

UNIVERSIDAD RICARDO PALMA
FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE TITULACIÓN POR TESIS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL



**VARIACION DE LAS PROPIEDADES MECANICAS OBTENIDAS
DEL ENSAYO MARSHALL ENTRE LAS MEZCLAS ASFALTICAS
TIBIAS PRODUCIDAS CON DIFERENTES TECNOLOGIAS Y LAS
MEZCLAS ASFALTICAS EN CALIENTE**

TESIS

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO CIVIL**

PRESENTADO POR:

Bach. GARCIA ROJAS, JEAN CARLO.

Bach. INGA LOPEZ, RONNY DAVID.

Asesor: M. Sc. Ing. NÉSTOR W. HUAMÁN GUERRERO

LIMA – PERÚ

2020

DEDICATORIA

A mi madre por el apoyo constante, a mi padre por su enseñanza, a mis hermanos por su comprensión y en especial a mi hermanita por ser mi un gran motivo de mejorar cada día; a ellos va dedicado esta investigación.

Jean Carlo Garcia Rojas

Dedicado a mis padres, hermanas, esposa, familiares y amigos que me brindaron su apoyo y alentaron para la realización de esta tesis.

Ronny David Inga Lopez

AGRADECIMIENTO

**A nuestro asesor de tesis M.Sc. Ing. Néstor
Wilfredo Huamán Guerrero**

Por habernos orientado y guiado durante todo el proceso de investigación para la realización de esta tesis.

**A nuestro metodólogo Ing. Wilder Orlando
Rodriguez Mogollon**

Por la orientación brindada para la realización de la estructura de esta tesis

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	12
ABSTRACT	13
INTRODUCCION.....	14
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	15
1.1 Descripción de la realidad de la problemática.....	15
1.2 Formulación del Problema.....	16
1.2.1 Problema principal.....	16
1.2.2 Problemas secundarios	16
1.3 Objetivo de la Investigación	17
1.3.1 Objetivo principal.....	17
1.3.2 Objetivo secundario.....	17
1.4 Justificación e importancia del estudio.....	17
1.4.1 Importancia.....	17
1.4.2 Justificación	18
1.5 Limitaciones de la investigación	18
1.6 Viabilidad	19
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO.....	20
2.1 Antecedentes de la investigación.....	20
2.1.1 Investigaciones Nacionales.....	20
2.1.2 Investigaciones Internacionales.....	22
2.2 Agregados	23
2.2.1 Definición	23
2.2.2 Clasificación de los agregados por su tamaño.....	24
2.2.3 Propiedades de los agregados	24
2.2.4 Ensayos realizados a los agregados	26
2.2.5 Especificaciones técnicas de los agregados.....	29
2.3 Filler.....	31
2.3.1 Definición	31

2.3.2	Materiales utilizados.....	32
2.3.3	Características deseables del filler.....	32
2.4	Cemento asfáltico	32
2.4.1	Definición	32
2.4.2	Propiedades del cemento asfáltico.....	33
2.4.3	Ensayos realizados al cemento asfáltico.....	35
2.4.4	Asfalto de la destilación del petróleo	37
2.4.5	Especificaciones técnicas del cemento asfáltico	37
2.5	Mezclas asfálticas en caliente.....	39
2.5.1	Definición	39
2.5.2	Propiedades de las mezclas asfálticas en caliente	39
2.5.3	Especificaciones técnicas de las mezclas asfálticas en caliente	41
2.6	Mezclas asfálticas tibias	43
2.6.1	Introducción a las mezclas asfálticas tibias	43
2.6.2	Antecedentes de mezclas asfálticas tibias	44
2.6.3	Antecedentes internacionales	44
2.6.4	Antecedentes nacionales.....	46
2.6.5	Definición de mezclas asfálticas tibias.....	47
2.6.6	Tecnologías para la producción de mezclas asfálticas tibias.....	47
2.7	Diseño de mezclas asfálticas por el método Marshall	52
2.7.1	Definición	52
2.7.2	Pruebas a las mezclas asfálticas compactadas.....	53
2.7.3	Procedimiento.....	54
CAPITULO III: SISTEMA DE HIPOTESIS.....		56
3.1	Hipótesis	56
3.1.1	Hipótesis General	56
3.1.2	Hipótesis Específicas.....	56
3.2	Variables.....	56

3.2.1 Identificación y definición de variables.....	56
CAPITULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	59
4.1 Tipo y método de investigación.....	59
4.1.1 Método de investigación.....	59
4.1.2 Tipo de investigación	59
4.2 Nivel de investigación	59
4.3 Diseño de investigación.....	59
4.4 Población de estudio.....	60
4.5 Diseño Muestral.....	60
4.6 Técnicas e instrumentos de recolección de datos	60
4.7 Criterios de validez y confiabilidad de los instrumentos.....	60
4.8 Procedimientos para la recolección de datos	60
4.9 Técnicas para el procesamiento y análisis de datos.....	60
CAPITULO V: DESARROLLO DE LA INVESTIGACION	62
5.1 Tecnologías desarrolladas en Perú	62
5.1.1 Mezcla asfáltica tibia con aditivos químicos.....	62
5.1.2 Mezcla asfáltica tibia con aditivos orgánicos	65
5.1.3 Mezcla asfáltica tibia mediante el proceso de espumado	67
5.2 Tecnologías desarrolladas en el mundo.....	68
5.2.1 Mezcla asfáltica tibia adicionado Husil (Colombia)	68
5.2.2 Mezclas asfálticas tibias adicionado Emulsiones super estabilizantes (Chile)	69
5.2.3 Mezclas asfálticas tibias adicionado Genamin BTA (Colombia).....	69
5.2.4 Mezclas asfálticas tibias adicionado Kaowin KW (Colombia).....	69
CAPITULO VI: VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS MEZCLAS ASFALTICAS TIBIAS.....	71
6.1 Reducción de temperatura de producción	71
6.1.1 Emisión de gases en el proceso de producción.....	72
6.1.2 Energía usada en el proceso de producción.....	73
6.2 Trabajabilidad en el proceso de producción	74
6.3 Reducción de viscosidad	75

6.3.1 Energía en el proceso de compactación.....	75
6.3.2 Apertura al tráfico.....	75
CAPÍTULO VII: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	76
7.1 Comparación de resultados de los ensayos realizados en las mezclas asfálticas en caliente y las mezclas asfálticas tibias	76
7.1.1 Estabilidad en las mezclas asfálticas tibias y las mezclas asfálticas en caliente	76
7.1.2 Flujo en las mezclas asfálticas tibias y las mezclas asfálticas en caliente.	86
7.1.3 Relación estabilidad/flujo en las mezclas asfálticas tibias y las mezclas asfálticas en caliente.....	96
7.2 Variación promedio de la estabilidad Marshall al utilizar las tecnologías de producción de mezclas asfálticas tibias respecto a las mezclas asfálticas en caliente.....	106
7.3 Variación promedio de la fluencia Marshall al utilizar las tecnologías de mezclas asfálticas tibias respecto a las mezclas asfálticas en caliente	107
7.4 Variación promedio de la relación estabilidad/fluencia Marshall al utilizar las tecnologías de mezclas asfálticas tibias respecto a las mezclas asfálticas en caliente.....	108
7.5 Contrastación de Hipótesis	110
7.5.1 Hipótesis específica 1	110
7.5.2 Hipótesis específica 2	110
7.5.3 Hipótesis específica 3	111
7.6 Aporte de la investigación	111
CONCLUSIONES.....	112
RECOMENDACIONES	114
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Destilación fraccionada del petróleo	37
Figura 2: Rangos de temperatura para producción de mezclas asfálticas.....	72
Figura 3: Reducciones registradas en las emisiones de planta en la producción de mezcla.	73
Figura 4: Variación de estabilidad Marshall de mezcla asfáltica tibia para transito liviano con aceite crudo de palma tipo "A" respecto a la mezcla asfáltica en caliente. .	77
Figura 5: Variación de estabilidad Marshall de mezcla asfáltica tibia para transito liviano con aceite crudo de palma tipo "B" respecto a la mezcla asfáltica en caliente...	77
Figura 6: Variación de estabilidad Marshall de mezcla asfáltica tibia con aditivo Sasobit respecto a la mezcla asfáltica en caliente.....	78
Figura 7: Variación de estabilidad Marshall de mezcla asfáltica tibia con Zycotherm 0.15% respecto a una mezcla asfáltica en caliente.	80
Figura 8: Variación de estabilidad Marshall de mezcla asfáltica tibia con Quimibond 0.8% respecto a una mezcla asfáltica en caliente.	81
Figura 9: Variación de fluencia Marshall de mezcla asfáltica tibia con Quimibond 0.8% respecto a una mezcla asfáltica en caliente.....	82
Figura 10: Variación de estabilidad Marshall de mezcla asfáltica tibia con Genamin BTA al 2% y Kaomin KW al 3% respecto a una mezcla asfáltica en caliente.....	84
Figura 11: Variación de estabilidad Marshall de mezcla asfáltica tibia con Zeolita respecto a una mezcla asfáltica en caliente.....	85
Figura 12: Variación de Fluencia Marshall de mezcla asfáltica tibia para transito medio con aceite crudo de Palma tipo "A" respecto a una mezcla asfáltica en caliente.	87
Figura 13: Variación de Fluencia Marshall de mezcla asfáltica tibia para transito medio con aceite crudo de Palma tipo "B" respecto a una mezcla asfáltica en caliente.	87
Figura 14: Variación de fluencia Marshall de mezcla asfáltica tibia con aditivo Sasobit respecto a la mezcla asfáltica en caliente.....	89
Figura 15: Variación de fluencia Marshall de mezcla asfáltica tibia con Zycotherm 0.15% respecto a una mezcla asfáltica en caliente.	90
Figura 16: Variación de fluencia Marshall de mezcla asfáltica tibia con Quimibond 0.8% respecto a una mezcla asfáltica en caliente.	91
Figura 17: Variación de fluencia Marshall de mezcla asfáltica tibia con Husil 1% respecto a una mezcla asfáltica en caliente.....	92

Figura 18 Variación de fluencia Marshall de mezcla asfáltica tibia con Genamin BTA al 2% y Kaomin KW al 3% respecto a una mezcla asfáltica en caliente.....	94
Figura 19: Variación de fluencia Marshall de mezcla asfáltica tibia con Zeolita respecto a una mezcla asfáltica en caliente.	96
Figura 20: Variación de estabilidad/fluencia Marshall de mezcla asfáltica tibia para tránsito liviano con aceite crudo de palma tipo "A" respecto a la mezcla asfáltica en caliente.	97
Figura 21: Variación de estabilidad/fluencia Marshall de mezcla asfáltica tibia para tránsito liviano con aceite crudo de palma tipo "B" respecto a la mezcla asfáltica en caliente.	98
Figura 22: Variación de estabilidad Marshall de mezcla asfáltica tibia con aditivo Sasobit respecto a la mezcla asfáltica en caliente.	99
Figura 23: Variación de fluencia Marshall de mezcla asfáltica tibia con Zycotherm 0.15% respecto a una mezcla asfáltica en caliente.	100
Figura 24: Variación de la relación estabilidad/fluencia Marshall de mezcla asfáltica tibia con Quimibond 0.8% respecto a una mezcla asfáltica en caliente.	101
Figura 25: Variación de la relación estabilidad/fluencia Marshall de mezcla asfáltica tibia con Husil 1% respecto a una mezcla asfáltica en caliente.	102
Figura 26: Variación de la relación estabilidad/fluencia Marshall de mezcla asfáltica tibia con Husil 1% respecto a una mezcla asfáltica en caliente.	104
Figura 27: Variación de la relación estabilidad/fluencia Marshall de mezcla asfáltica tibia con Zeolita respecto a una mezcla asfáltica en caliente.	106

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Especificaciones técnicas del agregado fino	30
Tabla 2: Especificaciones técnicas del agregado grueso	31
Tabla 3: Granulometría para las mezclas asfálticas en caliente.....	31
Tabla 4: Tipos de Cemento Asfáltico, MTC (2013).....	33
Tabla 5: Especificaciones técnicas del cemento asfáltico clasificado por penetración ..	38
Tabla 6: Especificaciones técnicas del cemento asfáltico clasificado por viscosidad	38
Tabla 7: Clasificación de las mezclas asfálticas.	39
Tabla 8: Gradación para mezcla asfáltica en caliente.....	42
Tabla 9: Requisitos para mezcla de concreto bituminoso.....	42
Tabla 10: Requisitos de adherencia	43
Tabla 11: Vacíos mínimos en el agregado mineral (VMA).....	43
Tabla 12: Antecedentes cronológicos en el trabajo con mezclas tibias.	44
Tabla 13: Antecedentes con mezclas tibias en Perú.	46
Tabla 14: Clasificación de las tecnologías de mezclas asfálticas tibias empleando Asfalto espumado.	49
Tabla 15: Clasificación de las tecnologías de mezclas asfálticas tibias de acuerdo al empleo de aditivos orgánicos.....	51
Tabla 16: Definición de Variables.	56
Tabla 17: Cuadro comparativo de variación de estabilidad Marshall de una mezcla asfáltica tibia con aditivo orgánico Aceite crudo de Palma tipo A respecto a una mezcla asfáltica en caliente	76
Tabla 18: Cuadro comparativo de variación de estabilidad Marshall de una mezcla asfáltica tibia con aditivo orgánico Aceite crudo de Palma tipo B respecto a una mezcla asfáltica en caliente.	76
Tabla 19: Cuadro comparativo de variación de estabilidad Marshall de una mezcla asfáltica tibia con aditivo orgánico Sasobit respecto a una mezcla asfáltica en caliente.	78
Tabla 20: Cuadro comparativo de variación de estabilidad Marshall de una mezcla asfáltica tibia con aditivo químico Zycotherm respecto a una mezcla asfáltica en caliente.	79

Tabla 21: Cuadro comparativo de variación de estabilidad Marshall de una mezcla asfáltica tibia con aditivo químico Quimibond respecto a una mezcla asfáltica en caliente.	80
Tabla 22: Cuadro comparativo de estabilidad Marshall de una mezcla asfáltica tibia con aditivo químico Husil respecto a una mezcla asfáltica en caliente.	82
Tabla 23: Cuadro comparativo de estabilidad Marshall de una mezcla asfáltica tibia con aditivo químico Genamin BTA al 3% y Kaomin KW al 3% respecto a una mezcla asfáltica en caliente.	83
Tabla 24: Cuadro comparativo de variación de Fluencia Marshall de una mezcla asfáltica tibia con Zeolita respecto a una mezcla asfáltica en caliente.	85
Tabla 25: Cuadro comparativo de variación de fluencia Marshall de una mezcla asfáltica tibia con aditivo orgánico Aceite crudo de Palma tipo A respecto a una mezcla asfáltica en caliente.	86
Tabla 26: Cuadro comparativo de variación de fluencia Marshall de una mezcla asfáltica tibia con aditivo orgánico Aceite crudo de Palma tipo B respecto a una mezcla asfáltica en caliente.	86
Tabla 27: Cuadro comparativo de variación de fluencia Marshall de una mezcla asfáltica tibia con aditivo orgánico Sasobit respecto a una mezcla asfáltica en caliente.	88
Tabla 28: Cuadro comparativo de variación de fluencia Marshall de una mezcla asfáltica tibia con aditivo químico Zycotherm respecto a una mezcla asfáltica en caliente.	89
Tabla 29: Cuadro comparativo de fluencia de estabilidad Marshall de una mezcla asfáltica tibia con aditivo químico Quimibond respecto a una mezcla asfáltica en caliente.	91
Tabla 30: Cuadro comparativo de fluencia de estabilidad Marshall de una mezcla asfáltica tibia con aditivo químico Husil respecto a una mezcla asfáltica en caliente.	92
Tabla 31: Cuadro comparativo de fluencia de estabilidad Marshall de una mezcla asfáltica tibia con aditivos químicos Genamin BTA al 3% y Kaomin KW al 2% respecto a una mezcla asfáltica en caliente.	93
Tabla 32: Cuadro comparativo de variación de fluencia Marshall de una mezcla asfáltica tibia con Zeolita respecto a una mezcla asfáltica en caliente.	95
Tabla 33: Cuadro comparativo de variación de la relación estabilidad/fluencia Marshall de una mezcla asfáltica tibia con aditivo orgánico Aceite crudo de Palma tipo A respecto a una mezcla asfáltica en caliente.	97

Tabla 34: Cuadro comparativo de variación de la relación estabilidad/fluencia Marshall de una mezcla asfáltica tibia con aditivo orgánico Aceite crudo de Palma tipo B respecto a una mezcla asfáltica en caliente.....	97
Tabla 35: Cuadro comparativo de variación de la relación estabilidad/fluencia Marshall de una mezcla asfáltica tibia con aditivo orgánico Sasobit respecto a una mezcla asfáltica en caliente.....	98
Tabla 36: Cuadro comparativo de variación de la relación estabilidad/fluencia Marshall de una mezcla asfáltica tibia con aditivo químico Zycotherm respecto a una mezcla asfáltica en caliente.....	99
Tabla 37: Cuadro comparativo de la relación de estabilidad/fluencia Marshall de una mezcla asfáltica tibia con aditivo químico Quimibond respecto a una mezcla asfáltica en caliente.....	100
Tabla 38: Cuadro comparativo de la relación de estabilidad/fluencia Marshall de una mezcla asfáltica tibia con aditivo químico Husil respecto a una mezcla asfáltica en caliente.....	102
Tabla 39: Cuadro comparativo de la relación de estabilidad/fluencia Marshall de una mezcla asfáltica tibia con aditivo químico Genamin BTA al 3% y Kaomin KW al 2% respecto a una mezcla asfáltica en caliente.....	103
Tabla 40: Cuadro comparativo de variación de la relación estabilidad/fluencia Marshall de una mezcla asfáltica tibia con Zeolita respecto a una mezcla asfáltica en caliente.	105
Tabla 41: Variación en estabilidad de las diferentes tecnologías de producción de mezclas asfálticas tibias respecto a las mezclas asfálticas en caliente.	106
Tabla 42: Variación en fluencia de las diferentes tecnologías de producción de mezclas asfálticas tibias respecto a las mezclas asfálticas en caliente.	107
Tabla 43: Variación en la relación estabilidad/fluencia de las diferentes tecnologías de producción de mezclas asfálticas tibias respecto a las mezclas asfálticas en caliente..	108

RESUMEN

La presente investigación tuvo como finalidad analizar la variación del comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas tibias producidas con diferentes tecnologías respecto a las mezclas asfálticas en caliente. Se comenzó con el planteamiento del problema, aquí se hace la presentación y explicación de la actual realidad problemática, seguidamente se establecen los objetivos los cuales son determinar la variación de estabilidad, variación de fluencia y variación de la relación estabilidad/fluencia al utilizar las tecnologías de mezclas asfálticas tibias respecto a las mezclas asfálticas en caliente. Luego se hace el desarrollo del marco teórico, donde se muestra los diferentes materiales usados para la producción de mezclas asfálticas tibias y mezclas asfálticas en caliente, así como sus características y especificaciones técnicas, se muestra las diferentes tecnologías de producción de mezclas asfálticas tibias y el diseño de mezclas asfálticas por el método Marshall.

Luego se desarrolla la metodología de la investigación, donde se muestra el tipo de investigación, método de investigación, nivel de investigación, diseño de investigación, población, diseño muestral y las técnicas de recolección de datos. Con los datos obtenidos de las diferentes investigaciones se procedió a hacer el análisis de la variación de las propiedades mecánicas entre las mezclas asfálticas tibias y las mezclas asfálticas en caliente con lo cual se concluye que la variación promedio de las propiedades mecánicas superan el 15%.

Palabras clave: estabilidad, fluencia, relación estabilidad/fluencia, mezclas asfálticas tibias.

ABSTRACT

The purpose of this research was to analyze the variation in the mechanical behavior of warm asphalt mixtures produced with different technologies compared to hot asphalt mixtures. It began with the statement of the problem, here is the presentation and explanation of the current problematic reality, then the objectives are established which are to determine the variation of stability, variation of flucence and variation of the stability /flucence relation when using the technologies of warm asphalt mixes compared to hot asphalt mixes. Then the development of the theoretical framework is done, where the different materials used for the production of warm asphalt mixtures and hot asphalt mixtures as well as their characteristics and technical specifications are shown, the different technologies for the production of warm asphalt mixtures and the design are shown. of asphalt mixtures by the Marshall method.

Then the research methodology is developed, where the type of research, research method, research level, research design, population, sample design and data collection techniques are shown. With the data obtained from the different investigations, an analysis of the variation of the mechanical properties between the warm asphalt mixtures and the hot asphalt mixtures was carried out, with which it is concluded that the average variation of the mechanical properties exceed 5%.

Keywords: stability, flucence, stability /flucence relation, warm asphalt mixes.

INTRODUCCION

La presente investigación se enfocó al tema de las mezclas asfálticas tibias, el cual es una mezcla de asfáltica con menores temperaturas de producción y colocación que las mezclas asfálticas en caliente.

Para la producción de las mezclas asfálticas tibias se usan tres tipos de tecnologías las cuales son: por adición de aditivo químico, por adición de aditivo orgánico y por el proceso de espumado, en esta investigación se hizo el análisis de estas tres tecnologías las cuales permiten realizar la reducción de temperatura de la mezcla asfáltica. Los posibles beneficios de la reducción de temperatura de la mezcla asfáltica son: la reducción de emisiones de gases, menor energía de producción, reducción del envejecimiento prematuro del asfalto.

La investigación fue de importancia teórica, practica y social, ya que brinda información sobre las tecnologías de mezclas asfálticas tibias y sirve como base para futuras investigaciones, es un referente que ayuda a tomar decisiones técnicas y económicamente viable a proyectos donde las condiciones de clima sean de baja temperatura y en el cual se dificulte el uso de mezclas asfálticas en caliente, al reducir la temperatura de producción implica la reducción significativa de gases contaminantes al medio ambiente y dañino para los trabajadores.

El objetivo de la presente investigación es determinar el promedio de la variación de las propiedades mecánicas del ensayo Marshall al utilizar las tecnologías de mezclas asfálticas tibias respecto a las mezclas asfálticas en caliente.

La tesis contiene 7 capítulos : el capítulo I, se define el planteamiento del problema, así como los objetivos, justificación e importancia de estudio, limitaciones y viabilidad; capítulo II, se define el marco teórico, así como antecedentes de investigación; capítulo III, se define el sistema de hipótesis, así como las variables; capítulo IV, se define la metodología de investigación; capítulo V, se hace el desarrollo de la investigación, aquí se presentan las diferentes tecnologías de producción de mezclas asfálticas tibias; capítulo VI, se presentan las ventajas de las mezclas asfálticas tibias; capítulo VII, se hace la presentación y análisis de resultados de investigación, finalmente las conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción de la realidad de la problemática

Las mezclas asfálticas más usadas en el Perú en los pavimentos flexibles son las mezclas asfálticas en caliente. Dichas mezclas tienen una composición de agregados gruesos, agregados finos, polvo mineral y cemento asfáltico, los cuales son calentados y mezclados en proporciones exactas dependiendo del diseño en una planta de mezcla asfáltica en caliente, este tipo de mezcla asfáltica presenta buena estabilidad, alta durabilidad, resistencia a la fatiga, resistencia al deslizamiento y la apertura rápida al tráfico.

En el medio también existen las mezclas asfálticas en frío, para la elaboración de este tipo de mezcla se utiliza la emulsión asfáltica, motivo por el cual puede ser elaborado a temperatura ambiente. Esta mezcla asfáltica tiene como característica la trabajabilidad que puede permanecer por semanas luego de su elaboración además de poder ser almacenada; pero, presenta la desventaja de su poca capacidad para soportar un tráfico pesado y se necesita mayor tiempo para la apertura al tráfico.

El cemento asfáltico es oxidado por el oxígeno que se encuentra en el aire y por las altas temperaturas a las cuales son elevadas durante el proceso de producción de mezclas asfálticas en caliente, esto con la finalidad de producir una mezcla homogénea, pero a su vez estas altas temperaturas de producción generan el envejecimiento prematuro del asfalto como consecuencia de la volatilización de los máltenos.

Típicamente la producción y aplicación de mezclas en caliente requiere que los materiales se calienten entre 135°C y 180°C. Permitiendo que el fenómeno de envejecimiento inicie en forma inmediata, y posteriormente, es inducido por los diversos factores climáticos que inciden en los pavimentos. Por lo tanto, para conseguir carpetas asfálticas con una mayor durabilidad se debe considerar el efecto del cambio en la composición química del cemento asfáltico en el proceso de mezclado en caliente y durante el tiempo de servicio. Para incluir este efecto antes que nada es necesario estudiar el fenómeno de oxidación del asfalto, ya que de hecho son las características de oxidación del ligante del petróleo las que

condicionan el comportamiento y durabilidad del pavimento después de su elaboración, así como la composición química inicial. (Vargas & Reyes, 2009)

La producción de mezcla asfáltica en caliente a estas temperaturas utiliza un gran consumo de combustible que influye en los costos de producción, además de una elevada emisión de gases contaminantes al medio ambiente y provocando daños a la salud de los trabajadores.

La diversificación climatológica en el Perú presenta un gran número de microclimas entre zonas de muy alta temperatura y muy bajas temperaturas, siendo estas últimas las zonas donde se presentan dificultades al momento de la colocación de las mezclas asfálticas convencionales. Los problemas más frecuentes en los climas fríos es poder alcanzar el grado de compactación que requiere las especificaciones del proyecto.

Las mezclas asfálticas en caliente presentan dificultades en climas de bajas temperaturas desde la producción en planta hasta el momento de compactación en obra, debido a la velocidad de cambio de temperatura, este problema se agudiza si existen distancias muy largas para el transporte de la mezcla asfáltica en caliente desde planta hacia la obra.

1.2 Formulación del Problema

1.2.1 Problema principal

¿Cuál es el rango de variación las propiedades mecánicas obtenidos del ensayo Marshall entre las mezclas asfálticas tibias producidas con diferentes tecnologías respecto a las mezclas asfálticas en caliente?

1.2.2 Problemas secundarios

a) ¿Cuál es el rango de variación de la estabilidad Marshall entre las mezclas asfálticas tibias producidas con diferentes tecnologías respecto a las mezclas asfálticas en caliente?

b) ¿Cuál es el rango de variación de la fluencia Marshall entre las mezclas asfálticas tibias producidas con diferentes tecnologías respecto a las mezclas asfálticas en caliente?

- c) ¿Cuál es el rango variación de la relación estabilidad/fluencia entre las mezclas asfálticas tibias producidas con diferentes tecnologías respecto a las mezclas asfálticas en caliente?

1.3 Objetivo de la Investigación

1.3.1 Objetivo principal

Tomando datos de investigaciones anteriores y haciendo un análisis estadístico, determinar el rango de variación de las propiedades mecánicas obtenidas del ensayo Marshall entre las mezclas asfálticas tibias producidas con diferentes tecnologías respecto a las mezclas asfálticas en caliente.

1.3.2 Objetivo secundario

- a) Determinar el rango de variación de la estabilidad Marshall entre las mezclas asfálticas tibias producidas con diferentes tecnologías respecto a las mezclas asfálticas en caliente.
- b) Determinar el rango de variación de la fluencia Marshall entre las mezclas asfálticas tibias producidas con diferentes tecnologías respecto a las mezclas asfálticas en caliente.
- c) Determinar el rango de variación de la relación estabilidad/flujo entre las mezclas asfálticas tibias producidas con diferentes tecnologías respecto a las mezclas asfálticas en caliente.

1.4 Justificación e importancia del estudio

1.4.1 Importancia

Teórica: la presente investigación brindará información sobre las ventajas y desventajas del uso de las mezclas asfálticas tibias, además servirá de base para investigaciones futuras.

Práctica: Esta investigación servirá como referente que ayude a tomar una decisión técnica y económicamente viable a proyectos en el que las condiciones de clima sean de baja temperatura y en el cual se dificulte el uso mezclas asfálticas en caliente.

Social: El uso de mezclas asfálticas tibias implica la reducción de temperatura de producción, el cual influye significativamente en la reducción de gases

contaminantes al medio ambiente y en la salud del trabajador tanto en el proceso de producción y colocación de la mezcla asfáltica.

