granulometría Superpave en el diseño de mezclas asfálticas en caliente con asfalto clasificación grado de desempeño* (tesis de pregrado). Universidad de El Salvador, San Salvador.
- Curi A., Granda W., Lima H., y Sousa W. (2006). Las Zeolitas y su Aplicación en la Descontaminación de Efluentes Mineros. *La Serena*, 17(6), 111-118. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642006000600017>
- Gil, S. y Sánchez, A. (2011). Empleo de geles de sílice como zeolitas para la fabricación de mezclas semicalientes. *VI Jornada Nacional de ASEFMA*, España.
- Hernández, R., Fernández, C., y Baptista, M. (2014). Metodología de la Investigación Científica. Recuperado de [https://www.esup.edu.pe/descargas/dep\\_investigacion/Metodologia%20de%20la%20investigacion%20ta%20Edici%C3%B3n.pdf](https://www.esup.edu.pe/descargas/dep_investigacion/Metodologia%20de%20la%20investigacion%20ta%20Edici%C3%B3n.pdf)

- Méndez, G., Morán, J., y Pineda, L. (2014). *Diseño de mezcla asfáltica tibia, mediante la metodología Marshall, utilizando asfalto espumado* (tesis de pregrado). Universidad de El Salvador, San Salvador.
- Minaya S. y Ordóñez A. (2006). *Diseño Moderno de Pavimentos Asfálticos*. Lima, Perú.
- Morante F. (2004). *Las zeolitas de la costa de Ecuador(Guayaquil): geología, características y aplicaciones*. (tesis de doctorado). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.
- MTC. (2013). *Manual de Carreteras – Especificaciones Técnicas Generales para Construcción – TOMO I*. Lima, Perú.
- MTC. (2016). *Manual de Ensayos de Materiales*. Lima, Perú.
- Padilla A. (2004). *Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista* (tesina). Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España.
- RNE. (2010). *Norma CE.010 Pavimentos Urbanos*. Lima, Perú.
- Secretaría de comunicaciones y transportes Instituto Mexicano del transporte. (2005). *Análisis comparativo de los métodos Marshall y Superpave para compactación de mezclas asfálticas* (Publicación Técnica No. 271). Recuperado de <http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt271.pdf>
- Tacha, C., Huertas, L., y Arevalo, Y. (2014). *Diseño de una mezcla de asfalto en caliente msc-25 reciclada modificada con zeolita sintética* (tesis de pregrado). Universidad Católica de Colombia, Colombia D.C.
- Valeriano W., y Catacora A. (2017). *Comportamiento del diseño de mezcla asfáltica tibia, con adición de zeolita para la pavimentación de la ciudad de Juliaca* (tesis de pregrado). Universidad Nacional del Altiplano, Juliaca, Perú.