1.4.2 Justificación

Actualmente se han desarrollado nuevas tecnologías de mezclas asfálticas en el mundo, una de ellas son las mezclas asfálticas tibias, la cual tiene una temperatura de producción que oscila entre 120°C a 140°C permitiendo de esta manera la reducción significativa del envejecimiento prematuro del asfalto. La producción de mezclas asfálticas a estas temperaturas influye en la reducción de costos de producción por un menor consumo de combustible, así como un menor desgaste de piezas de la planta de producción de mezclas asfálticas, el trabajar a estas temperaturas de producción permite la reducción de emisión de gases contaminantes al medio ambiente y reducción del riesgo de exposición de los trabajadores.

Las mezclas asfálticas tibias permiten una mayor ventana de tiempo entre el proceso de producción y compactación, por la menor velocidad de cambio de temperatura en comparación a las mezclas asfálticas en caliente sin perder trabajabilidad por temperatura y usando una menor energía de compactación, estas nuevas tecnologías reducen la segregación térmica, así como también permite una apertura temprana al tránsito, por estas razones las mezclas asfálticas tibias pueden presentar un mayor beneficio para obras de pavimentación en climas fríos.

1.5 Limitaciones de la investigación

Espacial: La información recolectada para la presente investigación se obtuvo de una base de datos virtual y se procesara para la obtención de resultados teóricos. Dentro de la información se contará con investigaciones internacionales como nacionales, dando mayor énfasis a datos basados a nuestra realidad.

Temporal: El estudio se llevará a cabo entre los meses de junio y diciembre del 2020.

Temática: Para la presente investigación se recolectará los datos de investigaciones nacionales e internacionales y se realizará el análisis de las ventajas y desventajas de los mismos.

1.6 Viabilidad

Este plan de tesis es viable por los siguiente:

- Se tendrá investigaciones pasadas sobre el tema que servirá como fuente de información para la realización de la tesis.
- Las investigaciones existentes relacionadas con el tema son virtuales, de acceso público y de fuentes confiables.
- Contaremos con la asesoría y seguimiento de un especialista que nos guiara en todo el proceso de la investigación.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la investigación

2.1.1 Investigaciones Nacionales

(Flores Gonzales & Rojas Pardo , 2019) La finalidad de esta investigación fue el análisis del comportamiento de mezclas asfálticas tibias al adicionar tensoactivos, Zycotherm y Quimibond 3000, en relación a las mezclas asfálticas calientes. Se empezó con planteamiento de problema, en el cual se explica la realidad problemática al hacer uso de las mezclas asfálticas en caliente, posteriormente se establecieron los objetivos los cuales son la calidad de agregados pétreos, la proporción para el uso de tensoactivos, temperatura para la compactación y el diseño de mezclas asfálticas por el método de Marshall. Seguidamente, se desarrollaron los fundamentos teóricos de los materiales a utilizar para la producción de las mezclas asfálticas, el diseño de las mezclas asfálticas tibias y calientes. Se hace mención a la temperatura de compactación al hacer el diseño de mezclas asfálticas para de esta manera establecer los beneficios de las mezclas asfálticas tibias en relación a las mezclas asfálticas en caliente. Posteriormente, se mostró el procedimiento que se seguiría a las mezclas asfálticas estudiadas, en el cual son mencionados la relación de ensayos de laboratorio que se llevaran a cabo con el fin de cumplir los objetivos planteados. Se hizo el análisis de los resultados y se compararon los parámetros de comportamiento de las mezclas asfálticas tibias y mezclas asfálticas en caliente, los cuales están establecidos en el EG-2013, luego se determinó los beneficios de las mezclas asfálticas tibias usando tensoactivos en relación a las mezclas asfálticas calientes.

(Valeriano Turpo & Catacora Mendoza, 2017) En esta investigación se hace el diseño de Mezcla Asfáltica Tibia, con el fin de reducir la temperatura con principal énfasis en la etapa de producción de la Mezcla Asfáltica, incorporando la Zeolita Natural. En la presente investigación se hizo el análisis del comportamiento de la Mezcla Asfáltica Tibia incorporando la Zeolita Natural Clinoptilolita, también las ventajas económicas y ambientales respecto a las Mezclas Asfálticas Calientes. Para este fin se hizo uso de la metodología Marshall y el análisis comparativo, en porcentajes de 1%, 2% y 3% de Zeolita

Natural Clinoptilolita como filler y 5.5%, 6.0%, 6.5%, 7.0%, 7.5%, 8% de contenido de cemento asfáltico, del cual se obtiene un mejor resultado del gráfico Marshall un diseño convencional de Mezcla Asfáltica(100 °C y 140 °C) con 6.6% de óptimo contenido de cemento asfáltico y 6.8% de óptimo contenido de asfalto para la Mezcla Asfáltica Tibia con la adición de 2% de Zeolita como filler. El resultado que se obtuvo dio muestra que la Mezcla Asfáltica Modificada con 2% de Zeolita presenta un comportamiento mecánico superior a la mezcla asfáltica convencional de 100°C; e inferior a la Mezcla Asfáltica Convencional de 140°C. Respecto a los beneficios para el medio ambiente hay una disminución del dióxido de carbono(CO₂) en 24.25% en comparación con las Mezclas Asfálticas Convencionales a 100°C y en 67.54% en comparación a las Mezclas Asfálticas Convencionales a 140°C; también existe un ahorro de combustible y reducción en los costos durante el proceso de producción de 2.95% en relación a las Mezclas Asfálticas Convencionales a 100°C y en 3.77% en relación a las Mezclas asfálticas Convencionales a 140°C.

(Mamani Mamani, 2018) El autor afirma que la mezcla asfáltica convencional tiene un mejor desempeño con respecto a las mezclas asfálticas frías, pero estas poseen un problema como el envejecimiento prematuro del cemento asfáltico en la producción de las mismas. Caso contrario pasa con las mezclas asfálticas tibias, estas tienen similar desempeño y comportamiento que las mezclas asfálticas en caliente, pero con una temperatura de mezcla y compactación inferior de 20 °C a 30 °C, lo cual hace que disminuye el problema de envejecimiento prematuro.

La investigación hace la evaluación de la zeolita natural en el proceso de espumado, usa 0.3%, 06% y 0.9% del peso de la mezcla y logra reducir la temperatura de mezclado y compactación e indica que no existe variaciones significativas en el desempeño de la mezcla asfáltica.

La conclusión de la investigación dio como resultado que la modificación de la mezcla asfáltica con la adición de la zeolita natural no incide significativamente en su comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica, no incide en su estabilidad y fluencia Marshall.

2.1.2 Investigaciones Internacionales

(Lesme Brun, 2015) La tesis menciona que la producción de mezclas asfálticas, se realiza a través de un proceso donde las temperaturas de trabajo son entre 160°C y 180°C tanto para los agregados como el asfalto. Estas altas temperaturas son necesarias debido a que la viscosidad del cemento asfáltico así lo requiere, logrando así una homogenización de la mezcla agregado-asfalto. El aumento de los costos energéticos y una regulación más estricta de las emisiones han originado el desarrollo de diferentes técnicas de producción de mezclas utilizando temperaturas menores. El mayor desafío que tienen las mezclas asfálticas producidas a menor temperatura es no afectar las propiedades mecánicas y el desempeño respecto a las mezclas asfálticas en caliente. A estas nuevas mezclas se les denomina Mezclas Asfálticas Templadas o Mezclas Asfálticas Tibias. Se han desarrollado diversas técnicas de producción de Mezclas Asfálticas Tibias, siguiente investigación realiza una técnica en la cual usa una Emulsión Asfáltica Super-Estabilizada (ESE) la cual permite reducir la temperatura de mezclado a 100°C-110°C.

(Rodríguez Rojas & Sanchez Morales, 2016) Los autores mencionan que altos grados de contaminación han cobrado gran interés de generar soluciones en los diferentes ámbitos, de aquí parte el desarrollo de generar nuevas tecnologías para la producción de mezclas asfálticas en el mundo. Esta razón es por la cual se centra esta investigación, en igualar y/o mejorar las propiedades mecánicas de estabilidad y fluencia de las mezclas asfálticas convencionales utilizadas hasta el momento y transformarlas en mezclas asfálticas tibias que sean beneficiosas para el medio ambiente, para salud y para la economía.

Por lo ya mencionado, es importante encontrar una técnica adecuada que permita mitigar tanto los impactos negativos como los costos de producción, originando así las mezclas asfálticas tibias como alternativa, además de ello generar ahorro durante las operaciones de mezclado y compactación.

Una vez conocida esta tecnología surgen una variedad de inconvenientes que para Colombia se manifiesta en la poca investigación sobre el tema, por consiguiente, su implementación aún no ha sido posible. Además, no existe en

el país especificaciones sobre el tema para la caracterización y control de proceso de fabricación y construcción de mezclas asfálticas tibias.

(Castro Mariño, 2017) El autor menciona que en los últimos años el estudio de las mezclas asfálticas tibias ha sido un campo de estudio que ha tenido un crecimiento de gran importancia. Continuando con la misma línea de estudio, se realiza el proyecto de investigación donde se evalúa y se compara la capacidad estructural de una mezcla asfáltica en caliente respecto a mezclas asfálticas tibias producidos con modificadores de viscosidad.

Para la realización de la investigación se usaron dos tipos de aditivos, el primer aditivo es una poliamida llamado KAOMIN KW y el segundo aditivo es una ceramida que proviene del cebo de vacuno llamado GENAMIN BTA, estas ceras son incluidos al cemento asfáltico por vía húmeda con 2 porcentajes por cada tipo de aditivo.

Se realizaron 4 tipos de mezclas asfálticas tibias con aditivos modificadores de viscosidad, se modifica el cemento asfáltico con 2% y 3% por cada tipo de cera, para caracterizar al cemento asfáltico se realizan ensayos de ductilidad, penetración, punto de ablandamiento y viscosidad, además se realiza el ensayo Marshall para determinar el porcentaje óptimo de cemento asfáltico por cada mezcla y medir los valores de estabilidad y flujo.

2.2 Agregados

2.2.1 Definición

Los agregados pétreos también conocidos como inertes o áridos son utilizados en la combinación con el asfalto para la producción de la mezcla asfáltica, según requerimiento. Es importante mencionar que los agregados pétreos utilizado en la elaboración de la mezcla asfáltica conforman entre 90% y 95% en peso de la mezcla asfáltica; por ende, que la calidad de estos agregados influye en gran magnitud en las propiedades de la mezcla asfáltica. En la carpeta asfáltica los agregados pétreos es de gran importancia ya que proporciona estabilidad mecánica, permite el soporte de tráfico y se encarga de transmitir las cargas hacia las capas inferiores de la estructura del pavimento.

2.2.2 Clasificación de los agregados por su tamaño

Agregado grueso: Es todo material que es retenido en el Tamiz N.º 4. Este material se obtiene de la de la desintegración de rocas, trituración de gravas y escoria.

Agregado fino: Es aquel material que pasa el Tamiz N.º 4 y es retenido en el Tamiz N.º 200. Este material se obtiene en los bancos de ríos, bancos de mar, bancos de dunas y en residuos de gravas o escorias trituradas.

Material de relleno o filler: Es el material que pasa el tamiz N.º 200 y que tiene como característica el ser no plástico. Este material se obtiene del polvo de piedra caliza, de roca, de pizarra, de sílices, por sedimentación natural, cemento portland, entre otros.

2.2.3 Propiedades de los agregados

- Granulometría

Según la especificación técnica de cada mezcla, los agregados tienen que estar distribuidos en diferentes porcentajes según el tamaño de partículas, de tal manera que estén dentro de un margen de distribución.

- Tamaño Máximo de Partículas

Según cada especificación el tamaño de partículas debe ser determinado.

Para designar los tamaños máximos se presentan las siguientes formas:

- Tamaño máximo nominal de partículas

En una serie de tamices, se define como el tamaño máximo nominal de partículas al siguiente tamiz más grande que el primer tamiz que retiene más del 10% del agregado.

- Tamaño máximo de partículas

En una serie de tamices, se define como tamaño máximo de partículas, a un tamiz más grande al tamaño máximo nominal de partículas.

- Textura Superficial

La textura de las partículas del agregado es de gran importancia ya que esta influye en la trabajabilidad y la resistencia de la mezcla asfáltica, influye también en la resistencia al deslizamiento en la carpeta asfáltica. La textura áspera, aumenta la resistencia al deslizamiento entre las partículas de agregado, tienen una mejor adherencia con el asfalto, aumenta la fricción superficial de la carpeta de rodadura de tal manera que el tránsito de vehículos sea más seguro.

- Limpieza

Según especificación, existen límites para los materiales indeseables como: vegetación, terrones, arcillas, entre otros.

- Capacidad de Absorción

Es importante saber cuál es la capacidad de absorción de agua o de asfalto de los agregados ya que, si el agregado es muy absorbente, este seguirá absorbiendo asfalto después del proceso de producción, de esta manera disminuyendo el contenido de asfalto en la superficie del agregado. Por lo anterior, un agregado muy poroso y altamente absorbente requiere cantidades más grandes de asfalto que un agregado menos poroso.

- Dureza

Es la resistencia que presentan los agregados a los efectos de abrasión e intemperie durante los procesos de producción, colocación compactación y durante su vida útil.

- Afinidad con el Asfalto

Esta propiedad se refiere a la tendencia de aceptación y retención de asfalto presenta agregado.

Los agregados que tienen alta afinidad con el asfalto son los llamados hidrofóbicos (repelen el agua), estos agregados tienen la capacidad de resistir los esfuerzos transmitidos por el agua para separar el asfalto de la superficie del agregado.

Los agregados que tienen baja afinidad con el asfalto son los llamados hidrófilos (atraen el agua); por ello, estos agregados en presencia del agua tienden a separarse de las películas de asfalto.

- Forma de la Partícula

Durante el proceso de colocación la trabajabilidad de la mezcla asfáltica es afectada por la forma de las partículas del agregado, la forma de las partículas influyen también en la cantidad de energía para la compactación, así como la resistencia de la carpeta asfáltica durante su vida útil.

Las partículas que tienen formas angulares e irregulares generalmente son resistentes al desplazamiento en la carpeta asfáltica, ya que estas partículas tienen la tendencia a entrelazarse al momento de la compactación.

- Peso Especifico

El peso específico o gravedad específica es la proporción en peso de un volumen de agregado y el peso de agua que tiene un volumen igual al del agregado. El peso específico es una manera de caracterizar el peso y el volumen de los agregados. Esta propiedad es de gran importancia durante el proceso de producción de la mezcla asfáltica ya que el agregado y el asfalto son adicionados a la mezcla, según su peso.

2.2.4 Ensayos realizados a los agregados

Los ensayos que se realizan a los agregados pétreos son de gran importancia para el control de calidad antes del diseño y verificar si cumplen con los requisitos mínimos que indica en la norma según diseño, ya que la calidad de los agregados influye significativamente en las propiedades de las mezclas asfálticas.

- Análisis granulométrico (AASHTO T27 y ASTM C136)

Existen dos métodos para el análisis granulométrico

Tamizado por vía seca: En este método se tiene que agitar una cantidad de agregados secos sobre una serie de tamices de abertura cuadrada ordenados sucesivamente según el tamaño de abertura de tal manera que el de mayor abertura se encuentra en la parte superior y el de menor abertura en la parte

inferior, se toma los pesos del material retenido en los tamices y se hace una expresión porcentual de estos pesos con relación al peso total de la muestra, seguidamente se hace un gráfico de porcentajes en peso de material que pasa por los diferentes tamices. Estas curvas son una herramienta que nos brinda una rápida idea de las características granulométricas de los agregados.

Análisis granulométrico por vía húmeda: Este método nos sirve para determinar por vía húmeda la forma como está distribuido los agregados finos y agregados gruesos. Este método es usado cuando el agregado presenta polvo muy finos o arcilla que pueden adherirse a las partículas más gruesas.

- Equivalente de arena (AASHTO T176)

Con este ensayo obtenemos la proporción de arcilla o polvo fino contenidos en los agregados, los cuales resultan perjudiciales para la mezcla asfáltica. Este ensayo se aplica a la fracción de agregado que pasa la malla N° 4.

La muestra de agregado es colocada sobre una probeta graduada transparente el cual contiene solución de cloruro cálcico, formaldehído en agua y glicerina. Se hace el agitado de la muestra y la solución. Esta misma solución se utiliza para impulsar la arcilla hacia la parte superior, de esta manera se hace salir de la probeta conforme se llena la probeta, usando un tubo se introduce con presión hacia el fondo. Luego de un tiempo de 20 minutos para la sedimentación, se realiza en el la lectura en el recipiente de la máxima de la suspensión de arcilla. Seguidamente se introduce en la probeta un disco metálico que se ubica en la parte superior de la arena limpia y se toma la lectura de la altura de la cara inferior del disco metálico.

Se le llama Equivalente de Arena a la relación entre la lectura en la parte superior de la arena limpia y la que corresponde a la capa inferior de la arcilla multiplicada por 100.

- Abrasión (AASHTO T96 y ASTM C131)

Este ensayo es empleado para hacer la medición de la resistencia de los agregados a la abrasión o desgaste, el cual nos indica el comportamiento que tendrá el agregado al estar sometido a tráfico. Para este ensayo se utiliza la

máquina de desgaste “Los Ángeles”. El tambor es cargado con una cantidad fija de grava, piedra chancada o escoria con una graduación específica; así como las esferas de acero con un peso normado, las cuales actuarán como carga de abrasión. Seguidamente el tambor es sometido a 500 vueltas, a continuación, se retira el material del tambor y se define el porcentaje de desgaste el cual es el material que pasa por el tamiz N.º 12.

Un bajo porcentaje por pérdida de abrasión, nos indica que el agregado tiene una elevada resistencia al desgaste, el cual es una característica que desea para la producción de mezclas asfálticas.

- Peso específico (AASHTO T85 y ASTM C127)

La determinación del peso específico se da por las siguientes razones:

Para poder realizar el cálculo de huecos de la mezcla asfáltica compactada.

Para la corrección de la cantidad de agregados usados en una mezcla asfáltica cuando el peso específico presenta una gran variación.

El peso específico se define como la relación del peso en el aire de cierta cantidad de agregado y el peso en el aire del agua destilada que tenga el mismo volumen del agregado dado a la misma temperatura. El peso específico se determina pesando la muestra de agregado en el aire y luego en el agua. El peso de un volumen igual de agua es la diferencia de los dos pesos del agregado tanto en el aire como en el agua.

Existen tres tipos de pesos específicos de los agregados: peso específico aparente, peso específico aparente con agregado saturado y peso específico efectivo.

El grado en que el asfalto penetra sobre los huecos permeables al agua influye en el peso específico aparente del agregado en una mezcla asfáltica. El asfalto a tener una mayor viscosidad que el agua, por lo general penetrará sobre los huecos en menor medida que el agua. Es por esta razón que utiliza el término de peso específico efectivo con el fin de indicar la proporción en que el agregado es impermeable al asfalto usado en la mezcla asfáltica.

- Peso unitario (AASHTO T19 y ASTM C29)

La determinación de peso unitario puede darse sobre un volumen suelto o un volumen compactado. Para dicho propósito se emplea un recipiente de forma cilíndrica con un volumen conocido de 2.83, 14.16, 28.31 litros, dependiendo del tamaño del agregado ensayado. Para medir el peso unitario con agregado suelto se tiene que llenar el recipiente y se pasa a determinar el peso del agregado contenido en el recipiente lleno. Para medir el peso específico compactado se procede a llenar el recipiente en tres capas iguales, se aplica a cada capa ciertos procedimientos para agitar o apisonar, esto dependiendo del tamaño del agregado.

- Humedad

Para determinar la humedad de los agregados se pesa una muestra de material, se hace el secado en una estufa durante 30 minutos hasta alcanzar un peso constante mantenida aproximadamente a 110C, y se determina posteriormente el peso de la muestra seca. La pérdida de humedad está definida como la diferencia entre el peso inicial y el peso final de la muestra. El contenido de humedad del agregado es la pérdida de peso expresada como porcentaje del peso final.

2.2.5 Especificaciones técnicas de los agregados

Los agregados pétreos empleados para la ejecución de cualquier tratamiento o mezcla bituminosa deberán poseer una naturaleza tal que, al aplicársele una capa del material asfáltico, ésta no se desprenda por la acción del agua y del tránsito. Sólo se admitirá el empleo de agregados con características hidrófilas, si se añade algún aditivo de comprobada eficacia para proporcionar una adecuada adherencia. Para efecto de las presentes especificaciones, se denominará agregado grueso a la porción de agregado retenido en el tamiz de 4,75 mm (N.º 4); agregado fino a la porción comprendida entre los tamices de 4,75 mm y 75 µm (N.º 4 y N.º 200) y polvo mineral o llenante la que pase el tamiz de 75 µm (N.º 200). El agregado grueso deberá proceder de la trituración de roca o de grava o por una combinación de ambas; sus fragmentos deberán ser limpios, resistentes y durables, sin exceso de partículas planas, alargadas, blandas o desintegrables.

Estará exento de polvo, tierra, terrones de arcilla u otras sustancias objetables que puedan impedir la adhesión con el asfalto. Sus requisitos básicos de calidad se presentan en cada especificación. El agregado fino estará constituido por arena de trituración o una mezcla de ella con arena natural. La proporción admisible de esta última será establecida en el diseño aprobado correspondiente. Los granos del agregado fino deberán ser duros, limpios y de superficie rugosa y angular. El material deberá estar libre de cualquier sustancia, que impida la adhesión con el asfalto y deberá satisfacer los requisitos de calidad indicados en cada especificación. El polvo mineral o llenante provendrá de los procesos de trituración de los agregados pétreos o podrá ser de aporte de productos comerciales, generalmente cal hidratada o cemento portland. Podrá usarse una fracción del material proveniente de la clasificación, siempre que se verifique que no tenga actividad y que sea no plástico. Su peso unitario aparente, determinado por la norma de ensayo MTC E 205, deberá encontrarse entre 0,5 y 0,8 g/cm³ y su coeficiente de emulsibilidad (NLT 180) deberá ser inferior a 0,6. La mezcla de los agregados grueso y fino y el polvo mineral deberá ajustarse a las exigencias de la respectiva especificación, en cuanto a su granulometría. (EG-MTC, 2013)

Tabla 1: Especificaciones técnicas del agregado fino

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

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

- La adherencia del agregado fino para zonas mayores a 3000 msnm será evaluada mediante la performance de la mezcla, Subsección 430.02.

Fuente: MTC (2013)

Tabla 2: Especificaciones técnicas del agregado grueso

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

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

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

Fuente: MTC (2013)

Tabla 3: Granulometría para las mezclas asfálticas en caliente

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

Fuente: MTC (2013)

2.3 Filler

2.3.1 Definición

Es el material que pasa por el tamiz N.º 200 y que tiene como característica ser no plástico, este filler utilizado para la elaboración de mezclas asfálticas es un material que tiene la finalidad de ser el complemento de la granulometría del agregado fino que no cumplen con las especificaciones según requerimiento.

2.3.2 Materiales utilizados

Se puede usar como filler al cemento portland, cal hidratada, polvo de escoria, polvo de roca, ceniza fina o loes.

2.3.3 Características deseables del filler

- Finura

El filler al ocupar los espacios libres entre las partículas del agregado luego de ser compactada, disminuye el volumen de vacíos de la mezcla asfáltica de esta manera evitando un elevado porcentaje de asfalto.

El filler cumple con su función de relleno, esto depende del volumen de vacíos que existe una vez compactado la estructura granular y en relación a su granulometría y de las partículas de mayor tamaño.

- Modificación del Comportamiento Reológico

La utilización de filler, aumenta la resistencia a la deformación de la mezcla asfáltica, esto sin alterar la viscosidad del asfalto, de esta manera se genera una mayor resistencia al corte de las mezclas asfálticas.

- Acción estabilizante frente al agua

Debido a la reducción de la porosidad de la mezcla asfáltica se evita que el agua acceda al interior de la estructura granular, lo cual produce un incremento de durabilidad de la mezcla asfáltica frente a la acción del agua, además ya que algunos polvos minerales tienen una mayor afinidad con el asfalto, aumentan la resistencia al desplazamiento que ejerce el agua al asfalto.

2.4 Cemento asfáltico

2.4.1 Definición

Es un material bituminoso aglomerante, obtenido por la refinación del petróleo. Tiene un color marrón oscuro a negro compuesto casi en su totalidad de bitumen. Usado principalmente en la pavimentación de carreteras. Con

característica viscosa y consistencia entre sólido a semisólido cuando se expone a temperaturas ambientales. En temperaturas elevadas se ablanda y se vuelve líquido lo cual permite envolver en su totalidad a los agregados durante el proceso de producción. Su principal función en las mezclas asfálticas es de ligante de los agregados e impermeabilización contra la humedad.

En Perú tenemos los siguientes tipos de cementos asfálticos:

Tabla 4: Tipos de Cemento Asfáltico, MTC (2013)

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

Fuente: MTC (2013)

2.4.2 Propiedades del cemento asfáltico

El cemento asfáltico se puede dividir por su composición y propiedades físicas. La fabricación de los pavimentos utiliza generalmente las propiedades físicas para su caracterización del comportamiento a pesar que éstas son directamente un resultado de su composición química. (Flores Gonzales & Rojas Pardo , 2019).

Entre las propiedades del cemento asfáltico encontramos los siguientes:

- Durabilidad

La durabilidad es una medida de cómo cambia el asfalto con el tiempo y sus propiedades físicas, a veces se le denomina endurecimiento por envejecimiento; el envejecimiento ocurre a veces por someter al cemento asfáltico en altas temperaturas. En general cuando un asfalto envejece, su viscosidad aumenta, se pone rígido y quebradizo. (Flores Gonzales & Rojas Pardo , 2019)

- Susceptibilidad térmica

Es la variación de la consistencia de los asfaltos debido a los cambios de temperatura. El incremento de la temperatura de un asfalto genera transformaciones reológicas de suma importancia en el mismo, que son de utilidad a la hora de ponerlos en obra. La susceptibilidad térmica debe ser la más baja posible para la gama de temperatura de un servicio, sin llegar a ser un sólido quebradizo a temperaturas frías o un líquido relativamente viscoso a temperaturas elevadas. (Flores Gonzales & Rojas Pardo , 2019)

- Adhesividad con el agregado

Este concepto científico se ha sustituido por el de adhesión mecánica: fuerza por unidad de superficie para romper la unión árido-ligante. EL contacto del asfalto y el agregado ha de ser lo más perfecto posible, sin interposición de materias extrañas, lo que implica que el árido este limpio y seco. Sin embargo, la adhesividad-adhesión del ligante al árido en presencia del agua no es una propiedad exclusiva del ligante, sino que depende del conjunto árido-ligante: un mismo ligante presentara buena o mala adhesividad según el tipo o condiciones del árido utilizado, por ello, para su estudio debe tomarse en cuenta el conjunto árido-ligante -agua. (Flores Gonzales & Rojas Pardo , 2019)

- Ductilidad

Es la capacidad que posee un asfalto de deformarse por alargamiento sin que su masa se disgregue. La ductilidad de un asfalto se mide por el alargamiento en centímetros hasta rotura que puede soportar una probeta sometida a un ensayo de tracción con velocidad de deformación de 5 cm/min y temperatura a 25°C. Para un material asfáltico la ductilidad es mayor cuanto mayor es la temperatura a la que se somete, y para materiales diferentes la ductilidad crece con la penetración y disminuye con la viscosidad del producto. (Flores Gonzales & Rojas Pardo , 2019)

- Comportamiento reológico

La reología es la ciencia que estudia la fluencia y deformación de la materia. La importancia de la reología es que permite caracterizar de forma más completa el comportamiento del asfalto, ya que al ser un material viscoelástico su comportamiento depende de la temperatura, el tiempo de carga y el envejecimiento (debido a la oxidación y pérdida de volátiles). (Bonilla Miranda, 2013)

- Pureza

Un cemento asfáltico que contiene impurezas o presencia de agua, debido al transporte de este material en los camiones cisternas a las plantas productoras, esto afecta la adhesión del agregado con el ligante durante la etapa de mezclado en la planta de producción. Es por esta razón que se debe garantizar que el cemento asfáltico utilizado en la mezcla asfáltica sea en su totalidad bitumen (homogéneo), sin contenido de agua y si hay presencia de impurezas estas sean inertes e insolubles. (Bonilla Miranda, 2013)

2.4.3 Ensayos realizados al cemento asfáltico

- Viscosidad absoluta (ASTM D2171)

La viscosidad representa la resistencia al flujo en el viscosímetro que presenta el líquido, en este caso el asfalto AC-20 a la temperatura de ensayo. La viscosidad se presenta en unidades de Pa s. Este método solo es aplicable para materiales con viscosidades entre 0,0036 y 20000 Pa s (Fiallos, Martin Unda, 2018).

- Viscosidad cinemática (ASTM D2170)

La incidencia de la temperatura en el asfalto genera un cambio en su consistencia. La consistencia en función de su viscosidad determina la trabajabilidad con la que se puede efectuar una mezcla asfáltica. Es un parámetro físico que ha sido utilizado principalmente para determinar de manera aproximada, las temperaturas de fabricación de mezclas asfálticas y de extensión y compactación de dichas mezclas en el laboratorio.

- Punto de inflamación y combustión (ASTM D92)

Este ensayo resulta necesario para fines prácticos de seguridad puesto que los resultados que arroja permiten conocer la temperatura a la cual el bitumen podría entrar en combustión.

- Gravedad específica (ASTM D70-71)

Se define como gravedad específica a la relación que existe entre la masa de un volumen especificado de bitumen con la masa de un mismo volumen de agua a 25 °C.

- Índice de penetración (ASTM D5)

El índice de penetración nos permite conocer la consistencia del asfalto mediante la medición de la altura que penetra una aguja normalizada en una briqueta de bitumen de medidas estandarizadas.

- Ensayo para la determinación del punto de ablandamiento del asfalto (ASTM D36)

También conocido como el ensayo del anillo y bola, el resultado de este ensayo nos permite determinar dos cosas; asegura la uniformidad del asfalto durante su transporte, indicador de su tendencia al flujo en bajas temperaturas (Fiallos, Martin Unda, 2018).

- Ensayo para determinar el cambio de masa (ASTM D2872)

Este ensayo tiene como objetivo conocer los efectos que producen el aire y el calor en una película de pared delgada de asfalto en este caso, además permite conocer el cambio de masa que se produce en el bitumen al realizar la mezcla en caliente a 150 °C (American Society for Testing and Materials, 2019).

- Ensayo de ductilidad (ASTM D113-17)

Este método de prueba describe el procedimiento para determinar la ductilidad de un material de asfalto medido por la distancia a la que se alargará antes de romperse cuando dos extremos de una muestra de briquetas del material se separan a una velocidad especificada y a una temperatura especificada. A menos que se especifique lo contrario, el ensayo se realizará a una temperatura de 25 ± 0.5 ° C [77 ± 0.9 ° F] y con una velocidad de 5

cm / min 6 5.0%. A otras temperaturas, se debe especificar la velocidad (American Society for Testing and Materials, 2019).

2.4.4 Asfalto de la destilación del petróleo

El proceso de destilación consiste en exponer al petróleo a calor, cuyo objetivo separar a este en sus diversos componentes. Una de las formas de obtener sus diferentes componentes del petróleo es mediante la destilación fraccionada, la cual consiste en vaporizar el petróleo en un horno para llevarlas a una torre, donde el petróleo en estado gaseoso se condensa en distintas alturas. Debido a la densidad los gases más ligeros se sitúan en la parte superior mientras que los gases más pesados en la parte inferior como se muestra en la Figura. Entre los derivados del petróleo más importantes están el gas combustible, gasolina, aceites lubricantes y asfalto.

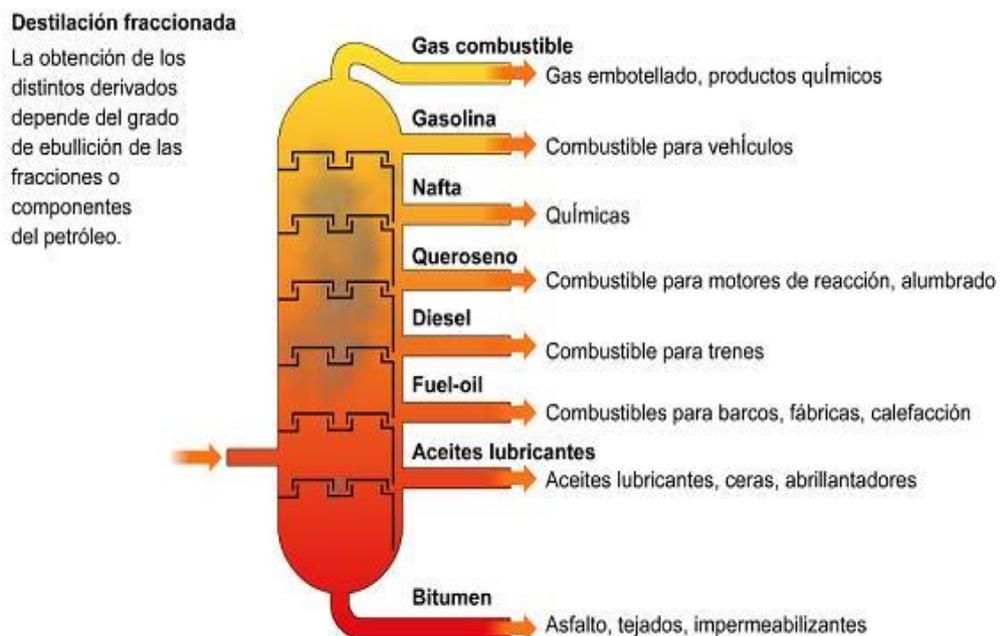


Figura 1: Destilación fraccionada del petróleo

Fuente: Eroski (2020)

2.4.5 Especificaciones técnicas del cemento asfáltico

En Perú las especificaciones técnicas del asfalto están clasificados por grado de penetración y viscosidad.

En la Tabla 5 se observa las especificaciones técnicas del cemento asfáltico clasificados por el grado de penetración.

Tabla 5: Especificaciones técnicas del cemento asfáltico clasificado por penetración

Tipo		Grado Penetración									
Grado	Ensayo	PEN 40-50		PEN 60-70		PEN 85-100		PEN 120-150		PEN 200-300	
		min	máx	min	máx	min	máx	min	máx	min	máx
Pruebas sobre el Material Bituminoso											
Penetración a 25°C, 100 g, 5 s, 0,1 mm	MTC E 304	40	50	60	70	85	100	120	150	200	300
Punto de Inflamación, °C	MTC E 312	232		232		232		218		177	
Ductilidad, 25°C, 5cm/min, cm	MTC E 306	100		100		100		100		100	
Solubilidad en Tricloro-etileno, %	MTC E 302	99,0		99,0		99,0		99,0		99,0	
Índice de Penetración (Susceptibilidad Térmica) ⁽¹⁾	MTC E 304	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1
Ensayo de la Mancha (Oliensies) ⁽²⁾											
Solvente Nafta - Estándar	AASHTO M 20	Negativo		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo	
Solvente Nafta - Xileno, %Xileno		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo	
Solvente Heptano - Xileno, %Xileno		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo	
Pruebas sobre la Película Delgada a 163°C, 3,2 mm, 5 h											
Pérdida de masa, %	ASTM D 1754		0,8		0,8		1,0		1,3		1,5
Penetración retenida después del ensayo de película fina, %	MTC E 304	55+		52+		47+		42+		37+	
Ductilidad del residuo a 25°C, 5 cm/min, cm ⁽³⁾	MTC E 306			50		75		100		100	

Fuente: MTC (2013)

En la Tabla 7 se observa las especificaciones técnicas del cemento asfáltico clasificados por viscosidad.

Tabla 6: Especificaciones técnicas del cemento asfáltico clasificado por viscosidad

Tabla 415-03
Especificaciones del cemento asfáltico clasificado por viscosidad

Características	Grado de Viscosidad				
	AC-2,5	AC-5	AC-10	AC-20	AC-40
Viscosidad Absoluta a 60°C, Poises	250±50	500±100	1.000±200	2.000±400	4.000±800
Viscosidad Cinemática, 135°C St mínimo	80	110	150	210	300
Penetración 25°C, 100gr, 5 s mínimo	200	120	70	40	20
Punto de Inflamación COC, °C mínimo	163	177	219	232	232
Solubilidad en tricloroetileno, % masa, mínimo	99	99	99	99	99
Pruebas sobre el residuo del ensayo de película fina					
➤ Viscosidad Absoluta, 60°C, Poises máximo	1.250	2.500	5.000	10.000	20.000
➤ Ductilidad, 25°C, 5cm/min, cm, mínimo	100	100	50	20	10
Ensayo de la Mancha (Oliensies) ⁽¹⁾					
Solvente Nafta - Estándar	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo
Solvente Nafta - Xileno, %Xileno	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo
Solvente Heptano - Xileno, %Xileno	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo

Fuente: MTC (2013)

2.5 Mezclas asfálticas en caliente.

En la tabla 7. Se muestra la clasificación general de las mezclas asfálticas.

Tabla 7: Clasificación de las mezclas asfálticas.

CLASIFICACION DE LAS MEZCLAS ASFATICAS	
PARAMETRO DE CLASIFICACION	TIPO DE MEZCLA
FRACCION DE AGREGADO	MASILLA ASFALTICA
	MORTERO ASFALTICO
	CONCRETO ASFALTICO
	MACADAM
TEMPERATURA	EN CALIENTE
	TIBIA
	EN FRIO
RELACION DE VACIOS	CERRADO O DENSA
	SEMI CERRADA O SEMIDENSA
	ABIERTAS
	POROSAS
TAMAÑO MAXIMO DEL AGREGADO	GRUESAS
	FINAS
ESTRUCTURA DEL AGREGADO	CON ESQUELETO MINERAL
	SIN ESQUELETO MINERAL
GRANULOMETRIA	CONTINUAS
	DISCONTINUAS

Fuente: Diseño de pavimentos – Saavedra (2011)

2.5.1 Definición

Existen una variedad de mezclas asfálticas, las más usadas en Perú son las mezclas asfálticas en caliente. Se define mezclas asfálticas en caliente a la combinación de agregados pétreos y un ligante asfáltico.

Según (Garnica Anguas, Flores Flores, Gómez López , & Delgado Alamilla, 2005) La mezcla asfáltica en caliente se tipifica así, porque tanto el agregado pétreo, como el asfalto, se calienta antes del mezclado; es un tipo de mezcla compuesta por un 93 a 97% de agregado pétreo y por un 3 a 7 % de asfalto, con respecto a la masa total de la mezcla

2.5.2 Propiedades de las mezclas asfálticas en caliente

La selección del tipo y granulometría del agregado a emplear, y de la selección del tipo y contenido de asfalto consiste en un buen diseño de mezcla asfáltica. De esta manera se obtendrá propiedades deseadas que cumplan con los

requisitos del proyecto. Las propiedades relevantes en una mezcla asfáltica en caliente son:

- Estabilidad o resistencia a las deformaciones plásticas.

Es la propiedad de la mezcla asfáltica para resistir la deformación y el desplazamiento originado a las cargas del tránsito vehicular. Se denomina un pavimento estable cuando este conserva su forma, en caso presenta deformaciones permanentes, corrugaciones y otros desplazamientos de la mezcla se le denomina inestable.

La fricción interna y la cohesión están relacionadas con la estabilidad. La primera depende de la textura superficial, forma de la partícula, granulometría del agregado, densidad de la mezcla y la cantidad y tipo del asfalto. Mientras que la segunda se incrementa con el aumento del contenido de asfalto, hasta llegar a un punto óptimo.

- Durabilidad

Es la capacidad para resistir efectos perjudiciales del aire, agua, temperatura y tránsito, estos agentes pueden provocar el envejecimiento del asfalto como la desintegración y desprendimiento de la película de asfalto del agregado. La mezcla asfáltica no debe sufrir envejecimiento excesivo durante la vida en servicio. La durabilidad está relacionada con el espesor de la película de asfalto y con los vacíos de aire.

- Flexibilidad

Es la capacidad de la mezcla asfáltica para amoldarse, sin sufrir agrietamiento o fisuración, a los asentamientos y movimientos graduales de la base y la subrasante. En ocasiones esta propiedad presenta conflictos con los requerimientos de estabilidad.

- Resistencia a la fatiga

Es la capacidad de la mezcla asfáltica para resistir cargas repetidas causadas por el paso de los vehículos. El agrietamiento por fatiga está relacionado con el contenido y la rigidez del asfalto. Por su parte, los contenidos de asfalto muy altos harán que la mezcla tienda más a deformarse elásticamente

(o a deformarse menos) que a fracturarse bajo carga repetida. Aunque también debe señalarse que la resistencia a la fatiga depende en gran medida de la relación entre el espesor estructural de la capa y la carga. (Garnica Anguas, Flores Flores, Gómez López , & Delgado Alamilla, 2005).

- Resistencia al fracturamiento por baja temperatura.

Las mezclas asfálticas tienden a agrietarse en condiciones de bajas temperaturas. Esta propiedad depende principalmente de la rigidez del asfalto.

- Resistencia al daño por humedad o impermeabilidad

Es la resistencia al paso de agua y aire hacia el interior, o a través de la mezcla asfáltica. La resistencia al daño por humedad se relaciona con las propiedades químicas del agregado mineral y el contenido de vacíos de aire en la mezcla compactada, y por tanto con los procesos de oxidación del asfalto, su adherencia y el drenaje del pavimento. (Garnica Anguas, Flores Flores, Gómez López , & Delgado Alamilla, 2005).

- Resistencia al deslizamiento

Es la capacidad de la mezcla asfáltica para no perder adherencia entre el neumático y la superficie de rodamiento, en particular cuando está húmeda. Una resistencia al deslizamiento baja se relaciona generalmente con las características del agregado y el contenido de asfalto. (Garnica Anguas, Flores Flores, Gómez López , & Delgado Alamilla, 2005).

- Trabajabilidad

Es la propiedad relacionada con la facilidad con que la mezcla asfáltica es colocada y compactada in situ. Una buena mezcla debe ser capaz de permitir su colocación y compactación, sin que se requiera un esfuerzo demasiado grande. Esta propiedad, generalmente depende de uno, o una combinación, de los siguientes factores: características del agregado, la granulometría, el contenido, y la viscosidad del asfalto. (Cepeda, 2002).

2.5.3 Especificaciones técnicas de las mezclas asfálticas en caliente

- Gradación

La gradación de los agregados pétreos para la producción de la mezcla asfáltica en caliente deberá ajustarse a alguna de las siguientes gradaciones. Además de los requisitos de calidad que debe tener el agregado grueso y, el material de la mezcla de los agregados debe estar libre de terrones de arcilla y se aceptará como máximo el 1% de partículas deleznable según ensayo. Tampoco deberá contener materia orgánica y otros materiales deletéreos. (EG-MTC, 2013)

Tabla 8: Gradación para mezcla asfáltica en caliente

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

Fuente: MTC (2013)

Tabla 9: Requisitos para mezcla de concreto bituminoso

Tabla 423-06
Requisitos para mezcla de concreto bituminoso

Parámetro de Diseño	Clase de Mezcla		
	A	B	C
Marshall MTC E 504			
1. Compactación, número de golpes por lado	75	50	35
2. Estabilidad (mínimo)	8,15 kN	5,44 kN	4,53 kN
3. Flujo 0,01" (0,25 mm)	8-14	8-16	8-20
4. Porcentaje de vacíos con aire (1) (MTC E 505)	3-5	3-5	3-5
5. Vacíos en el agregado mineral	Ver Tabla 423-10		
Inmersión – Compresión (MTC E 518)			
1. Resistencia a la compresión Mpa mín.	2,1	2,1	1,4
2. Resistencia retenida % (mín.)	75	75	75
Relación Polvo – Asfalto (2)	0,6-1,3	0,6-1,3	0,6-1,3
Relación Estabilidad/flujo (kg/cm) (3)	1.700-4.000		
Resistencia conservada en la prueba de tracción indirecta AASHTO T 283	80 Mín.		

- ⌘ A la fecha se tienen tramos efectuados en el Perú que tienen el rango 2% a 4% (es deseable que tienda al menor 2%) con resultados satisfactorios en climas fríos por encima de 3.000 m.s.n.m. que se recomienda en estos casos.
 - ⌘ Relación entre el porcentaje en peso del agregado más fino que el tamiz 0,075 mm y el contenido de asfalto efectivo, el porcentaje en peso del total de la mezcla.
 - ⌘ Para zonas de clima frío es deseable que la relación Est. /flujo sea de la menor magnitud posible.
 - ⌘ El Índice de Compactabilidad mínimo será 5.
- El Índice de Compactabilidad se define como: $\frac{1}{GEB\ 50 - GEB\ 5}$
- Siendo GEB50 y GEB5, las gravedades específicas bulk de las briquetas a 50 y 5 golpes.

Fuente: MTC (2013)

Tabla 10: Requisitos de adherencia

Ensayos	Norma	Requerimiento	
		< 3.000	> 3.000*
Adherencia (Agregado grueso)	MTC E 517	+95	-
Adherencia (Agregado fino)	MTC E 220	4 mín.**	-
Adherencia (mezcla)	MTC E 521	-	+95
Resistencia conservada en la prueba de tracción indirecta	AASHTO T 283	-	80 Mín.

Mayor a 3000 msnm y zonas húmedas ó lluviosas
* Grado inicial de desprendimiento

Fuente: MTC (2013)

Tabla 11: Vacíos mínimos en el agregado mineral (VMA)

Tabla 423-08
Vacíos mínimos en el agregado mineral (VMA)

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

Nota: Los valores de esta tabla serán seleccionados de acuerdo al tamaño máximo de las mezclas que se dan en la Subsección 423.02(c). Las tolerancias serán definidas puntualmente en función de las propiedades de los agregados.

Fuente: MTC (2013)

2.6 Mezclas asfálticas tibias

2.6.1 Introducción a las mezclas asfálticas tibias

Las mezclas asfálticas tibias son aquellas mezclas que se producen a menores temperaturas que las mezclas asfálticas en caliente, estas producciones están en el rango de 100 °C y 140°C. El proceso de producción involucra tecnologías nuevas con el fin de producir, colocar y compactar las mezclas asfálticas a temperaturas inferiores a las mezclas asfálticas en caliente.

Una mezcla asfáltica tibia puede definirse como la combinación proporcionada de agregados pétreos, llenante mineral y ligante asfáltico cuyo proceso de producción se encuentra en un rango de temperaturas de

100 °C a 135 °C. (Córdoba Maquilón , Senior Arrierta , & Johana Posada, 2020)

La mezcla asfáltica tibia como concepto surgió en Europa, por la necesidad de tener una mezcla asfáltica que sea más económica en cuanto a la energía y tuviera el mismo desempeño que tienen las mezclas asfálticas en caliente.

En el año 1956, el Profesor Ladis Csanyi de la Universidad del estado de Iowa, advirtió el potencial del asfalto espumado; el cual permitía emplear temperaturas más bajas en la preparación de la mezcla asfáltica. Desde entonces esta tecnología es aplicada exitosamente en muchos países europeos y americanos, según manifiesta (W. Button, Estakhri, & Wimsatt, 2007)

2.6.2 Antecedentes de mezclas asfálticas tibias

2.6.3 Antecedentes internacionales

Tabla 12: Antecedentes cronológicos en el trabajo con mezclas tibias.

AÑO	ANTECEDENTES
1995	En 1995, Shell y Kolo Viedekke, iniciaron un programa en conjunto, para el desarrollo de un producto, y del proceso para la fabricación de mezcla agregado - asfalto a temperaturas más bajas; obteniendo mejores propiedades o equivalentes condiciones de desempeño, con relación a las mezclas tradicionales en caliente.
1999-2001	Reportes iniciales de las tecnologías de la mezcla tibia en el Congreso Eurasphalt/Eurobitume, el Fórum Alemán de Bitumen, Conferencia sobre Pavimentos Asfálticos en Sudáfrica, principalmente.
2002	Recorrido de exploración a Dinamarca, Alemania y Noruega realizado por directores de NAPA para examinar las tecnologías de la mezcla asfáltica tibia (WMA), Aspha-min, la Espuma y el Sasobit. En la agenda de trabajo del grupo, se incluyeron reuniones con el Fórum Alemán de Bitumen, con el objetivo de considerar algunas actividades del grupo de Trabajo sobre Reducción de Temperatura.
2003	Los estudios sobre mezclas tibias, son presentados en la Convención Anual de la Asociación Nacional de Pavimento Asfáltico NAPA.
2003	El Centro Nacional para la Tecnología en Asfalto, investiga sobre los procesos de las mezclas tibias, Alpha-min (zeolite cristalino) y Sasobit (una cera de Fsher-Tropsch). La investigación es patrocinada por NAPA, Administración Federal de Carreteras FHWA, Eurovia (Aspha-min) y Sasol (Sasobit).
2004	Meadwestva company, introduce Evothem DAT (aditivo químico) a la mezcla, al tiempo que apoya la investigación de NCAT.

AÑO	ANTECEDENTES
2004	La demostración de mezclas tibias, es presentada en el Mundo del Asfalto.
2004	Las primeras pruebas de campo fueron realizadas en Florida y Carolina del Norte
2005	Formación del grupo de trabajo (TWG) de la mezcla Asfáltica Tibia de NAPA-FHWA. El objetivo principal del trabajo es la implementación adecuada a través de recolección de datos y análisis, de un método genérico de especificaciones técnicas en WMA.
2005	Declaración de investigación de problemas sometido a la consideración de la American Association of State Highway and Transportation Officials ,AASHTO.
2005	Se realizan pruebas de campo en Florida, Indiana, Maryland, New Hampshire, Ohio; y en Canadá.
2005	La NCAT, publica sus primeros reportes sobre Sasobit y Aspha-min.
2006	Durante la Conferencia de Pavimento Asfáltico en el Mundo del Asfalto, se presenta una sesión de medio día sobre mezclas tibias
2006	Grupo de Trabajo Técnico TWG, publica lineamientos sobre el funcionamiento y pruebas ambientales.
2006	Con base en la declaración de investigación de problemas, cuyo documento fue sometido en 2005 a evaluación por parte de la AASHTO, se define como de alta prioridad la destinación de fondos de la investigación en WMA.
2006	El TWG, somete dos declaraciones más de investigación, a consideración por parte de la AASHTO.
2006	Se realizan pruebas de campo en: California, con la mezcla de hule asfáltico; Michigan, Missouri, sobre la nueva aplicación para evitar baches causados por temperatura en la carretera; Nueva York, donde se probó el nuevo proceso de Asfalto de bajo consumo de energía; Ohio, donde se realizó una exhibición abierta al público con 225 asistentes; Carolina del Sur, Texas, Virginia y Wisconsin, también se realizaron exhibiciones abiertas al público.
2006	Un contratista de Missouri, realiza trabajos de producción de pavimento con mezcla en tibio partiendo de una prueba exitosa.
2006	NCAT publica un reporte sobre el Evotherm.
2006	Para la realización de la Conferencia Anual de NAPA, fueron requeridas numerosas presentaciones
2007	AASHTO y FHWA, realiza visitas guiadas a experiencias en WMA, en Francia, Alemania y Noruega.

AÑO	ANTECEDENTES
2007	La sesión de trabajo de 2007, del Grupo en Investigación de Transporte TRB, tuvo como único tema WMA
2007	Astec Industries introduce su tecnología de asfalto espumado.
2007	Meadwestva company, presenta el sistema de introducción de la Tecnología del Asfalto Dispersado (DAT) para el Evotherm.
2007	Se desarrolla, Advera WMA, un producto a partir de Zeolite, introducido por PQ Corporation.
2007	Demostración en calle de San Antonio en la Reunión Anual de la APWA.
2007	30.000 toneladas de diferentes tecnologías de WMA, son colocadas cerca de Yellowstone, para el mes de Agosto.
	En las pruebas realizadas en la Yellowstone, se utilizaron 9,000 toneladas métricas de asfalto, en cada una de las tres secciones (Sección de Control, Sección Sasobit y Sección de Advere WMA). Durante el proceso de acarreo, las mezclas fueron conducidas cerca de 90 minutos desde una planta portátil en Cody, Wyo.
	Aunque fue difícil la logística, las cuadrillas de pavimentación lograron buenas densidades: el promedio de Advere WMA-93.9% de densidad teórica máxima; el promedio de Sasobit – 93.4%. Neitke, quien estuvo a cargo del proyecto, declaró que: —La densidad no fue difícil de alcanzar, aun cuando las temperaturas de la mezcla bajanll , ante lo cual, —Parecía un tanto difícil mantener bajas las temperaturas de la mezcla; las temperaturas de producción tenían una tendencia a brincar de 120 a 127°C. Las pruebas mostraron que los agreg ados se secaron adecuadamente aun con las temperaturas bajas. Los contenidos de humedad estaban abajo del máximo de 0.5% tanto para las mezclas en tibio como para la mezcla de controlll .
2007	Son realizadas numerosas pruebas de campo, en California, Illinois, Nueva Jersey, Nueva York, Carolina del Norte, Ohio, Carolina del Sur, Tennessee, Texas, Virginia, Wisconsin, Wyoming y otros estados; y en Ontario.

Fuente: Propuesta para la implementación de mezclas asfálticas tibias en la ciudad de Medellín

2.6.4 Antecedentes nacionales

Tabla 13: Antecedentes con mezclas tibias en Perú.

PROYECTO	
CONSERVACIÓN VIAL PUNO - TACNA	
UBICACIÓN	TACNA - PUNO
LONGITUD	421.25 KM
LONGITUD CON MEZCA ASFALTICA TIBIA	200 KM
ESPESOR	1"
ADITIVO	WAR-MIX
CLIENTE	MTC - PROVIAS
SUPERVISOR	PROVIAS DEPARTAMENTAL PUNO

MONTO CONTRACTUAL	S/ 259,937,652.89
ADELANTO DIRECTO	S/ 37,737,623.45
PLAZO DE EJECUCION	5 AÑOS
FECHA DE INCIO	06/02/2016
FECHA DE TÉRMINO	06/02/2021

Fuente: Instituto Latinoamericano de Investigación y Estudios Viales - ILIEV

2.6.5 Definición de mezclas asfálticas tibias

Las Mezclas Asfálticas Tibias (MAT) son mezclas asfálticas que a través de aditivos o modificaciones en el proceso de mezclado permiten reducir la temperatura de mezclado entre 10°C a 75°C dependiendo de la tecnología que se utilice. (Mallick & El-Korchi, 2013)

2.6.6 Tecnologías para la producción de mezclas asfálticas tibias

Existen diversos tipos de tecnología existentes para producir las mezclas asfálticas tibias. A pesar de que en un principio cada uno de los productos tenía sus características particulares, diferentes rasgos comunes pueden ser identificados entre algunos de ellos, lo cual permite establecer una clasificación más detallada a partir del principio de funcionamiento en el que se basan.

De acuerdo con (Miró Recasens , 2006), entre los beneficios potenciales de las WMA, es posible citar:

- ✓ Las temperaturas de producción y colocación son significativamente menores.
- ✓ El envejecimiento del asfalto por oxidación y calentamiento es menor durante las operaciones de mezclado y colocación, lo que mejora la longevidad del pavimento.
- ✓ La segregación térmica es reducida, así como también el consumo de combustible empleado, esto conlleva a un menor consumo de energía.
- ✓ Disminución de la producción de polvo, de las emisiones de gases de efecto invernadero como CO₂ (dióxido de carbono), NO_x (óxido de nitrógeno), CH₄ (metano), O₃ (ozono) y CFC

(clorofluorocarbonos) y olores en la planta, durante las etapas de mezclado y colocación.

- ✓ Los plazos para la colocación y compactación de la mezcla pueden ser más largos, es decir, la mezcla tiene mayor trabajabilidad en un tiempo más prolongado.
 - ✓ Permite mayores distancias de acarreo de la mezcla debido a la menor diferencia entre la temperatura ambiente y la temperatura de la mezcla.
 - ✓ Mejora de las condiciones de trabajo de la planta y el equipo de pavimentación.
 - ✓ Apertura más rápida de tráfico para algunos productos WMA (un factor particularmente importante para los aeropuertos).
- Espumado

El principio de funcionamiento de este tipo de tecnología WMA se basa en el uso de pequeñas cantidades de agua que pueden ser inyectadas directamente en el asfalto caliente o también añadidas con los agregados a la mezcla. Cuando el agua se mezcla o entra en contacto con el betún o asfalto caliente, las altas temperaturas de éste provocan su evaporación y el vapor queda atrapado dentro de la matriz del asfalto. De este modo, se genera un volumen considerable de vapor, que se encarga de incrementar de manera temporal el volumen del betún y disminuye la viscosidad del mismo. (Córdoba Maquilón , Senior Arrierta , & Johana Posada, 2020)

- Método Indirecto

Tabla 14: Clasificación de las tecnologías de mezclas asfálticas tibias empleando Asfalto espumado.

TECNOLOGÍAS WMA	COMPAÑÍA QUE PRODUCE	PORCENTAJE DE ADITIVACIÓN	TEMPERATURA DE PRODUCCIÓN EN PLANTA (°C)	PAÍSES QUE HAN APLICADO ESTA TECNOLOGÍA	PRODUCCIÓN APROXIMADA A LA FECHA
Aspha - min (Zeolita)	Eurovia y MHI	Aproximadamente el 0.3% en peso de la mezcla.	Variable de 20°C a 30°C por debajo de la temperatura de elaboración de las mezclas asfálticas en caliente. Alemania recomienda temperaturas de elaboración entre 130°C a 170°C, dependiendo de la rigidez del cemento asfáltico.	Francia, Alemania y Estados Unidos	Aproximadamente 300,000 toneladas
Ecomac (mezcla fría calentada brevemente previa su colocación)	Screg	Cantidad desconocida	Es colocada a 45°C aproximadamente	Francia	Algunas pruebas

LEA, EBE y EBT (espumado de una porción de los agregados)	LEACO, FAIRCO y EIFFAGE	Entre el 0.2% y 0.5% en peso del ligante modificado con un agente mejorador de adherencia y cohesión	Inferior a 100°C	Francia, España, Italia y Estados Unidos.	Más de 100,000 toneladas
LEAB (el asfalto espumado se obtiene de la mezcla con un ligante aditivado)	BAM	El 0.1% en peso del ligante para estabilizar el espumado, mejorar el recubrimiento y promover adherencia.	Inferior a 90°C	Países bajos	Siete proyectos comerciales
LT Asphalt (Asfalto espumado con la adición de un llenante higroscópico para mantener la trabajabilidad)	Nynas	Entre el 0.5% y 1.0% de un llenante higroscópico	a 90°C	Países bajos e Italia	Desconocido

WAM - Foam	Kolo Veidekke, Shell Bitumen (derechos de patente a nivel mundial, excepto Estados Unidos).	No es necesario	Entre 110°C y 120°C	Francia, Noruega, Canadá, Italia, Luxemburgo, Países bajos, Suiza, Suecia y Reino Unido	Más de 60,000 toneladas
------------	---	-----------------	---------------------	---	-------------------------

Fuente: Mezclas asfálticas tibias – Celis & Flores. 2008

○ Método directo

Este grupo se basa en el uso de zeolitas sintéticas para conseguir el proceso de espumación. Este material está compuesto de aluminosilicatos de metales alcalinos, y ha sido hidrotérmicamente cristalizado. Contienen aproximadamente un 20% de agua de cristalización, la cual se libera de la estructura de la zeolita ante el aumento de temperatura provocado por la adición del betún, causando un efecto de micro - espumación en la mezcla asfáltica. (Hurley & Prowell, 2005)

● Aditivos orgánicos

Esta tecnología se basa en la adición de distintos tipos de cera por encima del punto de fusión al cemento asfáltico, lo cual produce generalmente un decrecimiento en su viscosidad.

Durante el periodo de enfriamiento de la mezcla extendida, los aditivos fundidos se solidifican en partículas microscópicas y se distribuyen uniformemente, lo que incrementa la dureza del ligante, análogo a lo que hacen los materiales reforzados con fibras. La dosificación habitual es entre 2 % y 4 % de cera respecto al total de la masa del asfalto. Los aditivos orgánicos suelen conseguir una reducción de temperatura entre 20 °C y 30 °C, mientras que también mejoran la resistencia a la deformación de los asfaltos tratados con estos productos, según informa (D'Angelo, Harm, Bartoszek, Baumgardner, & Corrigan, 2008).

Tabla 15: Clasificación de las tecnologías de mezclas asfálticas tibias de acuerdo al empleo de aditivos orgánicos.

TECNOLOGÍAS WMA	COMPAÑÍA QUE PRODUCE	PORCENTAJE DE ADITIVACIÓN	TEMPERATURA DE PRODUCCIÓN EN PLANTA (°C)	PAÍSES QUE HAN APLICADO ESTA TECNOLOGÍA	PRODUCCIÓN APROXIMADA A LA FECHA
Sasobit (Fischer - Tropsch wax)	Sasol	En Alemania, se añadió un promedio de 2.5% en peso del ligante. Una dosis entre 1.0% y 1.5% se empleó en Estados Unidos.	Variable de 20°C a 30°C por debajo de la temperatura de elaboración de las mezclas asfálticas en caliente. Alemania recomienda temperaturas de elaboración entre 130°C a 170°C, dependiendo de la rigidez del cemento asfáltico.	Alemania y otros 20 países en todo el mundo.	Más de 10 millones de toneladas en todo el mundo.
Asphaltan-B (cera)	Romonta	En Alemania, se añadió un promedio de 2.5% en peso del ligante.	Variable de 20°C a 30°C por debajo de la temperatura de elaboración de las mezclas asfálticas en caliente.	Alemania	Desconocido

			Alemania recomienda temperaturas de elaboración entre 130°C a 170°C, dependiendo de la rigidez del cemento asfáltico.		
Licomont Bs-100 (aditivo) o Subit (amida de ácidos grasos)	Clariant	Aproximadamente de 3.0% en peso del ligante	Variable de 20°C a 30°C por debajo de la temperatura de elaboración de las mezclas asfálticas en caliente.	Alemania	Más de 322,500 metros cuadrados desde 1994
3E LT o Ecoflex	Colas	Cantidad desconocida	Variable de 30°C a 40°C por debajo de la temperatura de elaboración de las mezclas asfálticas en caliente.	Francia	Desconocido

Fuente: Mezclas asfálticas tibias – Celis & Flores. 2008

○ Ceras Fischer-Trosch

Ceras Fischer-Troposch, obtenidas a partir de un proceso químico para la producción de hidrocarburos líquidos a partir de gas de síntesis, sometidas a un proceso químico a altas temperaturas. Contiene cantidades variables de monóxido de carbono (CO) e hidrogeno (H2).

- Ceras Montana

Ceras de Montana, conocida como la cera de lignito o cera OP, es una cera dura obtenida por extracción con disolventes de lignito o carbón pardo. Hay pocos yacimientos entre ellos Alemania y Cuenca del Ione, California.
- Ceras de amidas acidas grasas

Amidas acidas grasas, se caracterizan por ser producidas sintéticamente mediante la reacción de amidas con grasas acidas. Es la unión de una amina con un ácido carboxílico.
- Aditivos químicos

Los aditivos químicos por lo general incluyen una combinación de agentes emulsificantes, surfactantes, polímeros y aditivos para mejorar la trabajabilidad de la mezcla. Los aditivos químicos no dependen de procesos de espumado o de reducción de viscosidad. La proporción de estos aditivos a la mezcla no es estandarizada y depende directamente del producto que se desea utilizar. Son los más recientes en el desarrollo de mezclas asfálticas tibias con resultados prometedores, que hacen pensar en ésta, como una fuerte alternativa para el desarrollo de las mezclas tibias. (Córdoba Maquilón , Senior Arrieta , & Johana Posada, 2020)

2.7 Diseño de mezclas asfálticas por el método Marshall

2.7.1 Definición

El método de diseño de mezclas Marshall fue formulado por Bruce Marshall, ingeniero de asfaltos del Departamento de Autopistas del estado de Mississippi. Posteriormente, el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos, a través de una extensiva investigación y estudios de correlación, mejoró el procedimiento de prueba Marshall.

El método original de Marshall sólo es aplicable a mezclas asfálticas en caliente que contengan agregados con tamaño máximo de 25 mm (1"). Por su parte, el método Marshall modificado se desarrolló para tamaños de agregado mayores a 38 mm (1,5"); fue para diseño en laboratorio y control en campo de mezclas asfálticas en caliente de granulometría densa. Debido a que la prueba

de estabilidad es de naturaleza empírica, la importancia de los resultados, en términos de estimar el comportamiento en campo, se pierde cuando se realizan modificaciones a los procedimientos estándar.

El método Marshall utiliza especímenes de prueba de 64 mm (2 ½”) de altura y 102 mm (4”) de diámetro. Se preparan usando un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar mezclas de asfalto-agregado (ASTM D1559). Los dos aspectos principales del método Marshall de diseño de mezclas son la densidad-análisis de vacíos y la prueba de estabilidad y flujo de los especímenes compactados.

La estabilidad del espécimen de prueba es la máxima resistencia en N (lb) que desarrollará cuando es ensayado a una temperatura de 60 °C. El valor de flujo es el movimiento total o deformación, en unidades de 0,25 mm (1/100”), que ocurre en el espécimen entre estar sin carga y el punto máximo de carga durante la prueba de estabilidad. (Garnica Anguas, Flores Flores, Gómez López , & Delgado Alamilla, 2005)

2.7.2 Pruebas a las mezclas asfálticas compactadas

- Determinación de la gravedad específica

La prueba de gravedad específica puede desarrollarse tan pronto como el espécimen se haya enfriado en un cuarto de temperatura. Esta prueba se hace 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. 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, se emplea la norma ASTM D2726. Garnica Anguas, Delgado Alamilla, & Sandoval Sandoval (2005)

- Prueba de estabilidad y flujo

Después de que la gravedad específica se ha determinado, se procede a la prueba de estabilidad y flujo, que consiste en sumergir el espécimen en un baño María a 60 °C ± 1 °C (140 °F ± 1.8 °F) de 30 a 40 minutos antes de la

prueba. Con el equipo de prueba listo se remueve el espécimen colocado en 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, 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. Garnica Anguas, Delgado Alamilla, & Sandoval Sandoval (2005)

- **Análisis de densidad y vacíos**

Después de completar las pruebas de estabilidad y flujo, se lleva a cabo el análisis de densidad y vacíos para cada serie de especímenes de prueba. Se debe determinar la gravedad específica teórica máxima (ASTM D2041) para al menos dos contenidos de asfalto, preferentemente los que estén cerca del contenido óptimo de asfalto. Un valor promedio de la gravedad específica efectiva del total del agregado, se calcula de estos valores. 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 (V_a), porcentaje de vacíos llenados con asfalto (VFA), y el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA). Garnica Anguas, Delgado Alamilla, & Sandoval Sandoval (2005)

2.7.3 Procedimiento

Los Diferentes agregados y el asfalto presentan diferentes características, estas características tienen un impacto directo sobre la naturaleza misma del pavimento. El primer caso en el método de diseño Marshall, es determinar las cualidades como son: estabilidad, fluencia, durabilidad, trabajabilidad, resistencia al deslizamiento, etc. que debe tener la mezcla de pavimentación y seleccionar un tipo de agregado y un tipo compatible de asfalto que puedan combinarse para producir esas cualidades. (Cáceres, 2007, p.32)

CAPITULO III: SISTEMA DE HIPOTESIS

3.1 Hipótesis

3.1.1 Hipótesis General

La variación de las propiedades mecánicas obtenidas del ensayo Marshall entre las mezclas asfálticas tibias producidas con diferentes tecnologías respecto a las mezclas asfálticas en caliente se encuentra en el rango de -15% a 15%.

3.1.2 Hipótesis Específicas

- a) La variación de la estabilidad Marshall entre las mezclas asfálticas tibias producidas con diferentes tecnologías respecto a las mezclas asfálticas en caliente se encuentra en el rango de -15% a 15%.
- b) La variación de la fluencia Marshall entre las mezclas asfálticas tibias producidas con diferentes tecnologías respecto a las mezclas asfálticas en caliente se encuentra en el rango de -15% a 15%.
- c) La variación de la relación estabilidad/fluencia Marshall entre las mezclas asfálticas tibias producidas con diferentes tecnologías respecto a las mezclas asfálticas en caliente se encuentra en el rango de -15% a 15%.

3.2 Variables

3.2.1 Identificación y definición de variables

Tabla 16: Definición de Variables.

HIPOTESIS	VARIABLES	DEFINICION
<p>Hipótesis general:</p> <p>La de variación promedio de las propiedades mecánicas obtenidas del ensayo Marshall entre las mezclas asfálticas tibias producidas con diferentes</p>	<p>V.I:</p> <p>Aditivo orgánico.</p> <p>Aditivo químico.</p> <p>Proceso de espumado</p>	<p>Son los tres tipos de Tecnologías usadas para la producción de mezclas asfálticas tibias.</p>

<p>tecnologías respecto a las mezclas asfálticas en caliente se encuentra en el rango de -15% a 15%.</p>	<p>V.D: Propiedades mecánicas del ensayo Marshall.</p>	<p>Propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas como resultado del ensayo Marshall.</p>
<p>Hipótesis esp. 1: La variación de la estabilidad Marshall entre las mezclas asfálticas tibias producidas con diferentes tecnologías respecto a las mezclas asfálticas en caliente se encuentra en el rango de -15% a 15%.</p>	<p>V.I: Aditivo orgánico. Aditivo químico. Proceso de espumado</p>	<p>Son los tres tipos de Tecnologías usadas para la producción de mezclas asfálticas tibias.</p>
	<p>V.D: Estabilidad Marshall</p>	<p>como el número total de Newtons (N) necesarios para producir la falla de la probeta a 60° C.</p>
<p>Hipótesis esp. 2: La variación de la fluencia Marshall entre las mezclas asfálticas tibias producidas con diferentes tecnologías respecto a las mezclas asfálticas en caliente se encuentra en el rango de -15% a 15%.</p>	<p>V.I: Aditivo orgánico. Aditivo químico. Proceso de espumado</p>	<p>Son los tres tipos de Tecnologías usadas para la producción de mezclas asfálticas tibias.</p>
	<p>V.D: Fluencia Marshall.</p>	<p>Es la deformación total expresada en milímetros que experimenta la briqueta desde el momento en que se aplica la carga de estabilidad Marshall,</p>

		hasta el instante de falla.
<p>Hipótesis esp. 3:</p> <p>La variación de la relación estabilidad/fluencia Marshall entre las mezclas asfálticas tibias producidas con diferentes tecnologías respecto a las mezclas asfálticas en caliente se encuentra en el rango de -15% a 15%.</p>	<p>V.I:</p> <p>Aditivo orgánico.</p> <p>Aditivo químico.</p> <p>Proceso de espumado</p>	<p>Son los tres tipos de Tecnologías usadas para la producción de mezclas asfálticas tibias.</p>
	<p>V.D:</p> <p>Relación estabilidad/fluencia Marshall.</p>	<p>Parámetro obtenido de la división entre la estabilidad y el flujo, el cual es expresado en Kg/cm.</p>

Fuente: Elaboración propia

CAPITULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 Tipo y método de investigación

4.1.1 Método de investigación

Método Cuantitativo: Este trabajo de investigación es de método cuantitativo ya que se usa datos recolectados de diferentes investigaciones nacionales e internacionales relacionadas con el tema de variación de propiedades mecánicas obtenidas del ensayo Marshall entre las mezclas asfálticas tibias producidas con diferentes tecnologías y las mezclas asfálticas en caliente las cuales son medibles numéricamente y nos permite desarrollar un análisis estadístico y de esta manera demostrar hipótesis en esta investigación.

4.1.2 Tipo de investigación

Tipo bibliografía: Este trabajo de investigación es de tipo bibliográfica ya que se selecciona, compila, organiza, interpreta y se analiza la información de investigaciones pasadas, relacionadas con el tema de variación de propiedades mecánicas obtenidas del ensayo Marshall entre las mezclas asfálticas tibias producidas con diferentes tecnologías y las mezclas asfálticas en caliente, de esta manera desarrollar una fuente de información ordenada la cual sirva como base de futuras investigaciones y el de esta nueva tecnología en Perú.

4.2 Nivel de investigación

Esta investigación es de nivel descriptivo puesto que se recolecta datos de ensayos desarrollados en investigaciones anteriores nacionales e internacionales en los cuales se observa la variación de propiedades mecánicas obtenidas del ensayo Marshall entre las mezclas asfálticas tibias producidas con diferentes tecnologías y las mezclas asfálticas en caliente, con la finalidad de presentar el análisis estadístico.

4.3 Diseño de investigación

El diseño de investigación es no experimental ya que nos limitamos al análisis de información de investigaciones nacionales e internacionales anteriores y no hacemos variar las variables independientes con el fin de mostrar influencia sobre otras variables.

4.4 Población de estudio

Esta investigación tiene como población de estudio a las investigaciones pasadas nacionales e internacionales referente a las variaciones de propiedades mecánicas obtenidas del ensayo Marshall entre las mezclas asfálticas tibias producidas con diferentes tecnologías y las mezclas asfálticas en caliente

La muestra de esta investigación son 5 tesis nacionales, 11 tesis internacionales y 2 artículos nacionales y 5 artículos internacionales.

4.5 Diseño Muestral

Para esta investigación se hizo la recolección de la muestra a partir de investigaciones nacionales e internacionales donde se observa como característica principal el estudio de la variación de propiedades mecánicas obtenidas del ensayo Marshall entre las mezclas asfálticas tibias producidas con diferentes tecnologías y las mezclas asfálticas en caliente.

4.6 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Análisis documental: Se recogió información de diferentes fuentes de investigaciones pasadas tales como tesis, artículos de la especialidad, libros manuales y páginas web.

4.7 Criterios de validez y confiabilidad de los instrumentos

Las fuentes de información seleccionadas para la presente investigación son de investigaciones realizadas por profesionales y cuentan con reconocimiento académico.

4.8 Procedimientos para la recolección de datos

Se tomó los datos cuantitativos y cualitativos más resaltantes de las investigaciones de la muestra seleccionada, los cuales muestran los resultados de variación de propiedades mecánicas obtenidas del ensayo Marshall entre las mezclas asfálticas tibias producidas con diferentes tecnologías y las mezclas asfálticas en caliente, se procedió a ordenar toda esta información en una base de datos.

4.9 Técnicas para el procesamiento y análisis de datos

La técnica de procesamiento y análisis de datos de la investigación bibliográfica se basa en recopilar, clasificar y procesar información en una matriz bibliográfica; empleando especificaciones técnicas, caracterizaciones y resultados obtenidos con anterioridad.

CAPITULO V: DESARROLLO DE LA INVESTIGACION

5.1 Tecnologías desarrolladas en Perú

5.1.1 Mezcla asfáltica tibia con aditivos químicos

- Mezcla asfáltica tibia adicionando Zycotherm

La tecnología del Zycotherm hace que sea el aditivo perfecto para mejorar simultáneamente la operación, calidad y costo del asfalto en caliente. Se trata de un organosilano de segunda generación, reactivo a temperatura ambiente, soluble en agua y asfalto y estable hidrolíticamente. Proporciona una mayor cobertura de los agregados con el asfalto, el mismo tiempo que mejora la compactación incluso a bajas temperaturas.

Características generales

- ✓ Apariencia: Líquido amarillo pálido
- ✓ Densidad (25°C): 1.01g/mL
- ✓ Punto de congelación: 5-7°C
- ✓ Viscosidad a 25°C: Menor a 300cps
- ✓ Solubilidad: Soluble en agua
- ✓ Flamabilidad: Inflamable a 80°C

Ventajas

- ✓ Mayor recubrimiento y mejor compactación.
- ✓ Ahorro en contenido de asfalto (3-4kg/Tn de mezcla).
- ✓ Mejora la trabajabilidad a baja temperatura (hasta 90°C).
- ✓ Extensión de la temporada de pavimentación.
- ✓ Mejora de la cohesión árido-asfalto: agente promotor de adhesividad
- ✓ Mejora la sensibilidad al agua.
- ✓ Asfalto resistente a la sal.

- ✓ Compatible con el medio ambiente, inodoro.

Dosificación y mezclado

Dosificación:

- ✓ Se recomienda dosificar del 0,05-0,1%, en función al peso del cemento asfáltico
- ✓ Para asfaltos modificados como (PMB/SBS/SBR/EVA/SRMB), RAP/RAS, la dosificación usada va de 0,075-0.125% de Zycotherm, en función al peso del cemento asfáltico.

Mezclado:

- ✓ Inyección por goteo antes que el tanquero cargue en la refinería
 - ✓ Inyección por goteo, antes que el asfalto sea almacenado en la planta, deben recircular el tanque para lograr un mejor mezclado.
- Mezcla asfáltica tibia adicionando Quimibond

Es un aditivo líquido de naturaleza amina, que mejora la adherencia entre el agregado y el asfalto, evitando la formación de bolsas de agua que impiden la adherencia del cemento asfáltico al agregado; mejora el desempeño de las mezclas asfálticas, los ingredientes del Quimibond 3000 permiten una excelente cohesión del pavimento durante largo tiempo. Es un aditivo que es fácil de dosificar al no tener que calentarse t evitar gases tóxicos. En la Figura 36: Presentación del tensoactivo a utilizar en nuestros ensayos.

Características generales

- ✓ Color: Café oscuro
- ✓ Apariencia: Líquida-viscosa
- ✓ Densidad: 0.93 – 0.97 Kg/lt

- ✓ Dosificación: 0.3%- 0.8% del peso del cemento asfáltico, se recomienda la dosificación del 0.8% cuando los agregados poseen excesiva carga de silicios, piedras caliza o humedad.

Ventajas

- ✓ En el asfalto en caliente mejora la adherencia entre el agregado y el cemento asfáltico
- ✓ Como promotor de adherencia en mezclas frías.
- ✓ En riegos de impregnación, mejora la penetración del impregnante a la base.
- ✓ En riegos de liga para una buena unión base-carpeta
- ✓ Se recomienda su uso bajo las siguientes situaciones críticas: cuando se utiliza agregados difíciles, en ambientes con alta humedad ambiental y cuando se empleen agregados con alto contenido de sílice.

Beneficios

- ✓ Fácil dosificación al ser un aditivo líquido.
- ✓ Sin olor corrosivo que puede afectar a los operarios.
- ✓ Larga duración del asfalto.
- ✓ Trabajabilidad con la mezcla asfáltica a una temperatura de 135°C a 150°C.
- ✓ Reducción de la temperatura de compactación.

Instrucciones de uso y dosificación

La dosificación del Quimibond 3000 es muy sencilla al no necesitarse calentarse o agitarse. Una vez determinada la dosificación que varía de acuerdo a los agregados entre el 0.3% al 0.8% del peso del cemento asfáltico. La dosificación se aplica por medios neumáticos al tanque de almacenamiento o por inyección a la carga de asfalto.

5.1.2 Mezcla asfáltica tibia con aditivos orgánicos

- Mezcla asfáltica tibia adicionando Aceite crudo de Palma

Según Hernando Lopera, Magister en Ingeniería de infraestructura y sistema de transporte de la Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín, propuso la producción de mezclas asfálticas tibias a partir de la mezcla de aceite crudo de palma y asfalto base. Las mezclas asfálticas tibias permiten su producción a temperaturas menores que las mezclas en caliente, es decir, entre 100 y 135 °C, pero con el mismo desempeño. La reducción de estas temperaturas genera cinco beneficios principales: (a) la reducción de las emisiones y olores de la planta, gas carbónico (30-40 %), óxido-do de nitrógeno (60-70 %), dióxido de azufre (35 %), compuestos orgánicos volátiles (50 %) y partículas de polvo (25-55 %), (b) la reducción del consumo energético en la producción de mezcla asfáltica hasta de 30 %, ocasionando disminución de costos de producción, (c) disminución de la velocidad de enfriamiento de las mezclas asfálticas, dado que la diferencia entre la mezcla y la temperatura ambiente es menor, permitiendo distancias de transporte más largas, y más tiempo para la compactación de las mezclas, lo que resulta beneficioso en condiciones climáticas extremas y puede ayudar a prolongar la temporada de pavimentación, (d) mejora de las condiciones de trabajo en el sitio de pavimentación debido a la reducción de emisiones contaminantes, (e) reducción de la viscosidad del asfalto y/o la trabajabilidad y la compactibilidad de las mezclas; la compactación mejorada o las densidades conseguidas in situ tienden a reducir la permeabilidad y el envejecimiento del asfalto. En la investigación de Lopera se modificó un asfalto de penetración 60/70 con aceite de palma de dos proveedores diferentes: uno suministrado por Dismaprim, cuya plantación está situada en el departamento de Cundinamarca, y la otra suministrada por Palma-gro, localizada en Becerril, Cesar. La modificación del asfalto se hizo en porcentajes equivalentes a 0,3; 0,5; 0,7 y 1,0 %. Las pruebas de laboratorio mostraron que el crudo de palma puede llegar a ser un aditivo de gran potencial para la reducción de viscosidad. Las mezclas asfálticas producidas con este asfalto aditivado con aceite de palma fueron sometidas a ensayos de susceptibilidad a la humedad. Los resultados obtenidos muestran una relación de resistencia a la tensión de 84,4 % (la

normativa invias exige un mínimo de 80 %). En general, se pudo concluir que las mezclas asfálticas tibias producidas con aceite crudo de palma se pueden considerar otra opción de pavimentación, la cual brinda beneficios económicos, técnicos y ambientales, ya que relejan resistencia mecánica y buen desempeño, al ser producidas a menor temperatura.

- Mezcla asfáltica tibia adicionando Sasobit

El aditivo Sasobit es una cera Fischer- Tropsch que se presenta en forma de polvo blanco o granulada, es extraído del procedimiento de producción de hidrocarburos líquidos a partir de gas de síntesis. Se trata de una cera de cadena larga alifática hidrocarbonatada, con un punto de fusión que va desde los 85°C hasta los 115°C. Una de sus principales características, que la hace realmente útil para su uso en los procesos de las WMA, es que posee alta viscosidad a temperaturas bajas, mientras que a altas temperaturas su viscosidad disminuye enormemente. Cuando se enfría la cristalización comienza a los 105°C y se completa a los 65°C, formando unas partículas microscópicas regularmente distribuidas. (Sasobit, 2012)

La aplicación de aditivo orgánico a la mezcla asfáltica es una técnica, la cual reduce la viscosidad del ligante utilizando ceras, pueden ser añadidas de dos formas, la primera es directamente al tambor mezclador en forma sólida y la segunda es previo premezclado con el asfalto antes de ingresar al tambor. (Ulloa, 2011)

Senior indica que, las mezclas asfálticas tibias se producen a menores temperaturas de mezclado y compactación, que a su vez disminuye la viscosidad del asfalto y permite el recubrimiento completo del agregado, cabe mencionar que se pueden elaborar de 20°C a 50°C menos que la mezcla convencional, incrementa la trabajabilidad y densidad en campo, reduce la permeabilidad por lo que aumenta la resistencia a las fisuras y presencia de humedad.

El aditivo orgánico Sasobit es Producido por Sasol Wax Corpora.

Es una cera que es producto de la síntesis de Fisher Tropsch.

Presentan alrededor de 100 átomos de carbono en cadenas de hidrocarburos, los cuales incrementan su punto de fusión, por ello el Sasobid es soluble en el cemento asfáltico a temperaturas por encima de los 115 °C.

Reduce la viscosidad del cemento asfáltico a temperaturas por encima del punto de fusión de la cera.

Se aumenta la resistencia por deformación permanente de la mezcla asfáltica.

La dosificación recomendada es de 0.8% a 3% en peso del cemento asfáltico.

5.1.3 Mezcla asfáltica tibia mediante el proceso de espumado

- Mezcla asfáltica tibia con adición de zeolita

Actualmente existen alrededor de 40 minerales zeolíticos distintos, que han sido reconocidos y se han obtenido más de 100 artificiales, siendo su origen volcánico. En la literatura sobre el tema se refiere el nombre genérico de zeolitas para las obtenidas artificialmente y las naturales se les llama por su nombre específico. Pero a la zeolita natural los especialistas la denominan roca zeolítica. La piedra es de color verde, si predominan en su cuerpo elementos ferrosos y cambiará según su composición química. (Labic, 2012)

PROPIEDADES

Una característica singular de las zeolitas es que simultáneamente mediante diversos principios: absorción, intercambio iónico, tamiz molecular, etc. Lo más importante de las zeolitas es su propiedad de servir de tamiz molecular. Debido a su estructura cavernosa asegura una enorme área en su interior, pero al paso a las mismas está limitado sólo a moléculas con un tamaño determinado que pueden pasar a través del tamiz. (Labic, 2012)

El volumen vacío en algunas zeolitas puede alcanzar valores tan altos como un 47% (Chabazitas), mientras que las dimensiones de los canales, en las distintas especies minerales de zeolitas, permiten el paso de moléculas con diámetros específicos efectivos de varios angstroms, las cuales son absorbidas en los espacios vacíos; esto explica el empleo de algunas zeolitas como absorbentes industriales. (Labic, 2012, p21)

La capacidad de intercambio iónico es una de sus notables propiedades que han coadyuvado a la difusión de su empleo; oscila entre 0,55 y 3,10 meq/ g.

El intercambio iónico está dado por poseer una geometría molecular bien definida, con poros generalmente llenos de agua y cuyos enlaces forman canales y cavidades que le permiten ganar y perder agua reversiblemente e intercambiar los cationes de su estructura, sin que ésta se altere.

Debido a esa conformación, las zeolitas presentan una estructura microporosa adecuada para la acción catalítica, lo que las convierte en un material ideal para muchos procesos químicos industriales. Esta propiedad de permitir, específicamente el paso de algunas moléculas y no de otras fue aprovechada en los años 1950 para introducirla comercialmente como cribas moleculares los procesos industriales que lo requerían. (Labic, 2012, p21)

La propiedad absorbente le permite un sin número de posibilidades de uso, principalmente en la agricultura, ya que al deshidratarse su volumen está constituido por hasta un 50 % de espacio poroso, lo cual le confiere una alta capacidad de absorción a baja presión; la hidratación también es una propiedad de gran importancia, ya que la deshidratarse estos minerales no cambian su estructura, pudiendo llenarse con líquidos o gases repetidos. (Labic, 2012, p21)

La otra propiedad importante es su alto contenido silíceo.

Por otra parte, son resistentes a la pulverización, tienen baja resistencia a la abrasión y no se aterronan. Presentan una gran resistencia térmica y a la acción de agentes químicos, así como una gran capacidad y selectividad para cationes de magnesio, calcio, amonio, cesio, estroncio, plata, cobre, níquel, zinc y otros cationes metálicos. (Labic, 2012, p21)

5.2 Tecnologías desarrolladas en el mundo

5.2.1 Mezcla asfáltica tibia adicionado Husil (Colombia)

El aditivo HUSIL es un químico en estado líquido que es empleado para reducir la viscosidad del cemento asfáltico, este aditivo actúa como si fuera una zeolita sintética.

Características:

- ✓ Es un material inorgánico.
- ✓ Es un material inflamable.
- ✓ Es un material no contaminante.
- ✓ Es un material que Tiene valores de PH entre 10 y 12.
- ✓ Es un material no cancerígeno.
- ✓ Se agrega al cemento asfáltico en porcentaje que varía desde 0.25% a 10% respecto al peso del cemento asfáltico.

5.2.2 Mezclas asfálticas tibias adicionado Emulsiones super estabilizantes (Chile)

Las emulsiones asfálticas están formadas por dos fases las cuales son el agua y el asfalto, estos son estabilizados utilizando aditivos químicos llamados emulsificantes, estos emulsificantes están constituidos por cadenas hidrocarbonadas,

Las emulsiones asfálticas súper estabilizadas se pueden transportar largas sin presentar problemas de separación de fases o sedimentación. Los emulsificantes y aditivos que son los componentes de la fase acuosa de la emulsión impide que a temperaturas mayores a los 100°C se evapore por completo la fase acuosa.

5.2.3 Mezclas asfálticas tibias adicionado Genamin BTA (Colombia)

Genamin BTA es una ceramida proveniente del cebo vacuno, estos tipos de ceras se incluyeron dentro del cemento asfáltico por vía húmeda, este aditivo modifica la viscosidad del cemento asfáltico.

5.2.4 Mezclas asfálticas tibias adicionado Kaowin KW (Colombia)

Es un aditivo cuya aplicación en mezclas asfálticas tibias fue patentada en México. Tiene una presentación en forma granular y un punto de fusión de 147°C por ello se hace fácil la adición e integración rápida en el cemento asfáltico. Es utilizado para mejorar las propiedades reológicas del cemento asfáltico convencional y el modificado.

Usado para modificar las propiedades reológicas del cemento asfáltico dándole la de producción y compactación de las mezclas asfálticas a temperaturas inferiores,

también mejora las propiedades mecánicas. Este aditivo se agrega en el cemento asfáltico a temperaturas entre 150 °C - 155 °C, no se necesita molienda ya que este aditivo se integra al cemento asfáltico por ello no se necesita equipos especializados para el proceso de modificación.

Características:

- ✓ Es sólido granulado a una temperatura de 25°C.
- ✓ Punto de fusión a temperaturas entre 141 °C - 147 °C.
- ✓ Proporción entre 1% - 3% en peso del cemento asfáltico.
- ✓ Presentación en sacos de papel de 20kg.

Ventajas:

- ✓ Eleva el grado de desempeño PG.
- ✓ Eleva el punto de ablandamiento.
- ✓ A 25 °C disminuye la penetración.
- ✓ A una temperatura entre 50 °C - 80 °C aumenta la viscosidad.
- ✓ Para temperaturas mayores a 110 °C disminuye la viscosidad.
- ✓ Amplia el tiempo para la pavimentación en épocas de invierno.
- ✓ Aumenta la distancia de transporte de mezclas asfálticas de planta a obra.
- ✓ Reduce las emisiones de gases contaminantes.
- ✓ Se puede disminuir el porcentaje de polímero resultando las propiedades deseables en un asfalto modificado.

CAPITULO VI: VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS MEZCLAS ASFALTICAS TIBIAS

6.1 Reducción de temperatura de producción

Las mezclas tibias se describen como aquellas que se producen a temperaturas menores que las mezclas en caliente, es decir entre 100°C y 135°C, su producción involucra nuevas tecnologías a partir de los cuales es posible producir y colocar los concretos asfálticos a temperaturas sensiblemente inferiores a las técnicas convencionales.

El concepto de mezcla tibia surgió en Europa, tras la necesidad de una mezcla bituminosa que ofreciera economía de energía y tuviera el mismo desempeño de las mezclas bituminosas en caliente. (Lopera & Córdoba, 2013, P.32)

El concepto de mezcla tibia surgió en Europa, tras la necesidad de una mezcla bituminosa que ofreciera economía de energía y tuviera el mismo desempeño de las mezclas bituminosas en caliente. El desarrollo de esta tecnología con enfoque en la reducción de temperatura de mezcla y compactación empezó en 1997, para cumplir con el Protocolo de Kyoto. La alternativa también facilita el trabajo de pavimentación en los países en los que el invierno es muy riguroso, una vez que la mezcla tibia enfría más lentamente que la mezcla en caliente. (Lopera & Córdoba, 2013, p.33) especialistas de los Estados Unidos empezaron a investigar esta técnica, que rápidamente sería adoptada por ese país. En Brasil, se empezó a investigar la tecnología, adaptándola para las condiciones de trabajo locales. (Lopera & Córdoba, 2013, p.33)

La reducción de las temperaturas de fabricación y colocación de las mezclas asfálticas se traduce en una serie de ventajas tales como la disminución del consumo de energía y de emisiones en la planta asfáltica, el incremento de las distancias de transporte de la mezcla, el aumento de los tiempos de colocación y mejoras en la trabajabilidad y compactibilidad.

Esta reducción debe ir acompañada del logro de una calidad adecuada de las mezclas procesadas a menores temperaturas. (Agnusdei, 2010, p.2)

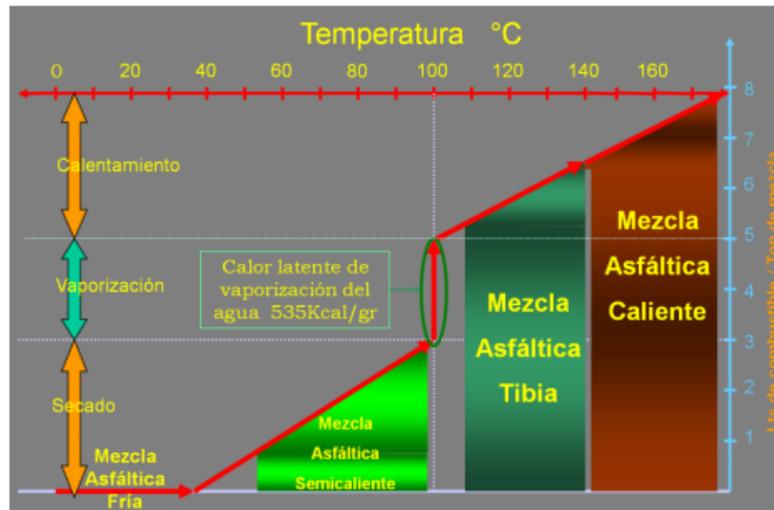


Figura 2: Rangos de temperatura para producción de mezclas asfálticas

Fuente: Comisión permanente del asfalto (2008)

6.1.1 Emisión de gases en el proceso de producción

La otra ventaja principal de WMA son las emisiones reducidas a causa de las temperaturas de producción reducidas. De acuerdo con la literatura, la producción WMA reduce significativamente las emisiones de humos y olores, en comparación con una producción regular HMA. Las emisiones procedentes de la producción y colocación de asfalto pueden, en ciertos niveles elevados, ser perjudicial para la salud. (Hazard, 2000, p.45)

El Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional (NIOSH) de EE.UU. publicó una revisión de peligro sobre los efectos para la salud de la exposición ocupacional al asfalto. En esta revisión, el NIOSH evaluó los posibles efectos en la salud de la exposición ocupacional al asfalto. En 1977, NIOSH determinó los efectos de salud adversos principales sean la irritación de membranas de la conjuntiva y el tracto respiratorio. NIOSH también reconoció que evidencia de estudios en animales indicaron que el asfalto a la izquierda en la piel durante largos periodos de tiempo puede resultar en carcinomas locales. Sobre la base de esta evidencia, NIOSH recomienda el límite después de la exposición (REL). (Hazard, 2000, p.44)

NIOSH recomienda minimizar los posibles efectos sobre la salud agudos o crónicos de la exposición al asfalto, los humos de asfalto y vapores, y pinturas

a base de asfalto mediante la adhesión a la corriente NIOSH REL de 5 mg / m³ [mide como partículas totales] durante cualquier período de 15 minutos y por la aplicación de las siguientes prácticas (Hazard, 2000, p.44):

- Evitar la exposición dérmica.
- Mantener la temperatura de aplicación del asfalto calentado lo más bajo posible.
- Use controles de ingeniería y buenas prácticas de trabajo en todos los sitios de trabajo para minimizar la exposición de los trabajadores a los humos de asfalto y aerosoles de pintura a base de asfalto.
- Use protección respiratoria adecuada.

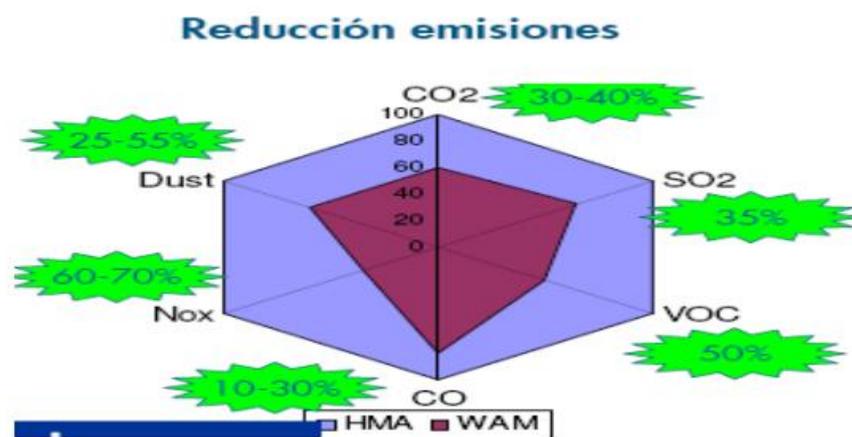


Figura 3: Reducciones registradas en las emisiones de planta en la producción de mezcla.

Fuente: Diseño y producción de mezclas asfálticas tibias, a partir de la mezcla de asfalto y aceite crudo de palma (*Elaeis Guineensis*)

6.1.2 Energía usada en el proceso de producción

“La reducción en el consumo de energía es el beneficio más obvio de las mezclas asfálticas tibias y generalmente se comercializa y discutido en la literatura como uno de los dos beneficios principales de las mezclas asfálticas tibias”. (Cervarich, 2003, p.35)

Los estudios han demostrado que la reducción de consumo de energía de alrededor del 30% se puede lograr mediante la reducción de las temperaturas

de producción en la planta de asfalto. La reducción en el consumo de energía reduce el coste de la producción de asfalto, pero también puede ser un coste añadido que implica el uso del proceso de las mezclas asfálticas tibias, es decir, para aditivos y / o modificación del equipo. Otro beneficio de la reducción de las temperaturas de producción es a veces mencionado menos desgaste de la planta de asfalto. (Cervarich, 2003, p.35)

6.2 Trabajabilidad en el proceso de producción

La trabajabilidad es la facilidad con que una mezcla de pavimentación puede ser colocada y compactada. Las mezclas que poseen buena trabajabilidad son fáciles de colocar y compactar; aquellas con mala trabajabilidad son difíciles de colocar y compactar. La trabajabilidad puede ser mejorada modificando los parámetros de la mezcla, el tipo de agregado, y/o la granulometría.

Las mezclas gruesas (mezclas que contienen un alto porcentaje de agregado grueso) tienen una tendencia a segregarse durante su manejo, y también pueden ser difíciles de compactar. A través de mezclas de prueba en el laboratorio puede ser posible adicionar agregado fino, y tal vez asfalto, a una mezcla gruesa, para volverla más trabajable. En tal caso se deberá tener cierto cuidado para garantizar que la mezcla modificada cumpla con los otros criterios de diseño, tales como contenido de vacíos y estabilidad.

Un contenido demasiado alto de relleno también puede afectar la trabajabilidad. Puede ocasionar que la mezcla se vuelva muy viscosa, haciendo difícil su compactación.

La trabajabilidad es especialmente importante en sitios donde se requiere colocar y rastrillar a mano cantidades considerables de mezcla, como por ejemplo alrededor de tapas de alcantarillados, curvas pronunciadas y otros obstáculos similares. Es muy importante usar mezclas trabajables en dichos sitios.

Las mezclas que son fácilmente trabajables o deformables se conocen como mezclas tiernas. Las mezclas tiernas son demasiado inestables para ser colocadas y compactadas apropiadamente. Usualmente son el producto de una falta de relleno mineral, demasiada arena de tamaño mediano., partículas lisas y redondeadas de agregado, y/o demasiada humedad en la mezcla.

Aunque el asfalto no es la principal causa de los problemas de trabajabilidad, si tienen algún efecto sobre esta propiedad. Debido a que la temperatura de la mezcla afecta la viscosidad del asfalto, una temperatura demasiado baja hará que la mezcla sea poco trabajable, mientras que una temperatura demasiado alta podrá hacer que la mezcla se vuelva tierna. El grado y el porcentaje de asfalto también pueden afectar la trabajabilidad de la mezcla. (Asphalt Institute, 1982, p.63).

6.3 Reducción de viscosidad

La tecnología de mezclas asfálticas tibias tiene como funcionalidad la reducción de viscosidad del cemento asfáltico.

Al reducir la viscosidad se logra cubrir totalmente a los agregados a una temperatura inferior a las mezclas asfálticas en caliente.

6.3.1 Energía en el proceso de compactación

Al utilizar las tecnologías de mezclas tibias existe una reducción de energía de compactación de los equipos, por ende, para obtener las densidades requeridas se requiere de menos esfuerzo.

6.3.2 Apertura al tráfico

Al utilizar las tecnologías de mezclas asfálticas tibias se puede lograr una apertura al tráfico en menos tiempo comparado con las mezclas asfálticas en caliente.

CAPÍTULO VII: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

7.1 Comparación de resultados de los ensayos realizados en las mezclas asfálticas en caliente y las mezclas asfálticas tibias

7.1.1 Estabilidad en las mezclas asfálticas tibias y las mezclas asfálticas en caliente

- Estabilidad en las mezclas asfálticas tibias con aditivos orgánicos
 - Aditivo orgánico con aceite crudo de Palma

En las siguientes tablas 17 y 18 se muestra los resultados de los ensayos de estabilidad Marshall realizada a mezclas asfálticas tibias adicionando diferentes porcentajes del aditivo orgánico aceite crudo de Palma. El aditivo se clasificó de tipo A, que es de procedencia artesanal; mientras que el tipo B es de procedencia industrial. Y también se muestra la variación de la estabilidad respecto a la mezcla asfáltica en caliente. Todas estas mezclas se llevaron a una temperatura de mezclado de 150 °C.

Tabla 17: Cuadro comparativo de variación de estabilidad Marshall de una mezcla asfáltica tibia con aditivo orgánico Aceite crudo de Palma tipo A respecto a una mezcla asfáltica en caliente

TEMPERATURA	ESTABILIDAD MARSHALL (kg)											
MEZCLADO	MAC	MAC	MAT + ACP 0.5%	Δ	MAT + ACP 1.0%	Δ	MAT + ACP 1.5%	Δ	MAT + ACP 2.0%	Δ	MAT + ACP 2.5%	Δ
150 °C	14.40	0	18.76	30.31%	13.10	-9.01%	13.62	-5.39%	14.73	2.32%	16.55	14.96%

Fuente: Diseño de una mezcla asfáltica tibia con aceite crudo de Palma

Tabla 18: Cuadro comparativo de variación de estabilidad Marshall de una mezcla asfáltica tibia con aditivo orgánico Aceite crudo de Palma tipo B respecto a una mezcla asfáltica en caliente.

TEMPERATURA	ESTABILIDAD MARSHALL (kg)											
MEZCLADO	MAC	MAC	MAT + ACP 0.5%	Δ	MAT + ACP 1.0%	Δ	MAT + ACP 1.5%	Δ	MAT + ACP 2.0%	Δ	MAT + ACP 2.5%	Δ
150 °C	8.27	0.00%	12.61	52.48%	19.09	130.83%	5.66	-31.56%	7.36	-11.00%	7.61	-7.98%

Fuente: Diseño de una mezcla asfáltica tibia con aceite crudo de Palma

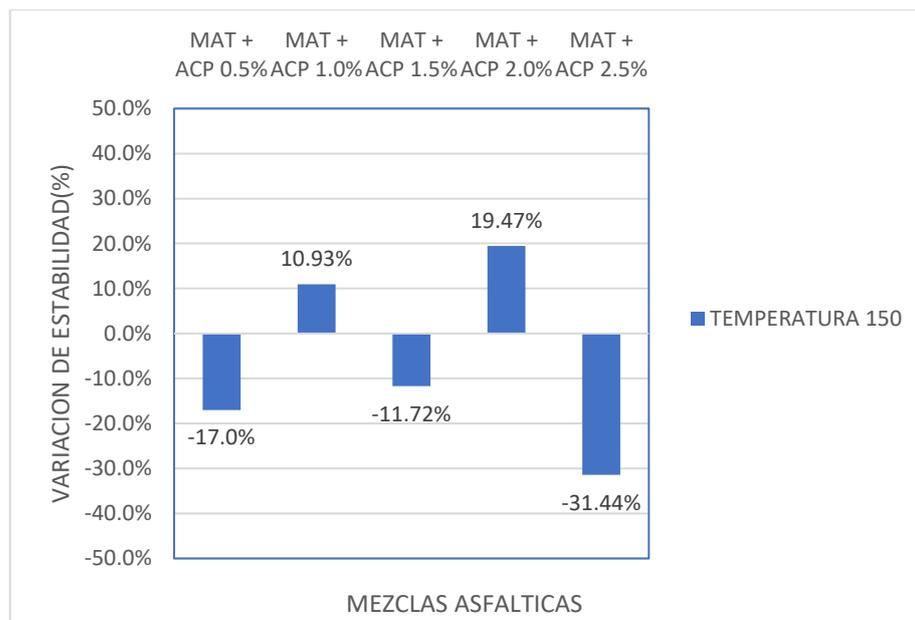


Figura 4: Variación de estabilidad Marshall de mezcla asfáltica tibia para transito liviano con aceite crudo de palma tipo "A" respecto a la mezcla asfáltica en caliente.

Fuente: Elaboración propia

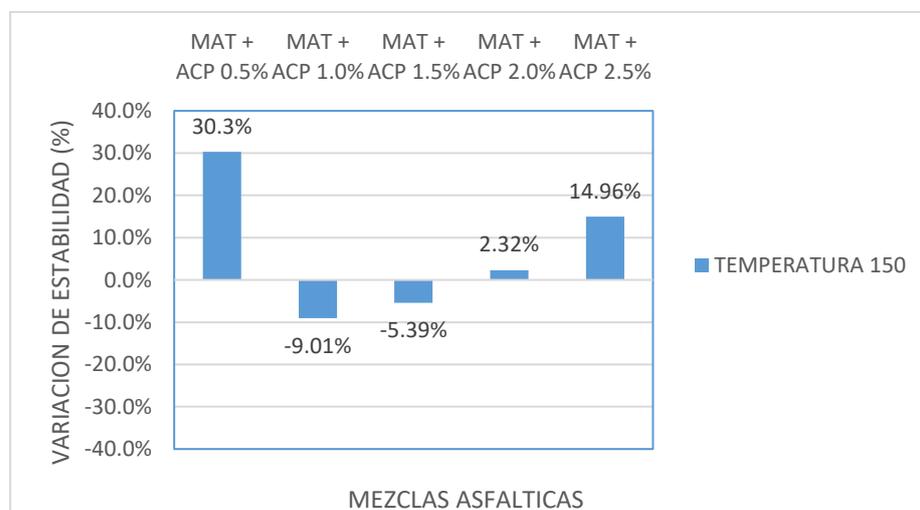


Figura 5: Variación de estabilidad Marshall de mezcla asfáltica tibia para transito liviano con aceite crudo de palma tipo "B" respecto a la mezcla asfáltica en caliente.

Fuente: Elaboración propia

Como se muestra en las figuras 4 y 5, la variación mayor se presenta en una mezcla asfáltica tibia con aceite crudo de Palma de tipo "B" con un

0.5% de aditivo orgánico. Podemos decir que este aditivo favorece a la estabilidad de la mezcla asfáltica ya que aumenta en 30.30%.

○ Aditivo orgánico Sasobit

Para el análisis de la variación de estabilidad Marshall de una mezcla asfáltica tibia con aditivo Sasobit respecto a una mezcla asfáltica en caliente, se tiene los resultados de tres experimentos. El primer experimento muestra una mezcla asfáltica convencional compactado a una temperatura de 140 °C, para el segundo experimento se tiene una mezcla asfáltica tibia con una adición de Sasobit al 3% y a una temperatura de compactado de 130 °C y por último una mezcla asfáltica tibia con Sasobit al 8%

Tabla 19: Cuadro comparativo de variación de estabilidad Marshall de una mezcla asfáltica tibia con aditivo orgánico Sasobit respecto a una mezcla asfáltica en caliente.

TEMPERATURA	ESTABILIDAD MARSHALL (kg)					
COMPACTADO	MAC	VARIACION DE MAC	MAT + SASOBIT 3%	VARIACION DE MAT + 3% SASOBIT	MAT + SASOBIT 8%	VARIACION DE MAT + 8% SASOBIT
140	1362.4	0	-	-	-	-
130	-	-	1456	6.87%	-	-
110	-	-	-	-	1056.4	-27.45%

Fuente: Elaboración propia

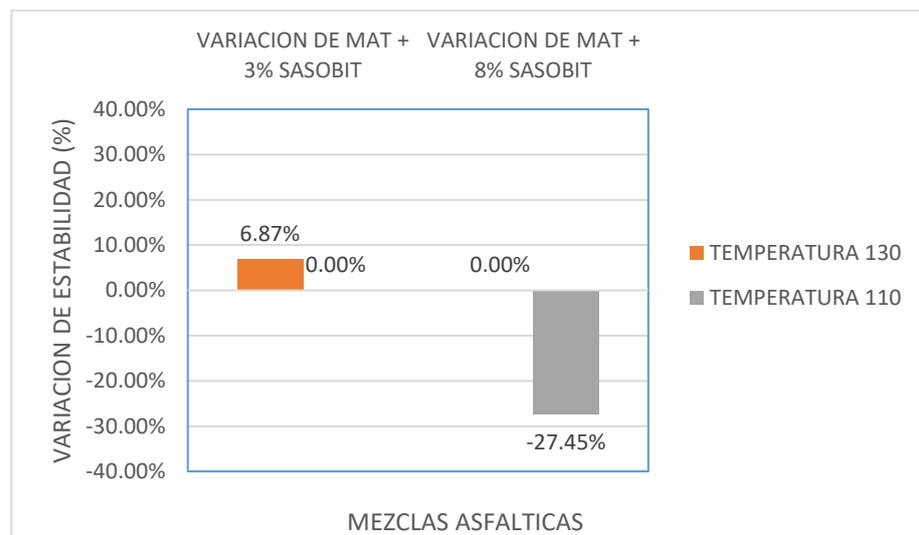


Figura 6: Variación de estabilidad Marshall de mezcla asfáltica tibia con aditivo Sasobit respecto a la mezcla asfáltica en caliente.

Fuente: Elaboración propia

De la figura 6 se observa que para la segunda mezcla con Sasobit al 3% la estabilidad Marshall muestra una variación positiva de 6.78% esto hace que esta propiedad se vea beneficiada, mientras que para la tercera mezcla asfáltica con Sasobit al 8% esta tiene una disminución en su estabilidad lo cual no es de beneficio para la propiedad física.

- Estabilidad en las mezclas asfálticas tibias con aditivos químicos
 - Aditivo químico Zycotherm

La Tabla 20 muestra la variación de la estabilidad Marshall de una mezcla asfáltica en caliente y una mezcla asfáltica tibia con un 0.15% del aditivo Zycotherm, a estas mezclas se las compacto a temperaturas de 140 °C, 130 °C y 120 °C.

Tabla 20: Cuadro comparativo de variación de estabilidad Marshall de una mezcla asfáltica tibia con aditivo químico Zycotherm respecto a una mezcla asfáltica en caliente.

TEMPERATURA	ESTABILIDAD MARSHALL (kg)			
	MAC	Δ	MAT + ZYCOTHERM 0.15%	Δ
140	1242	0	1228	-1.13%
130	1140	-8.21%	1113	-10.39%
120	920	-25.93%	1097	-11.67%

Fuente: Comportamiento de las mezclas asfálticas tibias adicionando tensoactivos y sus beneficios respecto a las mezclas asfálticas en caliente

En la siguiente Figura 7 se muestra el porcentaje de variación de la estabilidad Marshall de las mezclas asfálticas evaluadas y compactadas a diferentes temperaturas.

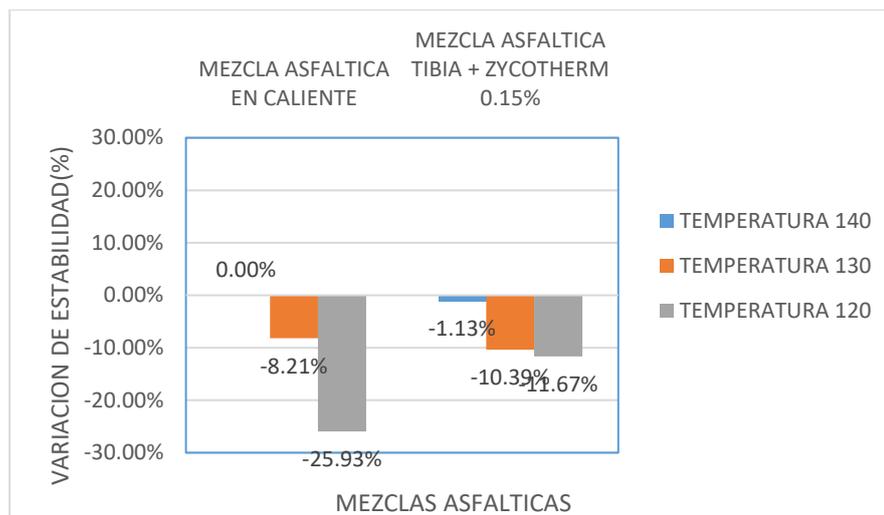


Figura 7: Variación de estabilidad Marshall de mezcla asfáltica tibia con Zycotherm 0.15% respecto a una mezcla asfáltica en caliente.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en la figura 7, la mezcla asfáltica convencional a una temperatura de 120 °C sufre una variación de -25.93 % en la estabilidad Marshall, respecto a una mezcla asfáltica en caliente a una temperatura de 140°C, mientras que una mezcla asfáltica tibia con un aditivo químico tiene una variación de -11.67%. respecto a la mezcla asfáltica convencional.

○ Aditivo químico Quimibond

La Tabla 21 muestra la variación de la estabilidad Marshall de una mezcla asfáltica en caliente y una mezcla asfáltica tibia con un 0.8% del aditivo Quimibond, a estas mezclas se compacto a temperaturas de 140 °C, 130 °C y 120C°.

Tabla 21: Cuadro comparativo de variación de estabilidad Marshall de una mezcla asfáltica tibia con aditivo químico Quimibond respecto a una mezcla asfáltica en caliente.

TEMPERATURA	ESTABILIDAD MARSHALL (kg)			
	MAC	Δ	MAT + QUMINBOND 0.8%	Δ
140	1242	0	1255	1.05%
130	1140	-8.21%	1123	-9.58%
120	920	-25.93%	993	-20.05%

Fuente: Comportamiento de las mezclas asfálticas tibias adicionando tensoactivos y sus beneficios respecto a las mezclas asfálticas en caliente

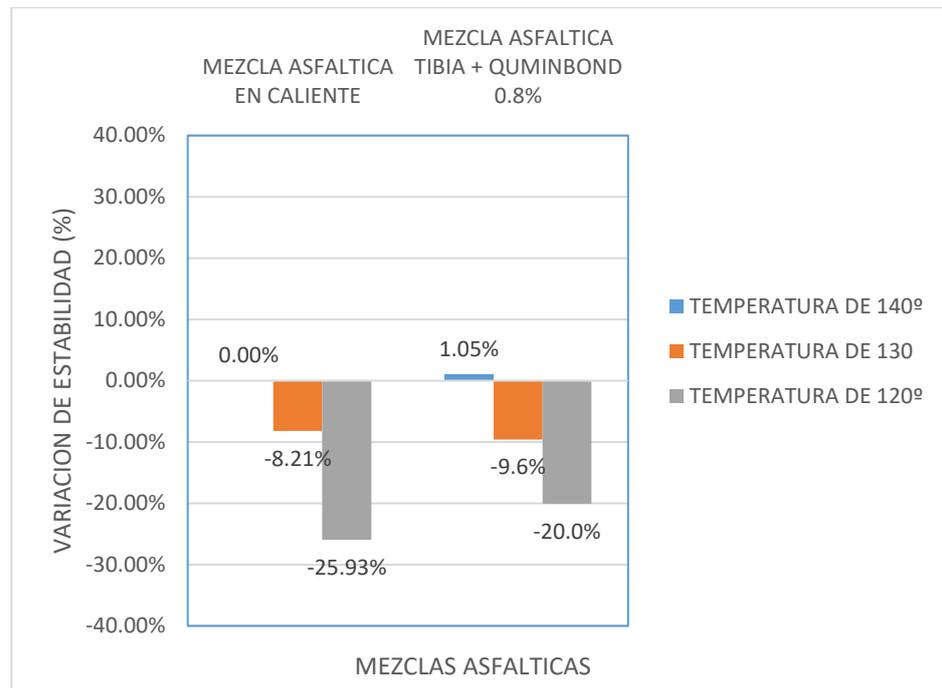


Figura 8: Variación de estabilidad Marshall de mezcla asfáltica tibia con Quimibond 0.8% respecto a una mezcla asfáltica en caliente.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en la figura 8, la mezcla asfáltica convencional a una temperatura de 120 °C sufre una variación de -25.93 % en la estabilidad Marshall, respecto a una mezcla asfáltica en caliente a una temperatura de 140°C, mientras que una mezcla asfáltica tibia con un aditivo químico Quimibond tiene una variación de -20.0%. respecto a la mezcla asfáltica convencional.

○ Aditivo químico Husil

En la tabla 21 se muestra la variación de estabilidad de la mezcla asfáltica tibia respecto a la mezcla asfáltica en caliente, para esto se desarrolló el diseño de una mezcla asfáltica en caliente con el óptimo contenido de asfalto de 5%, temperatura de compactación de 150 °C y estabilidad de 1256.79 Kg, luego se pasa a diseñar la mezcla asfáltica tibia con este mismo contenido de asfalto de 5% y se le añade 1% de aditivo HUSIL con relación al peso del cemento

asfáltico y se toman datos de estabilidad a temperaturas de compactación de 130 °C, 120 °C y 110 °C.

Tabla 22: Cuadro comparativo de estabilidad Marshall de una mezcla asfáltica tibia con aditivo químico Husil respecto a una mezcla asfáltica en caliente.

TEMPERATURA (°C)	ESTABILIDAD (Kg)		
	0% HUSIL	1% HUSIL	VARIACION
150	1256.79	-	0%
130	-	1374.5	9.37%
120	-	1295.32	3.07%
110	-	1272.74	1.27%

Fuente: Desarrollo de una mezcla asfáltica tibia reciclada bajo criterios técnicos y medioambientales

En el Figura 9 se muestra la variación de estabilidad de una mezcla asfáltica tibia con aditivo HUSIL a 1% en peso del cemento asfáltico a diferentes temperaturas de compactación respecto a la mezcla asfáltica en caliente.

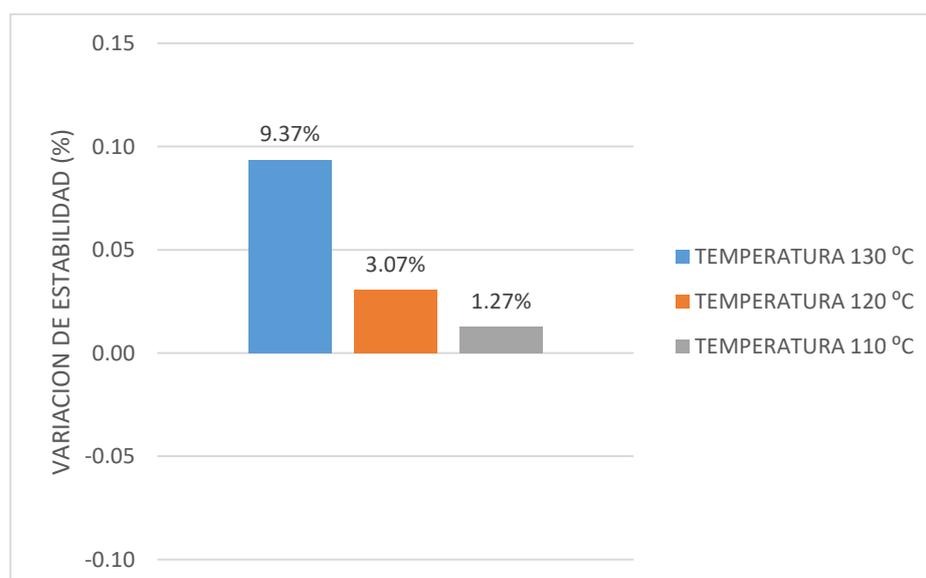


Figura 9: Variación de fluencia Marshall de mezcla asfáltica tibia con Quimibond 0.8% respecto a una mezcla asfáltica en caliente.

Fuente: Elaboración propia

De el grafico se observa que la mayor variación de estabilidad de una mezcla asfáltica tibia respecto a la mezcla asfáltica en caliente al usar aditivo HUSIL a 1% en peso del cemento asfáltico y a una temperatura de compactación de 130 °C es de 9.37%, mientras que la menor variación es

de 1.27% y se da a una temperatura de compactación de 110 °C, si bien existe una variación en la estabilidad cabe mencionar que los valores de estabilidad mostrados en la tabla Nro 1 de las mezclas asfálticas tibias cumplen con la condición descritos en INVIAS (2013) donde para categoría de tránsito NT2 se manejan rangos de estabilidad entre (764.79 Kg – 1720.77 Kg).

o Aditivo químico Genamin BTA y Kaomin KW

En la tabla 22 se muestra la variación de estabilidad de mezclas asfálticas tibias adicionado con GENAMIN BTA Y KAOMIN KW respecto a una mezcla asfáltica en caliente, para esto se desarrolla el diseño de una mezcla asfáltica en caliente con el contenido óptimo de asfalto de 5.1% y estabilidad de 1274.88 Kg, posteriormente se hace el diseño de mezclas asfálticas tibias con aditivos modificadores de viscosidad GENAMIN BTA al 2% , GENAMIN BTA al 3%, KAOMIN KW al 2%, KAOMIN KW al 3% en relación al peso del cemento asfáltico y se toman los datos de estabilidad a diferentes temperaturas de producción y compactación.

Tabla 23: Cuadro comparativo de estabilidad Marshall de una mezcla asfáltica tibia con aditivo químico Genamin BTA al 3% y Kaomin KW al 3% respecto a una mezcla asfáltica en caliente.

CEMENTO ASFALTICO (%)	TEMPERATURA DE PRODUCCION (°C)		TEMPERATURA DE COMPACTACION (°C)		ESTABILIDAD (Kg)	VARIACION DE ESTABILIDAD (%)
5.1% CAP PEN 60/70	146	154	135	141	1274.88	0.00%
5.1% CAP PEN 60/70 Y GENAMIN BTA AL 2%	132	135	125	129	1247.48	-2.15%
5.1% CAP PEN 60/70 Y GENAMIN BTA AL 3%	126	130	121	124	1284.11	0.72%
5% CAP PEN 60/70 Y KAOMIN KW AL 2%	132	137	127	129	1301.48	2.09%
5% CAP PEN 60/70 Y KAOMIN KW AL 3%	128	131	121	124	1363.025	6.91%

Fuente: Evaluación de la capacidad estructural de una mezcla asfáltica tibia MDC-19 utilizando aditivos modificadores de viscosidad.

En la figura 10 se muestra la variación de estabilidad de las mezclas asfálticas tibias adicionado con aditivos modificadores de viscosidad GENAMIN BTA y KAOMIN KW con respecto a las mezclas asfálticas en caliente.

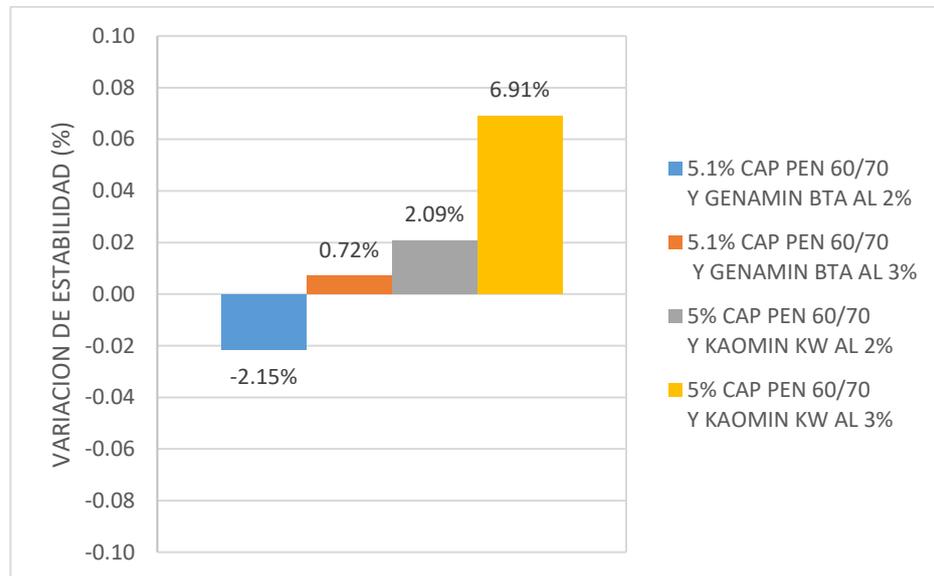


Figura 10: Variación de estabilidad Marshall de mezcla asfáltica tibia con Genamin BTA al 2% y Kaomin KW al 3% respecto a una mezcla asfáltica en caliente.

Fuente: Elaboración propia

De la Figura 10 se observa que la mayor variación de estabilidad una mezcla asfáltica tibia respecto a la mezcla asfáltica en caliente es de 6.91% y se da al usar una mezcla asfáltica tibia con un contenido óptimo de asfalto de 5.0% y la adición del aditivo KAOWIN KW al 3% y una que la menor variación de estabilidad es de 0.72% y se da al usar una mezcla asfáltica tibia con un contenido óptimo de asfalto de 5.1% y la adición del aditivo GENAMIN BTA al 3%, si bien existe una variación en la estabilidad cabe mencionar que los valores de estabilidad mostrados en la tabla Nro 2 de las mezclas asfálticas tibias cumplen con la condición descritos en INVIAS (2013) donde para categoría de transito NT3 se manejan rangos de estabilidad entre (917.74 Kg – 3441.54 Kg).

- Estabilidad en las mezclas asfálticas tibias con el proceso de espumado
 - Mezcla asfáltica tibia adicionando Zeolita

La Tabla siguiente muestra la variación de la estabilidad Marshall de una mezcla asfáltica en caliente y una mezcla asfáltica tibia con porcentajes de 0.3%, 0.6% y 0.9% de Zeolita, a estas mezclas fueron sometidas a temperaturas de mezclado de 140 °C, 130 °C y 125C°; y a temperaturas de compactado de 120 °C, 110 °C y 105C°.

Tabla 24: Cuadro comparativo de variación de Fluencia Marshall de una mezcla asfáltica tibia con Zeolita respecto a una mezcla asfáltica en caliente.

TEMPERATURA		ESTABILIDAD MARSHALL (kg)							
MEZCLADO	COMPACTADO	MAC	Δ	MAT + 0.3% ZEOLITA	Δ	MAT + 0.6% ZEOLITA	Δ	MAT + 0.9% ZEOLITA	Δ
150 °C	135 °C	1256	0	-	-	-	-	-	-
140 °C	120 °C	1137	-9.47%	1048	-16.56%	1068	-14.97%	1125	-10.43%
130 °C	110 °C	1075	-14.41%	1096	-12.74%	1142	-9.08%	1099	-12.50%
125 °C	105 °C	917	-26.99%	851	-32.25%	877	-30.18%	968	-22.93%

Fuente: Incidencias de la adición de zeolita natural a la mezcla asfáltica en su comportamiento mecánico

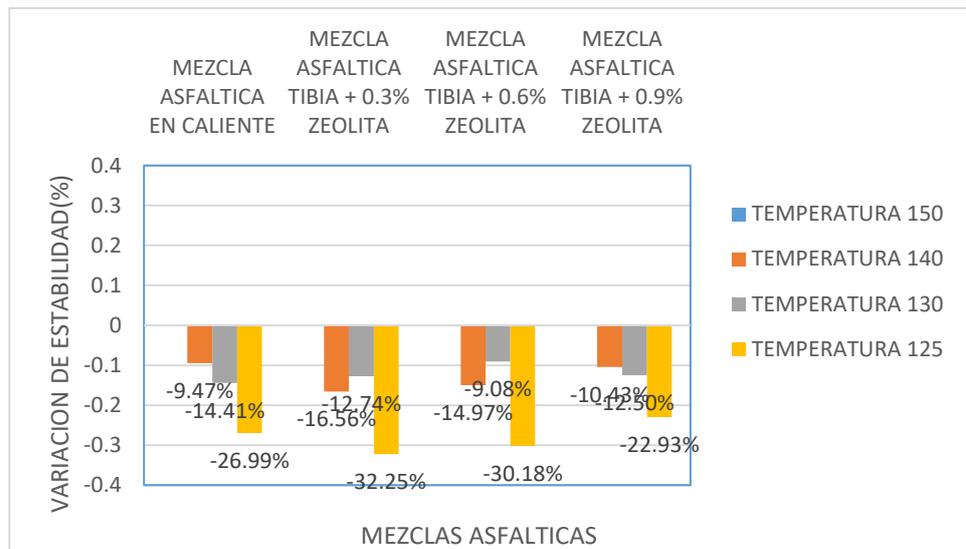


Figura 11: Variación de estabilidad Marshall de mezcla asfáltica tibia con Zeolita respecto a una mezcla asfáltica en caliente.

Fuente: Elaboración propia.

De la figura 11 podemos observar que la estabilidad Marshall sufre una disminución, por lo cual podemos decir que al usar este tipo de aditivo la mezcla asfáltica tibia pierde estabilidad. Los resultados muestran que la mejor opción

sería usar la mezcla asfáltica tibia con 0.6% de Zeolita, ya que es la que menor sufre una variación de -9.08%.

7.1.2 Flujo en las mezclas asfálticas tibias y las mezclas asfálticas en caliente

- Flujo en las mezclas asfálticas tibias con aditivos orgánicos

En la siguiente tabla se muestra los resultados de los ensayos de fluencia Marshall realizada a mezclas asfálticas tibias adicionando diferentes porcentajes del aditivo orgánico aceite crudo de Palma. Y también se muestra la variación de la fluencia respecto a la mezcla asfáltica en caliente. Todas estas mezclas se llevaron a una temperatura de mezclado de 150 °C.

Tabla 25: Cuadro comparativo de variación de fluencia Marshall de una mezcla asfáltica tibia con aditivo orgánico Aceite crudo de Palma tipo A respecto a una mezcla asfáltica en caliente.

TEMPERATURA	FLUENCIA MARSHALL (mm)											
MEZCLADO	MAC	MAC	MAT + ACP 0.5%	Δ	MAT + ACP 1.0%	Δ	MAT + ACP 1.5%	Δ	MAT + ACP 2.0%	Δ	MAT + ACP 2.5%	Δ
150 °C	11.67	0	9.33	-20.03%	12	2.86%	8	-31.43%	10.33	-11.46%	8.5	-27.14%

Fuente: Diseño de una mezcla asfáltica tibia con aceite crudo de Palma

Tabla 26: Cuadro comparativo de variación de fluencia Marshall de una mezcla asfáltica tibia con aditivo orgánico Aceite crudo de Palma tipo B respecto a una mezcla asfáltica en caliente.

TEMPERATURA	FLUENCIA MARSHALL (mm)											
MEZCLADO	MAC	MAC	MAT + ACP 0.5%	Δ	MAT + ACP 1.0%	Δ	MAT + ACP 1.5%	Δ	MAT + ACP 2.0%	Δ	MAT + ACP 2.5%	Δ
150 °C	11.67	0	9.67	-17.11%	8.33	-28.60%	10.33	-11.46%	8.33	-28.60%	10.33	-11.46%

Fuente: Diseño de una mezcla asfáltica tibia con aceite crudo de Palma

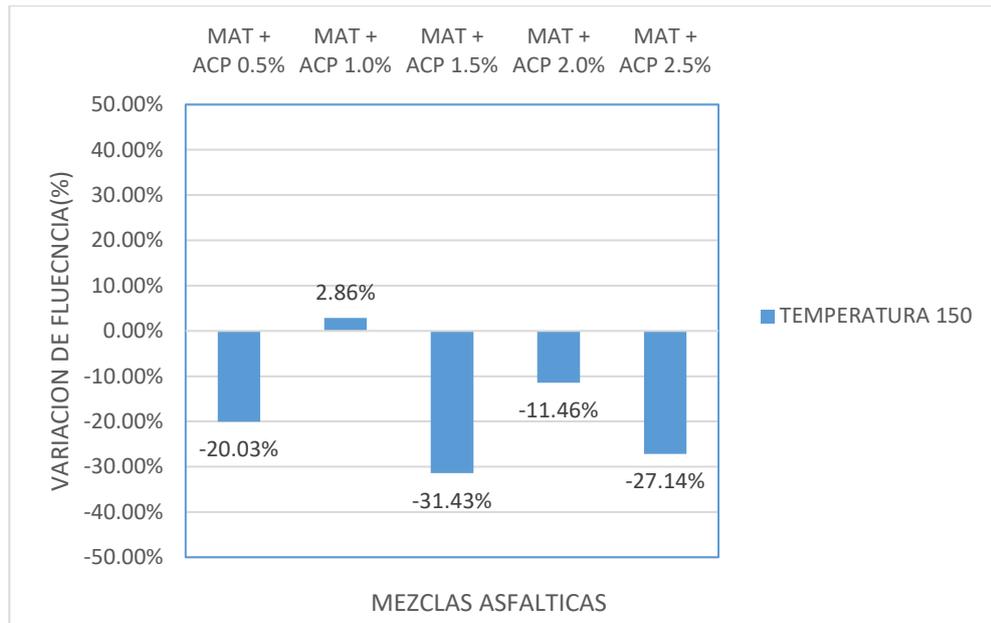


Figura 12: Variación de Fluencia Marshall de mezcla asfáltica tibia para transito medio con aceite crudo de Palma tipo “A” respecto a una mezcla asfáltica en caliente.

Fuente: Diseño de una mezcla asfáltica tibia con aceite crudo de Palma

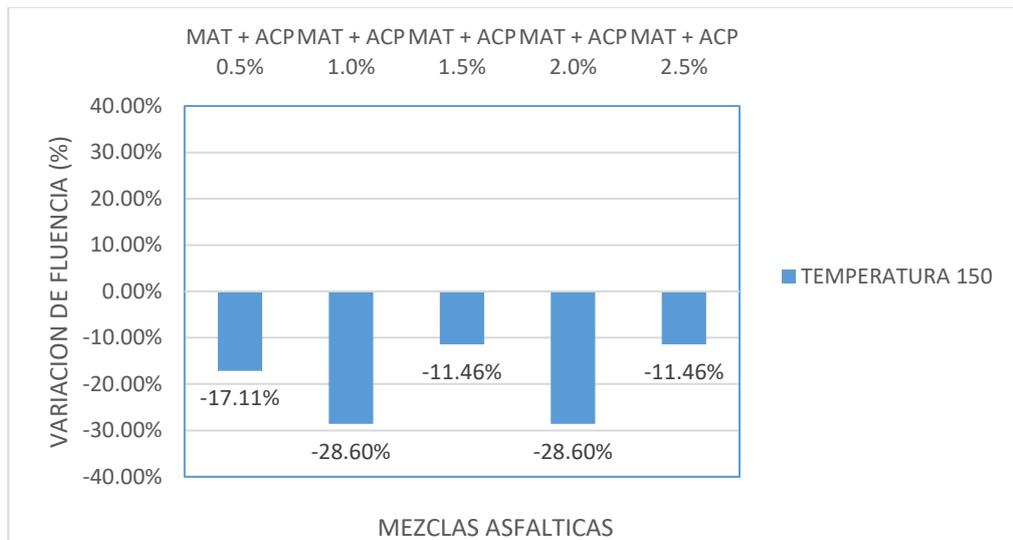


Figura 13: Variación de Fluencia Marshall de mezcla asfáltica tibia para transito medio con aceite crudo de Palma tipo “B” respecto a una mezcla asfáltica en caliente.

Fuente: Diseño de una mezcla asfáltica tibia con aceite crudo de Palma

De las figuras podemos observar que para la mezcla asfáltica tibia añadiendo aceite crudo de Palma pasa a reducirse con excepción de la mezcla asfáltica tibia con 1% de aceite crudo de Palma, el cual se ve beneficiado con este aditivo.

○ Aditivo orgánico Sasobit

Para el análisis de la variación de fluencia Marshall de una mezcla asfáltica tibia con aditivo Sasobit respecto a una mezcla asfáltica en caliente, se tiene los resultados de tres experimentos. El primer experimento muestra una mezcla asfáltica convencional compactado a una temperatura de 140 °C, para el segundo experimento se tiene una mezcla asfáltica tibia con una adición de Sasobit al 3% y a una temperatura de compactado de 130 °C y por último una mezcla asfáltica tibia con Sasobit al 8%.

Tabla 27: Cuadro comparativo de variación de fluencia Marshall de una mezcla asfáltica tibia con aditivo orgánico Sasobit respecto a una mezcla asfáltica en caliente.

TEMPERATURA	FLUENCIA MARSHALL (mm)					
COMPACTADO	MAC	VARIACION DE MAC	MAT + SASOBIT 3%	VARIACION DE MAT + 3% SASOBIT	MAT + SASOBIT 8%	VARIACION DE MAT + 8% SASOBIT
140	4.2	0	-	-	-	-
130	-	-	3.2	-23.81%	-	-
110	-	-	-	-	4.2	31.25%

Fuente: Elaboración propia

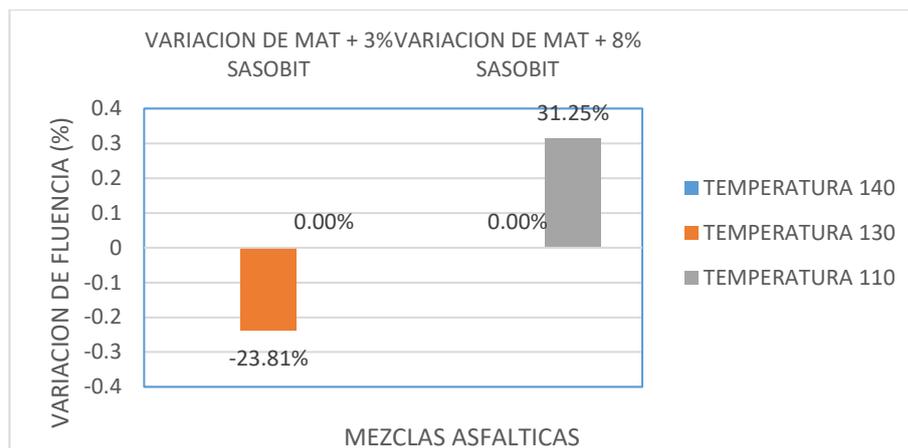


Figura 14: Variación de fluencia Marshall de mezcla asfáltica tibia con aditivo Sasobit respecto a la mezcla asfáltica en caliente.

Fuente: Elaboración propia

Como se muestra en la figura 14 hay una variación notable en la fluencia Marshall usando el aditivo Sasobit. Al usar un 8% de aditivo esta propiedad se ve afectada en un 31.25%.

- Flujo en las mezclas asfálticas tibias con aditivos químicos
 - Aditivo químico Zycotherm

La Tabla siguiente muestra la variación de la estabilidad Marshall de una mezcla asfáltica en caliente y una mezcla asfáltica tibia con un 0.15% del aditivo Zycotherm, a estas mezclas se las compacto a temperaturas de 140 °C, 130 °C y 120°C.

Tabla 28: Cuadro comparativo de variación de fluencia Marshall de una mezcla asfáltica tibia con aditivo químico Zycotherm respecto a una mezcla asfáltica en caliente.

TEMPERATURA	FLUENCIA MARSHALL (mm)			
	MAC	Δ	MAT + ZYCOTHERM 0.15%	Δ
140	3.21	0	3.11	-3.12%
130	3.56	10.90%	3.43	6.85%
120	3.94	22.74%	3.94	22.74%

Fuente: Comportamiento de las mezclas asfálticas tibias adicionando tensoactivos y sus beneficios respecto a las mezclas asfálticas en caliente

En la siguiente Figura 16 se muestra el porcentaje de variación de la estabilidad Marshall de las mezclas asfálticas evaluadas y compactadas a diferentes temperaturas.

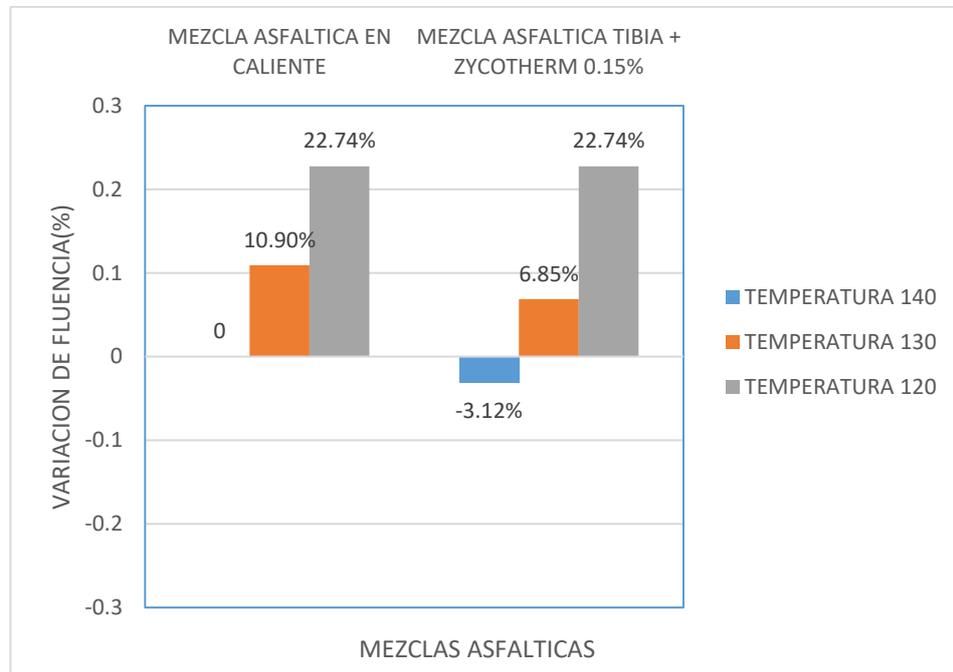


Figura 15: Variación de fluencia Marshall de mezcla asfáltica tibia con Zycotherm 0.15% respecto a una mezcla asfáltica en caliente.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en la figura, la mezcla asfáltica convencional a una temperatura de 120 °C sufre una variación de -25.93 % en la estabilidad Marshall, respecto a una mezcla asfáltica en caliente a una temperatura de 140°C, mientras que una mezcla asfáltica tibia con un aditivo químico tiene una variación de -11.67%. respecto a la mezcla asfáltica convencional.

- Aditivo químico Quimibond

La Tabla siguiente muestra la variación de la estabilidad Marshall de una mezcla asfáltica en caliente y una mezcla asfáltica tibia con un 0.8% del aditivo Quimibond, a estas mezclas se compacto a temperaturas de 140 °C, 130 °C y 120C°.

Tabla 29: Cuadro comparativo de fluencia de estabilidad Marshall de una mezcla asfáltica tibia con aditivo químico Quimibond respecto a una mezcla asfáltica en caliente.

TEMPERATURA	FLUENCIA MARSHALL (mm)			
COMPACTADO	MAC	Δ	MAT + QUMINBOND 0.8%	Δ
140	3.21	0.00%	3.24	0.93%
130	3.56	10.90%	3.68	14.64%
120	3.94	22.74%	3.81	18.69%

Fuente: Comportamiento de las mezclas asfálticas tibias adicionando tensoactivos y sus beneficios respecto a las mezclas asfálticas en caliente

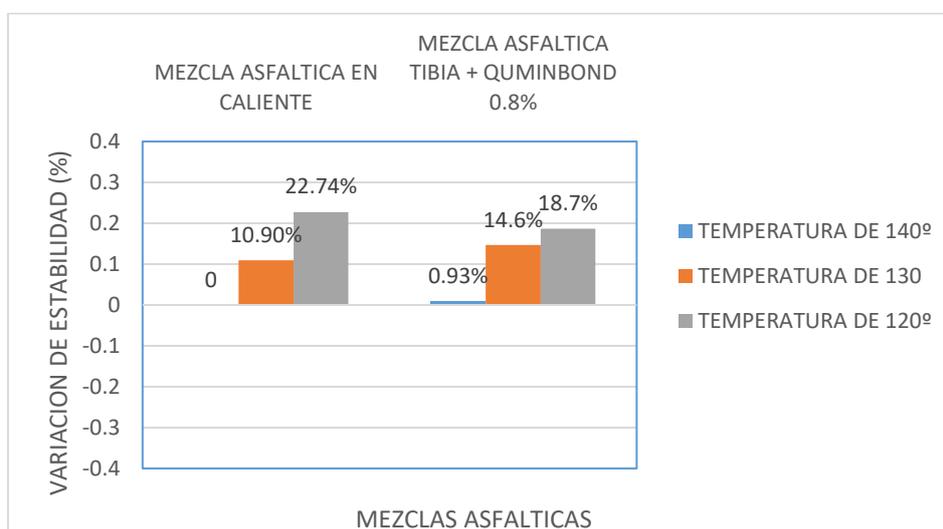


Figura 16: Variación de fluencia Marshall de mezcla asfáltica tibia con Quimibond 0.8% respecto a una mezcla asfáltica en caliente.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en la figura, la mezcla asfáltica convencional a una temperatura de 120 °C sufre una variación de 22.74 % en la fluencia Marshall, respecto a una mezcla asfáltica en caliente a una temperatura de 140°C, mientras que una mezcla asfáltica tibia con un aditivo químico Quimibond tiene una variación de 18.7%. respecto a la mezcla asfáltica convencional.

- Variación de fluencia de la mezcla asfáltica tibia usando aditivo HUSIL

En la tabla 29 muestra la variación de fluencia de la mezcla asfáltica tibia respecto a la mezcla asfáltica en caliente, para esto se desarrolló el diseño de una mezcla

asfáltica en caliente con el óptimo contenido de asfalto de 5%, temperatura de compactación de 150 °C y fluencia de 3.66 mm, luego se pasa a diseñar la mezcla asfáltica tibia con este mismo contenido de asfalto de 5% y se le añade 1% de aditivo HUSIL con relación al peso del cemento asfáltico y se toman datos de estabilidad a temperaturas de compactación de 130 °C, 120 °C y 110 °C.

Tabla 30: Cuadro comparativo de fluencia de estabilidad Marshall de una mezcla asfáltica tibia con aditivo químico Husil respecto a una mezcla asfáltica en caliente.

TEMPERATURA (C°)	FLUJO (mm)		
	0% HUSIL	1% HUSIL	VARIACION
150	3.66	-	0.00%
130	-	3.66	0.00%
120	-	3.84	4.92%
110	-	3.76	2.73%

Fuente: Comportamiento de las mezclas asfálticas tibias adicionando tensoactivos y sus beneficios respecto a las mezclas asfálticas en caliente

En la figura 17 se muestra la variación de fluencia de una mezcla asfáltica tibia con aditivo HUSIL a 1% en peso del cemento asfáltico a diferentes temperaturas de compactación respecto a la mezcla asfáltica en caliente.

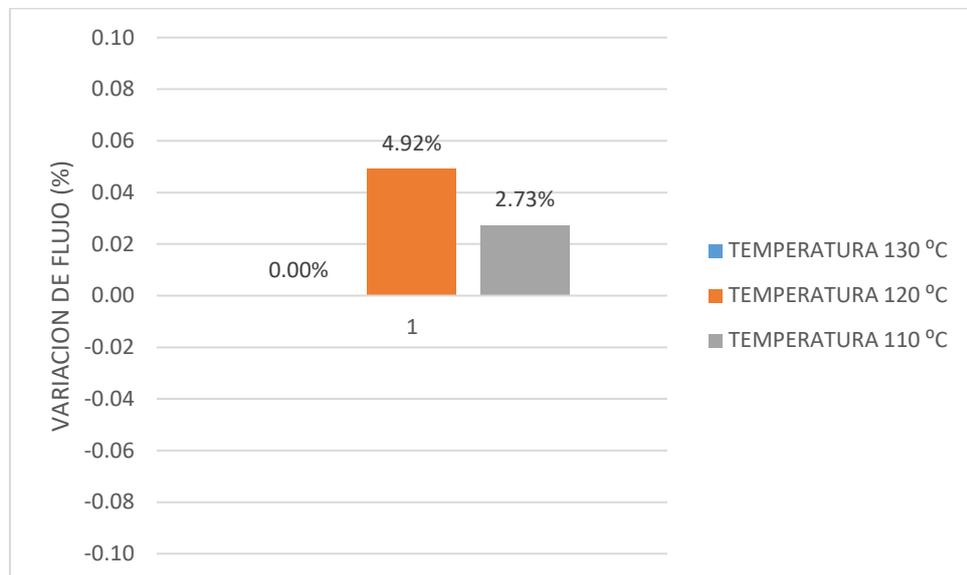


Figura 17: Variación de fluencia Marshall de mezcla asfáltica tibia con Husil 1% respecto a una mezcla asfáltica en caliente.

Fuente: Elaboración propia

De la figura 17 se observa que la mayor variación de fluencia de la mezcla asfáltica tibia respecto a la mezcla asfáltica en caliente al usar aditivo HUSIL a 1% en peso del cemento asfáltico y a una temperatura de compactación de 120 °C es de 4.92%, mientras que la menor variación es de 0.00% y se da a una temperatura de compactación de 130 °C, si bien existe una variación en la fluencia cabe mencionar que los valores de fluencia mostrados en la tabla 29 de las mezclas asfálticas tibias cumplen con la condición descritos en INVIAS (2013) donde para categoría de tránsito NT2 se manejan rangos de fluencia entre (2mm – 4mm).

- Variación de estabilidad de mezcla asfáltica en tibia usando aditivo químico GENAMIN BTA y KAOMIN KW

En la tabla 20 se muestra la variación de fluencia de mezclas asfálticas tibias adicionado con GENAMIN BTA Y KAOMIN KW respecto a una mezcla asfáltica en caliente, para esto se desarrolla el diseño de una mezcla asfáltica en caliente con el contenido óptimo de asfalto de 5.1% y fluencia de 3.15 mm, posteriormente se hace el diseño de mezclas asfálticas tibias con aditivos modificadores de viscosidad GENAMIN BTA al 2% , GENAMIN BTA al 3%, KAOMIN KW al 2% y KAOMIN KW al 3% en relación al peso del cemento asfáltico y se toman los datos de fluencia a diferentes temperaturas de producción y compactación.

Tabla 31: Cuadro comparativo de fluencia de estabilidad Marshall de una mezcla asfáltica tibia con aditivos químicos Genamin BTA al 3% y Kaomin KW al 2% respecto a una mezcla asfáltica en caliente.

CEMENTO ASFALTICO (%)	TEMPERATURA DE PRODUCCION (°C)		TEMPERATURA DE COMPACTACION (°C)		FLUJO (mm)	VARIACION DE FLUJO (%)
5.1% CAP PEN 60/70	146	154	135	141	3.15	0.00%
5.1% CAP PEN 60/70 Y GENAMIN BTA AL 2%	132	135	125	129	3.42	8.57%

5.1% CAP PEN 60/70 Y GENAMIN BTA AL 3%	126	130	121	124	3.34	6.03%
5% CAP PEN 60/70 Y KAOMIN KW AL 2%	132	137	127	129	3.41	8.25%
5% CAP PEN 60/70 Y KAOMIN KW AL 3%	128	131	121	124	3.41	8.25%

En la figura 18 se muestra la variación de fluencia de las mezclas asfálticas tibias adicionado con aditivos modificadores de viscosidad GENAMIN BTA y KAOMIN KW con respecto a las mezclas asfálticas en caliente.

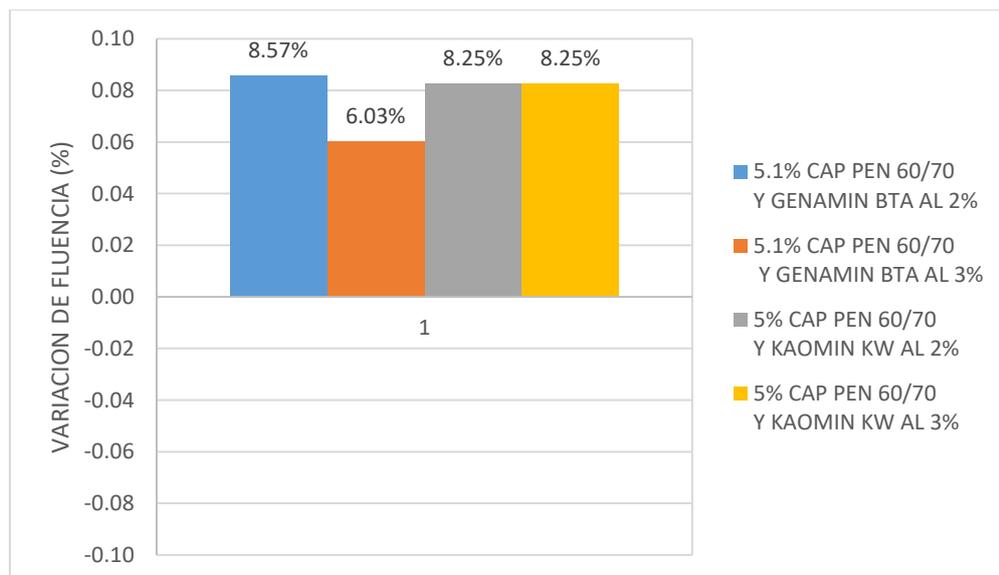


Figura 18 Variación de fluencia Marshall de mezcla asfáltica tibia con Genamin BTA al 2% y Kaomin KW al 3% respecto a una mezcla asfáltica en caliente.

Fuente: Elaboración propia

De la figura 18 se observa que la mayor variación de fluencia de una mezcla asfáltica tibia respecto a la mezcla asfáltica en caliente es de 8.57% y se da al usar una mezcla asfáltica tibia con un contenido óptimo de asfalto de 5.1% y la adición del aditivo GENAMIN BTA al 2% y una que la menor variación de fluencia es de 6.03% y se da al usar una mezcla asfáltica tibia con un contenido

óptimo de asfalto de 5.1% y la adición del aditivo GENAMIN BTA al 3%, si bien existe una variación en la fluencia cabe mencionar que valores de fluencia mostrados en la tabla Nro 4 de las mezclas asfálticas tibias cumplen con la condición descritos en INVIAS (2013) donde para categoría de transito NT3 se manejan rangos de fluencia entre (2.0 mm – 3.5 mm).

- Flujo en las mezclas asfálticas tibias con el proceso de espumado
 - Mezcla asfáltica tibia adicionando Zeolita

La Tabla 31 muestra la variación de fluencia Marshall de una mezcla asfáltica en caliente y una mezcla asfáltica tibia con porcentajes de 0.3%, 0.6% y 0.9% de Zeolita, a estas mezclas fueron sometidas a temperaturas de mezclado de 140 °C, 130 °C y 125C°; y a temperaturas de compactado de 120 °C, 110 °C y 105C°.

Tabla 32: Cuadro comparativo de variación de fluencia Marshall de una mezcla asfáltica tibia con Zeolita respecto a una mezcla asfáltica en caliente.

TEMPERATURA		FLUENCIA MARSHALL (mm)							
MEZCLAD O	COMPACTAD O	MAC	Δ	MAT + 0.3% ZEOLIT A	Δ	MAT + 0.6% ZEOLIT A	Δ	MAT + 0.9% ZEOLIT A	Δ
150 °C	135 °C	3.73	0	-	-	-	-	-	-
140 °C	120 °C	3.39	- 9.12 %	3.89	4.29%	3.81	2.14 %	3.73	0.00 %
130 °C	110 °C	3.56	- 4.56 %	3.81	2.14%	3.82	2.41 %	3.83	2.68 %
125 °C	105 °C	3.56	- 4.56 %	3.98	6.70%	3.64	- 2.41 %	3.81	2.14 %

Fuente: Incidencias de la adición de zeolita natural a la mezcla asfáltica en su comportamiento mecánico

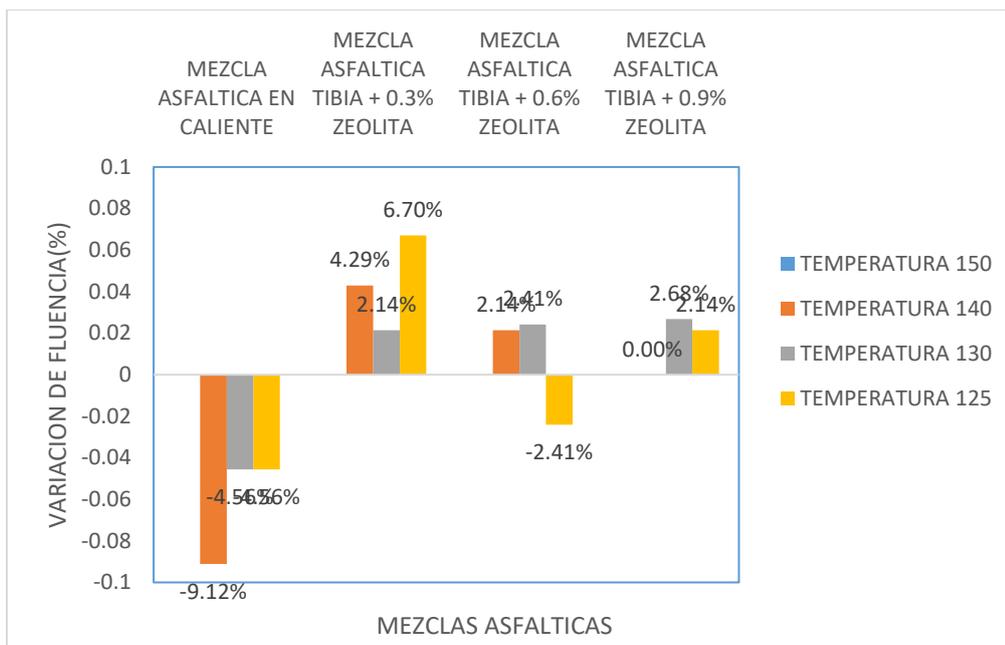


Figura 19: Variación de fluencia Marshall de mezcla asfáltica tibia con Zeolita respecto a una mezcla asfáltica en caliente.

Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo a la figura 19 podemos observar que hay una variación mínima de la fluencia, y que concentración de zeolita de 0.9% es la más recomendable si se desea mantener la fluencia Marshall.

7.1.3 Relación estabilidad/flujo en las mezclas asfálticas tibias y las mezclas asfálticas en caliente

- Variación de la relación estabilidad/fluencia en las mezclas asfálticas tibias con aditivos orgánicos
 - Aditivo orgánico con aceite crudo de Palma

En las siguientes tablas se muestra los resultados de los ensayos de la relación estabilidad/fluencia Marshall realizada a mezclas asfálticas tibias adicionando diferentes porcentajes del aditivo orgánico aceite crudo de Palma. El aditivo se clasificó de tipo A, que es de procedencia artesanal; mientras que el tipo B es de procedencia industrial. Y también se muestra la variación de la estabilidad respecto a la mezcla asfáltica en caliente. Todas estas mezclas se llevaron a una temperatura de mezclado de 150 °C.

Tabla 33: Cuadro comparativo de variación de la relación estabilidad/fluencia Marshall de una mezcla asfáltica tibia con aditivo orgánico Aceite crudo de Palma tipo A respecto a una mezcla asfáltica en caliente.

TEMPERATURA	ESTABILIDAD/FLUENCIA MARSHALL (kg/cm)											
MEZCLADO	MAC	MAC	MAT + ACP 0.5%	Δ	MAT + ACP 1.0%	Δ	MAT + ACP 1.5%	Δ	MAT + ACP 2.0%	Δ	MAT + ACP 2.5%	Δ
150 °C	1258	0	1306	3.79%	1357	7.85%	1620	28.75%	1698	34.93%	1184	-5.90%

Fuente: Diseño de una mezcla asfáltica tibia con aceite crudo de Palma

Tabla 34: Cuadro comparativo de variación de la relación estabilidad/fluencia Marshall de una mezcla asfáltica tibia con aditivo orgánico Aceite crudo de Palma tipo B respecto a una mezcla asfáltica en caliente.

TEMPERATURA	ESTABILIDAD/FLUENCIA MARSHALL (kg/cm)											
MEZCLADO	MAC	MAC	MAT + ACP 0.5%	Δ	MAT + ACP 1.0%	Δ	MAT + ACP 1.5%	Δ	MAT + ACP 2.0%	Δ	MAT + ACP 2.5%	Δ
50 °C	1258	0	1978	57.21%	1604	27.44%	1344	6.85%	1803	43.30%	1634	29.83%

Fuente: Diseño de una mezcla asfáltica tibia con aceite crudo de Palma

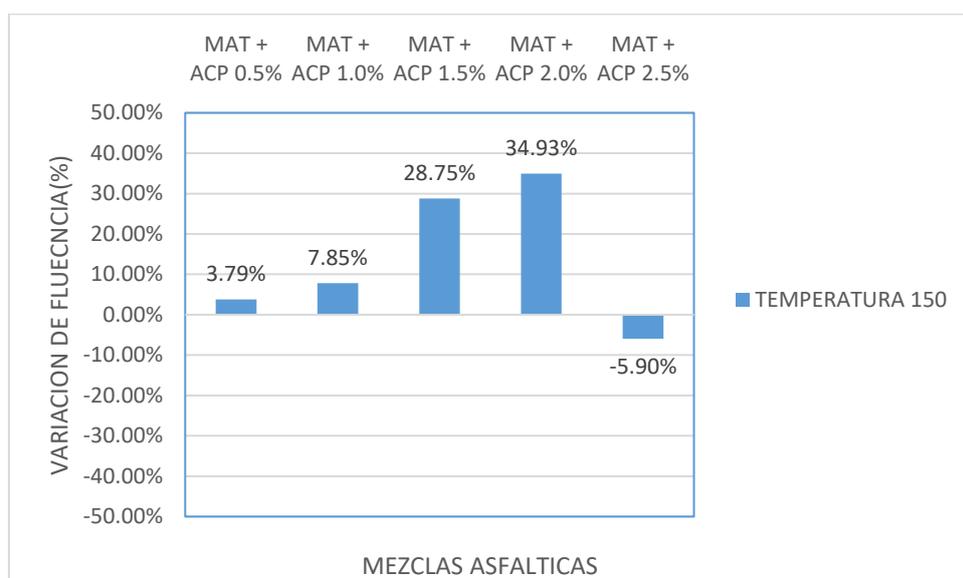


Figura 20: Variación de estabilidad/fluencia Marshall de mezcla asfáltica tibia para tránsito liviano con aceite crudo de palma tipo "A" respecto a la mezcla asfáltica en caliente.

Fuente: Elaboración propia

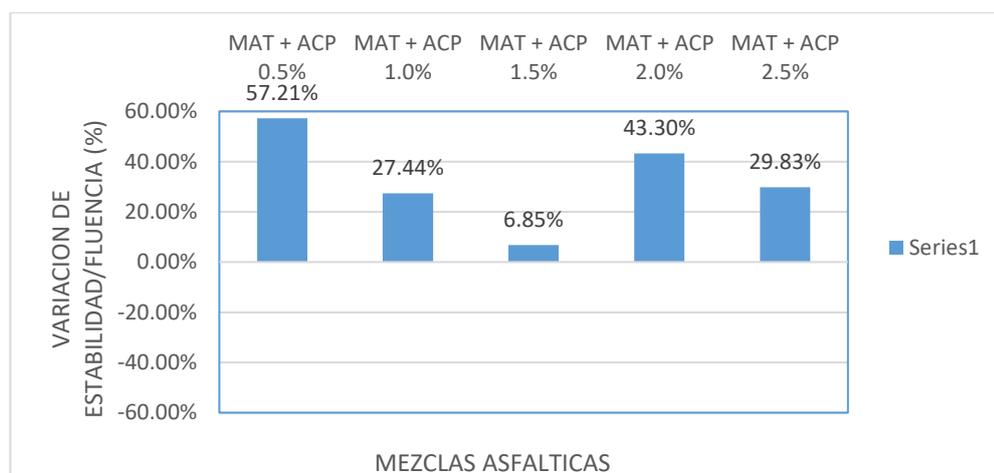


Figura 21: Variación de estabilidad/fluencia Marshall de mezcla asfáltica tibia para tránsito liviano con aceite crudo de palma tipo "B" respecto a la mezcla asfáltica en caliente.

Fuente: Elaboración propia

Como se muestra en las figuras 20 y 21 la variación mínima se presenta en una mezcla asfáltica tibia con un 2% de aditivo orgánico aceite crudo de Palma.

o Aditivo orgánico Sasobit

Tabla 35: Cuadro comparativo de variación de la relación estabilidad/fluencia Marshall de una mezcla asfáltica tibia con aditivo orgánico Sasobit respecto a una mezcla asfáltica en caliente.

TEMPERATURA	ESTABILIDAD/FLUENCIA MARSHALL (kg/cm)					
	MAC	VARIACION DE MAC	MAT + SASOBIT 3%	VARIACION DE MAT + 3% SASOBIT	MAT + SASOBIT 8%	VARIACION DE MAT + 8% SASOBIT
140	3244	0	-	-	-	-
130	-	-	4550	40.27%	-	-
110	-	-	-	-	2515	-44.72%

Fuente: Elaboración propia

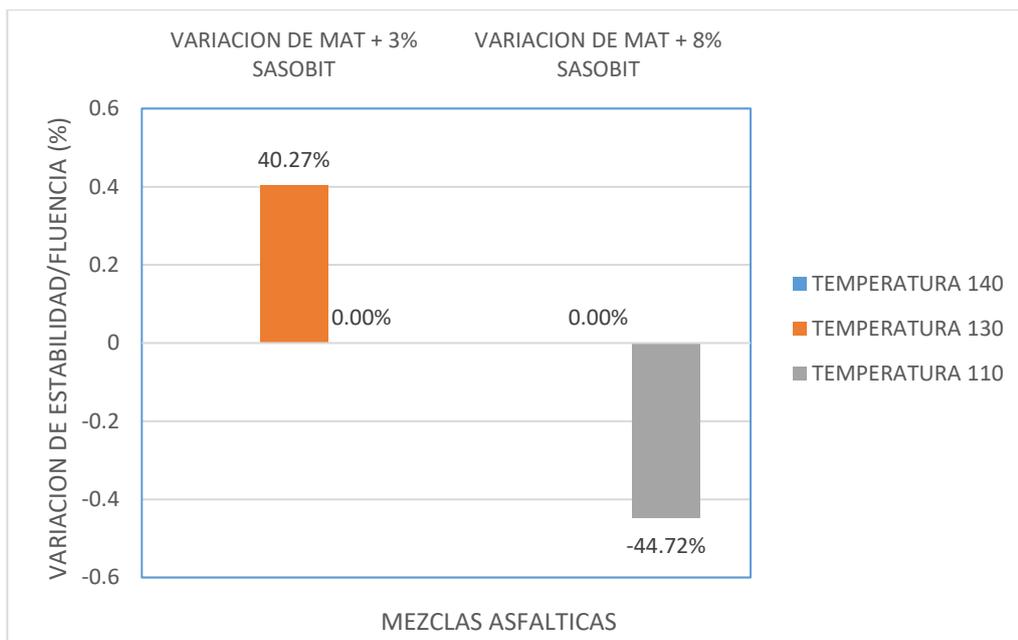


Figura 22: Variación de estabilidad Marshall de mezcla asfáltica tibia con aditivo Sasobit respecto a la mezcla asfáltica en caliente.

Fuente: Elaboración propia

- Variación de la relación estabilidad/flujo en las mezclas asfálticas tibias con aditivos químicos
 - Aditivo químico Zycotherm

La Tabla siguiente muestra la variación de la estabilidad Marshall de una mezcla asfáltica en caliente y una mezcla asfáltica tibia con un 0.15% del aditivo Zycotherm, a estas mezclas se las compacto a temperaturas de 140 °C, 130 °C y 120°C.

Tabla 36: Cuadro comparativo de variación de la relación estabilidad/fluencia Marshall de una mezcla asfáltica tibia con aditivo químico Zycotherm respecto a una mezcla asfáltica en caliente.

TEMPERATURA	ESTABILIDAD/FLUENCIA MARSHALL (kg/cm)			
	MAC	Δ	MAT + ZYCOTHERM 0.15%	Δ
140	3869	0	3949	-3.12%
130	3202	-17.24%	3245	6.85%

120	2335	-39.65%	2784	22.74%
-----	------	---------	------	--------

Fuente: Comportamiento de las mezclas asfálticas tibias adicionando tensoactivos y sus beneficios respecto a las mezclas asfálticas en caliente

En la siguiente Figura se muestra el porcentaje de variación de la estabilidad Marshall de las mezclas asfálticas evaluadas y compactadas a diferentes temperaturas.

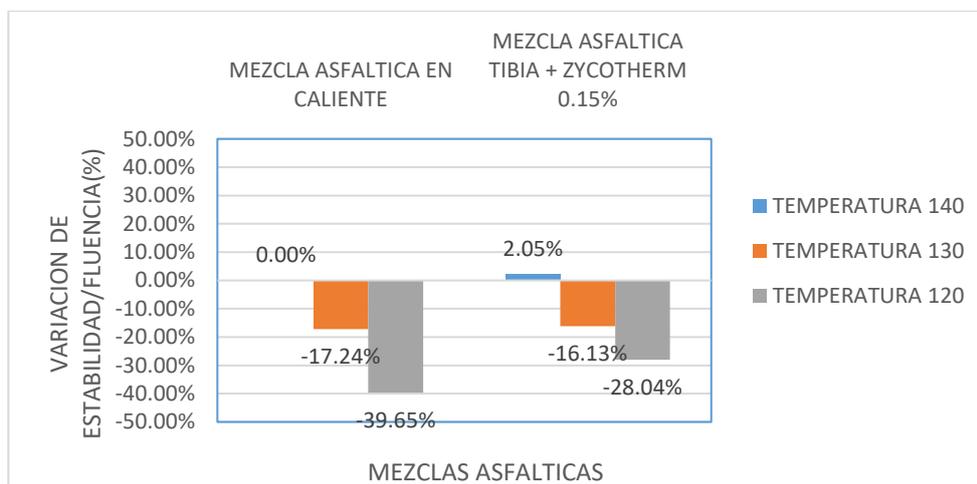


Figura 23: Variación de fluencia Marshall de mezcla asfáltica tibia con Zycotherm 0.15% respecto a una mezcla asfáltica en caliente.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en la figura 23, la mezcla asfáltica convencional a una temperatura de 120 °C sufre una variación de -39.65 % en la relación estabilidad/fluencia Marshall, respecto a una mezcla asfáltica en caliente a una temperatura de 140°C, mientras que una mezcla asfáltica tibia con un aditivo químico tiene una variación de -28.04%. respecto a la mezcla asfáltica convencional.

○ Aditivo químico Quimibond

La Tabla 37 se muestra la variación de la relación estabilidad/fluencia Marshall de una mezcla asfáltica en caliente y una mezcla asfáltica tibia con un 0.8% del aditivo Quimibond, a estas mezclas se compacto a temperaturas de 140 °C, 130 °C y 120C°.

Tabla 37: Cuadro comparativo de la relación de estabilidad/fluencia Marshall de una mezcla asfáltica tibia con aditivo químico Quimibond respecto a una mezcla asfáltica en caliente.

TEMPERATURA	ESTABILIDAD/FLUENCIA MARSHALL (kg/cm)			
	MAC	Δ	MAT + QUMINBOND 0.8%	Δ
140	3869	0	3873	0.11%
130	3202	-17.24%	3052	-21.13%
120	2335	-39.65%	2606	-32.64%

Fuente: Comportamiento de las mezclas asfálticas tibias adicionando tensoactivos y sus beneficios respecto a las mezclas asfálticas en caliente

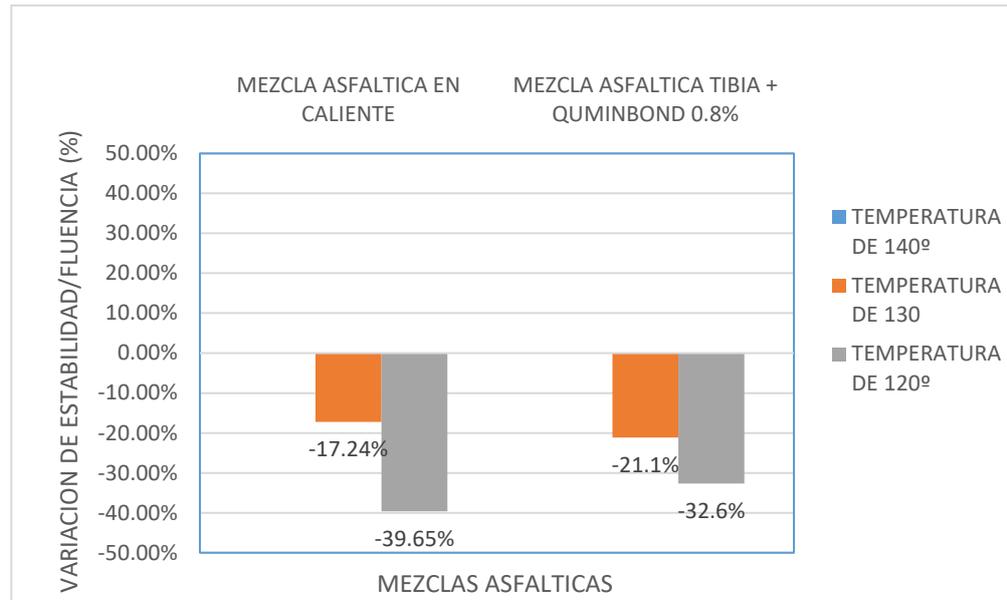


Figura 24: Variación de la relación estabilidad/fluencia Marshall de mezcla asfáltica tibia con Quimibond 0.8% respecto a una mezcla asfáltica en caliente.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en la figura 24, la mezcla asfáltica convencional a una temperatura de 120 °C sufre una variación de -39.65 % en la relación estabilidad/fluencia Marshall, respecto a una mezcla asfáltica en caliente a una temperatura de 140°C, mientras que una mezcla asfáltica tibia con un aditivo químico Quimibond tiene una variación de -32.6%. respecto a la mezcla asfáltica convencional.

- Variación de la relación estabilidad/flujo en una mezcla asfáltica tibia usando aditivo HUSIL

En la tabla 38 se muestra la variación de la relación estabilidad/fluencia de la mezcla asfáltica tibia respecto a la mezcla asfáltica en caliente, para esto se desarrolló el diseño de una mezcla asfáltica en caliente con el óptimo contenido

de asfalto de 5%, temperatura de compactación de 150 °C y relación estabilidad/fluencia de 3437.5 kg/cm, luego se pasa a diseñar la mezcla asfáltica tibia con este mismo contenido de asfalto de 5% y se le añade 1% de aditivo HUSIL con relación al peso del cemento asfáltico obteniéndose los valores de relación estabilidad/fluencia a las temperaturas de compactación de 130 °C, 120 °C y 110 °C.

Tabla 38: Cuadro comparativo de la relación de estabilidad/fluencia Marshall de una mezcla asfáltica tibia con aditivo químico Husil respecto a una mezcla asfáltica en caliente.

TEMPERATURA (C°)	ESTABILIDAD/FLUJO (Kg/cm)			
	COMPACTADO	0% HUSIL	1% HUSIL	VARIACION
150	3437.5	-	-	0.00%
130	-	3760.8	-	9.41%
120	-	3377.7	-	-1.74%
110	-	3389.3	-	-1.40%

Fuente: Comportamiento de las mezclas asfálticas tibias adicionando tensoactivos y sus beneficios respecto a las mezclas asfálticas en caliente

En la figura 25 se muestra la variación de relación estabilidad/fluencia de una mezcla asfáltica tibia con aditivo HUSIL a 1% en peso del cemento asfáltico a diferentes temperaturas de compactación respecto a la mezcla asfáltica en caliente.

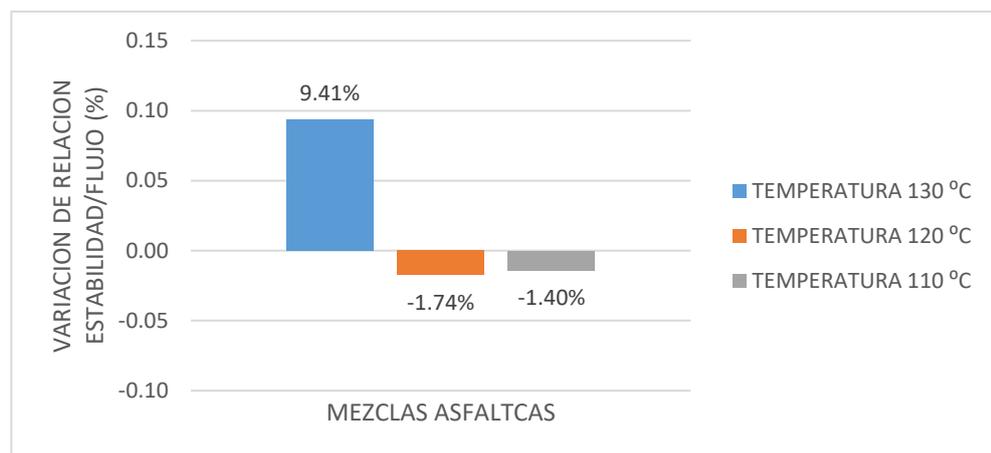


Figura 25: Variación de la relación estabilidad/fluencia Marshall de mezcla asfáltica tibia con Husil 1% respecto a una mezcla asfáltica en caliente.

Fuente: Elaboración Propia

De la figura 25 se observa que la mayor variación de relación estabilidad/fluencia de la mezcla asfáltica tibia respecto a la mezcla asfáltica en caliente al usar aditivo

HUSIL a 1% en peso del cemento asfáltico y es de 9.41% y se da a una temperatura de compactación de 130°C, mientras que la menor variación es -1.40% y se da a una temperatura de compactación de 110 °C, si bien existe una variación en la relación estabilidad/fluencia cabe mencionar que los valores de relación estabilidad/fluencia mostrados en la tabla Nro 5 de las mezclas asfálticas tibias cumplen con la condición descritos en INVIAS (2013) donde para categoría de tránsito NT2 se manejan rangos de relación estabilidad/fluencia entre (3059.1 Kg/cm – 5098.6 Kg/cm).

- Variación de la relación estabilidad/flujo usando el aditivo GENAMIN y KAOWIN

En la tabla 39 se muestra la variación de relación estabilidad/fluencia de mezclas asfálticas tibias adicionado con GENAMIN BTA Y KAOMIN KW respecto a una mezcla asfáltica en caliente, para esto se desarrolla el diseño de una mezcla asfáltica en caliente con el contenido óptimo de asfalto de 5.1% el cual tiene como valor de relación estabilidad/fluencia de 4047.4 Kg/cm, posteriormente se hace el diseño de mezclas asfálticas tibias con aditivos modificadores de viscosidad GENAMIN BTA al 2% , GENAMIN BTA al 3%, KAOMIN KW al 2% y KAOMIN KW al 3% en relación al peso del cemento asfáltico y obteniéndose los valores de relación estabilidad/fluencia a diferentes temperaturas de producción y compactación.

Tabla 39: Cuadro comparativo de la relación de estabilidad/fluencia Marshall de una mezcla asfáltica tibia con aditivo químico Genamin BTA al 3% y Kaomin KW al 2% respecto a una mezcla asfáltica en caliente.

CEMENTO ASFÁLTICO (%)	TEMPERATURA DE PRODUCCION (°C)		TEMPERATURA DE COMPACTACION (°C)		ESTABILIDAD/FLUJO (Kg/cm)	VARIACION DE ESTABILIDAD/FLUJO (%)
5.1% CAP PEN 60/70	146	154	135	141	4047.24	0.00%
5.1% CAP PEN 60/70 Y GENAMIN BTA AL 2%	132	135	125	129	3647.60	-9.87%
5.1% CAP PEN 60/70 Y GENAMIN BTA AL 3%	126	130	121	124	3844.64	-5.01%

5% CAP PEN 60/70 Y KAOMIN KW AL 2%	132	137	127	129	3816.66	-5.70%
5% CAP PEN 60/70 Y KAOMIN KW AL 3%	128	131	121	124	3997.14	-1.24%

En la figura 26 se muestra la variación de relación estabilidad/fluencia de las mezclas asfálticas tibias adicionado con aditivos modificadores de viscosidad GENAMIN BTA y KAOMIN KW con respecto a las mezclas asfálticas en caliente.

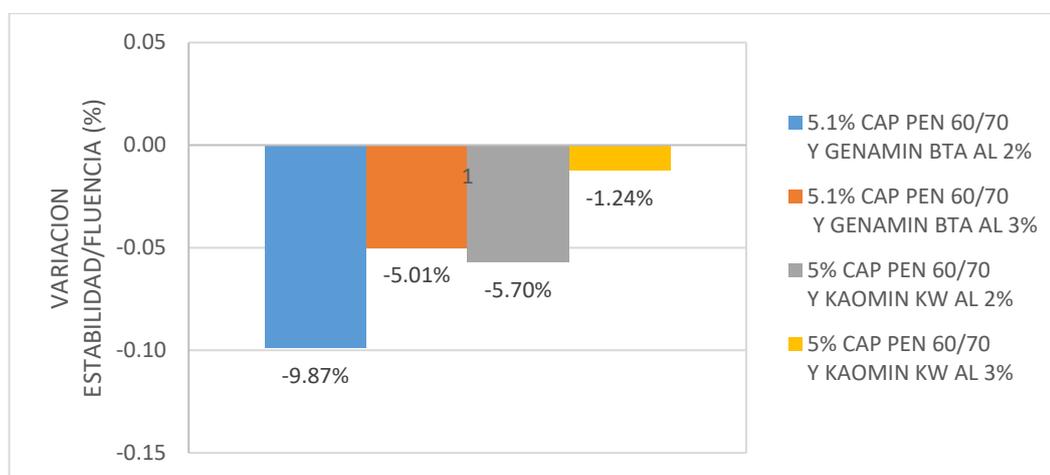


Figura 26: Variación de la relación estabilidad/fluencia Marshall de mezcla asfáltica tibia con Husil 1% respecto a una mezcla asfáltica en caliente.

Fuente: Elaboración propia

De la figura 26 se observa que la mayor variación de relación estabilidad/fluencia de una mezcla asfáltica tibia respecto a la mezcla asfáltica en caliente es de -9.87% y se da al usar una mezcla asfáltica tibia con un contenido óptimo de asfalto de 5.1% y la adición del aditivo GENAMIN BTA al 2% y una que la menor variación de relación estabilidad/fluencia es de -1.24% y se da al usar una mezcla asfáltica tibia con un contenido óptimo de asfalto de 5.0% y la adición del aditivo KAOMIN KW al 3%, si bien existe una variación en la relación estabilidad/fluencia cabe mencionar que los valores de relación estabilidad/fluencia mostradas en la tabla Nro 6 de las mezclas asfálticas tibias cumplen con la condición descritos en INVIAS (2013) donde para categoría de

transito NT3 se manejan rangos de fluencia entre (3059.1 Kg/cm – 6118.3 Kg/cm).

- Variación de la relación estabilidad/flujo en las mezclas asfálticas tibias con el proceso de espumado
 - Mezcla asfáltica tibia adicionando Zeolita

La Tabla 40 se muestra la variación de la relación estabilidad/fluencia Marshall de una mezcla asfáltica en caliente y una mezcla asfáltica tibia con porcentajes de 0.3%, 0.6% y 0.9% de Zeolita, a estas mezclas fueron sometidas a temperaturas de mezclado de 140 °C, 130 °C y 125°C; y a temperaturas de compactado de 120 °C, 110 °C y 105°C.

Tabla 40: Cuadro comparativo de variación de la relación estabilidad/fluencia Marshall de una mezcla asfáltica tibia con Zeolita respecto a una mezcla asfáltica en caliente.

TEMPERATURA		ESTABILIDAD/FLUENCIA MARSHALL (kg/cm)							
MEZCLADO	COMPACTADO	MAC	Δ	MAT + 0.3% ZEOLITA	Δ	MAT + 0.6% ZEOLITA	Δ	MAT + 0.9% ZEOLITA	Δ
150 °C	135 °C	3367	0	-	-	-	-	-	-
140 °C	120 °C	3354	-0.40%	2694	-19.99%	2803	-16.75%	3016	-10.43%
130 °C	110 °C	3020	-10.32%	2877	-14.57%	2990	-11.22%	2869	-14.78%
125 °C	105 °C	2576	-23.50%	2138	-36.50%	2409	-28.45%	2541	-24.55%

Fuente: Incidencias de la adición de zeolita natural a la mezcla asfáltica en su comportamiento mecánico

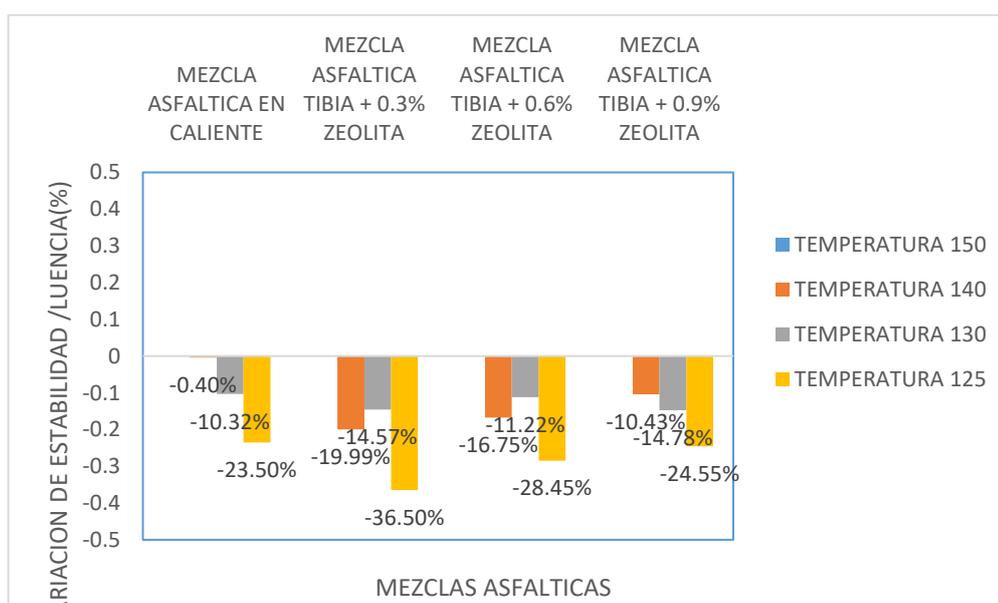


Figura 27: Variación de la relación estabilidad/fluencia Marshall de mezcla asfáltica tibia con Zeolita respecto a una mezcla asfáltica en caliente.

Fuente: Elaboración propia

La figura 27 nos muestra como la relación estabilidad/fluencia varia significativamente cuando este se encuentra a una temperatura de 125 °C. Siendo la menor variación de -24.55% de la relación estabilidad/fluencia respecto a la mezcla asfáltica en caliente.

7.2 Variación promedio de la estabilidad Marshall al utilizar las tecnologías de producción de mezclas asfálticas tibias respecto a las mezclas asfálticas en caliente

En la tabla 41 se encuentran las diferentes tecnologías de mezclas asfálticas tibias a las cuales se les comparó con las mezclas asfálticas en caliente, el porcentaje muestra la variación, si esta aumenta o disminuye el valor de la propiedad mecánica de estabilidad Marshall. También se muestra el promedio de todas las variaciones como el máximo y mínimo de los datos analizados.

Tabla 41: Variación en estabilidad de las diferentes tecnologías de producción de mezclas asfálticas tibias respecto a las mezclas asfálticas en caliente.

Mezcla asfáltica	Variación en estabilidad
MAT + ZYCOTHERM 0.15% (140 °C)	-1.13%
MAT + ZYCOTHERM 0.15% (130 °C)	-10.39%
MAT + ZYCOTHERM 0.15% (120 °C)	-11.67%
MAT + QUMINBOND 0.8% (140 °C)	1.05%
MAT + QUMINBOND 0.8% (130 °C)	-9.58%
MAT + QUMINBOND 0.8% (120 °C)	-20.05%
MAT + ZEOLITA 0.3% (140 °C)	-16.56%
MAT + ZEOLITA 0.3% (130 °C)	-12.74%
MAT + ZEOLITA 0.3% (125 °C)	-32.25%
MAT + ZEOLITA 0.6% (140 °C)	-14.97%
MAT + ZEOLITA 0.6% (130 °C)	-9.08%
MAT + ZEOLITA 0.6% (125 °C)	-30.18%
MAT + ZEOLITA 0.9% (140 °C)	-10.43%
MAT + ZEOLITA 0.9% (130 °C)	-12.50%
MAT + ZEOLITA 0.9% (125 °C)	-22.93%
MAT + ZEOLITA 2.0% (100°C)	-2.36%
MAT + ACP TIPO A 0.5% (150°C)	-16.99%
MAT + ACP TIPO A 1.0% (150°C)	10.93%
MAT + ACP TIPO A 1.5% (150°C)	-11.72%
MAT + ACP TIPO A 2.0% (150°C)	19.47%
MAT + ACP TIPO A 2.5% (150°C)	-31.44%
MAT + ACP TIPO B 0.5% (150°C)	30.31%
MAT + ACP TIPO B 1.0% (150°C)	-9.01%

MAT + ACP TIPO B 1.5% (150°C)	-5.39%
MAT + ACP TIPO B 2.0% (150°C)	2.32%
MAT + ACP TIPO B 2.5% (150°C)	14.96%
MAT + SASOBIT 3% (130 °C)	6.87%
MAT + SASOBIT 3% (110 °C)	-27.45%
MAT + HUSIL A 1% (130°C)	9.37%
MAT + HUSIL A 1% (120°C)	3.07%
MAT + HUSIL A 1% (110°C)	1.27%
MAT + GENAMIN BTA AL 2% (125°C)	-2.15%
MAT + GENAMIN BTA AL 3% (121°C)	0.72%
MAT + KAOMIN KW AL 2% (127°C)	2.09%
MAT + KAOMIN KW AL 3% (121°C)	6.91%
PROMEDIO	-6.05%
MAXIMO	30.31%
MINIMO	-32.25%

Fuente: Elaboración propia.

De análisis realizado se obtiene que el promedio de la variación en estabilidad de las diferentes tecnologías de producción de las mezclas asfálticas es de -6.05%. Así mismo el rango de la variación es un máximo de 30.31% y un mínimo de -32.25%.

7.3 Variación promedio de la fluencia Marshall al utilizar las tecnologías de mezclas asfálticas tibias respecto a las mezclas asfálticas en caliente

En la tabla 42 se encuentran las diferentes tecnologías de mezclas asfálticas tibias a las cuales se les comparó con las mezclas asfálticas en caliente, el porcentaje muestra la variación, si esta aumenta o disminuye el valor de la propiedad mecánica de fluencia Marshall. También se muestra el promedio de todas las variaciones como el máximo y mínimo de los datos analizados.

Tabla 42: Variación en fluencia de las diferentes tecnologías de producción de mezclas asfálticas tibias respecto a las mezclas asfálticas en caliente.

Mezcla asfáltica	Variación en fluencia
MAT + ZYCOTHERM 0.15% (140 °C)	-3.12%
MAT + ZYCOTHERM 0.15% (130 °C)	6.85%
MAT + ZYCOTHERM 0.15% (120 °C)	22.74%
MAT + QUMINBOND 0.8% (140 °C)	0.93%
MAT + QUMINBOND 0.8% (130 °C)	14.64%
MAT + QUMINBOND 0.8% (120 °C)	18.69%
MAT + ZEOLITA 0.3% (140 °C)	4.29%
MAT + ZEOLITA 0.3% (130 °C)	2.14%
MAT + ZEOLITA 0.3% (125 °C)	6.70%
MAT + ZEOLITA 0.6% (140 °C)	2.14%
MAT + ZEOLITA 0.6% (130 °C)	2.41%

MAT + ZEOLITA 0.6% (125 °C)	-2.41%
MAT + ZEOLITA 0.9% (140 °C)	0.00%
MAT + ZEOLITA 0.9% (130 °C)	2.68%
MAT + ZEOLITA 0.9% (125 °C)	2.14%
MAT + ZEOLITA 2.0% (100°C)	3.03%
MAT + ACP TIPO A 0.5% (150°C)	-20.03%
MAT + ACP TIPO A 1.0% (150°C)	2.86%
MAT + ACP TIPO A 1.5% (150°C)	-31.43%
MAT + ACP TIPO A 2.0% (150°C)	-11.46%
MAT + ACP TIPO A 2.5% (150°C)	-27.14%
MAT + ACP TIPO B 0.5% (150°C)	-17.11%
MAT + ACP TIPO B 1.0% (150°C)	-28.60%
MAT + ACP TIPO B 1.5% (150°C)	-11.46%
MAT + ACP TIPO B 2.0% (150°C)	-28.60%
MAT + ACP TIPO B 2.5% (150°C)	-11.46%
MAT + SASOBIT 3% (130 °C)	-23.81%
MAT + SASOBIT 3% (110 °C)	31.25%
MAT + HUSIL A 1% (130°C)	0.00%
MAT + HUSIL A 1% (120°C)	4.92%
MAT + HUSIL A 1% (110°C)	2.73%
MAT + GENAMIN BTA AL 2% (125°C)	8.57%
MAT + GENAMIN BTA AL 3% (121°C)	6.03%
MAT + KAOMIN KW AL 2% (127°C)	8.25%
MAT + KAOMIN KW AL 3% (121°C)	8.25%
PROMEDIO	-1.55%
MAXIMO	31.25%
MINIMO	-31.43%

Fuente: Elaboración propia.

De análisis realizado se obtiene que el promedio de la variación en fluencia de las diferentes tecnologías de producción de las mezclas asfálticas es de -1.55%. Así mismo el rango de la variación es un máximo de 31.25% y un mínimo de -31.43%.

7.4 Variación promedio de la relación estabilidad/fluencia Marshall al utilizar las tecnologías de mezclas asfálticas tibias respecto a las mezclas asfálticas en caliente

En la tabla 43 se encuentran las diferentes tecnologías de mezclas asfálticas tibias a las cuales se les comparó con las mezclas asfálticas en caliente, el porcentaje muestra la variación, si esta aumenta o disminuye el valor de la propiedad mecánica de la relación estabilidad/fluencia Marshall. También se muestra el promedio de todas las variaciones como el máximo y mínimo de los datos analizados.

Tabla 43: Variación en la relación estabilidad/fluencia de las diferentes tecnologías de producción de mezclas asfálticas tibias respecto a las mezclas asfálticas en caliente

Mezcla asfáltica	Variación en estabilidad/fluencia
MAT + ZYCOTHERM 0.15% (140 °C)	2.05%
MAT + ZYCOTHERM 0.15% (130 °C)	-16.13%
MAT + ZYCOTHERM 0.15% (120 °C)	-28.04%
MAT + QUMINBOND 0.8% (140 °C)	0.11%
MAT + QUMINBOND 0.8% (130 °C)	-21.13%
MAT + QUMINBOND 0.8% (120 °C)	-32.64%
MAT + ZEOLITA 0.3% (140 °C)	-19.99%
MAT + ZEOLITA 0.3% (130 °C)	-14.57%
MAT + ZEOLITA 0.3% (125 °C)	-36.50%
MAT + ZEOLITA 0.6% (140 °C)	-16.75%
MAT + ZEOLITA 0.6% (130 °C)	-11.22%
MAT + ZEOLITA 0.6% (125 °C)	-28.45%
MAT + ZEOLITA 0.9% (140 °C)	-10.43%
MAT + ZEOLITA 0.9% (130 °C)	-14.78%
MAT + ZEOLITA 0.9% (125 °C)	-24.55%
MAT + ZEOLITA 2.0% (100°C)	-5.23%
MAT + ACP TIPO A 0.5% (150°C)	3.79%
MAT + ACP TIPO A 1.0% (150°C)	7.85%
MAT + ACP TIPO A 1.5% (150°C)	28.75%
MAT + ACP TIPO A 2.0% (150°C)	34.93%
MAT + ACP TIPO A 2.5% (150°C)	-5.90%
MAT + ACP TIPO B 0.5% (150°C)	57.21%
MAT + ACP TIPO B 1.0% (150°C)	27.44%
MAT + ACP TIPO B 1.5% (150°C)	6.85%
MAT + ACP TIPO B 2.0% (150°C)	43.30%
MAT + ACP TIPO B 2.5% (150°C)	29.83%
MAT + SASOBIT 3% (130 °c)	40.27%
MAT + SASOBIT 3% (110 °c)	-44.72%
MAT + HUSIL A 1% (130°C)	9.41%
MAT + HUSIL A 1% (120°C)	-1.74%
MAT + HUSIL A 1% (110°C)	-1.40%
MAT + GENAMIN BTA AL 2% (125°C)	-9.87%
MAT + GENAMIN BTA AL 3% (121°C)	-5.01%
MAT + KAOMIN KW AL 2% (127°C)	-5.70%
MAT + KAOMIN KW AL 3% (121°C)	-1.24%
PROMEDIO	-1.83%
MAXIMO	57.21%
MINIMO	-44.72%

Fuente: Elaboración propia

De análisis realizado se obtiene que el promedio de la variación en fluencia de las diferentes tecnologías de producción de las mezclas asfálticas es de -3.10%. Así mismo el rango de la variación es un máximo de 57.21% y un mínimo de -44.72%.

7.5 Contrastación de Hipótesis

7.5.1 Hipótesis específica 1

Hipótesis Alterna (H1): “La variación de la estabilidad Marshall entre las mezclas asfálticas tibias producidas con diferentes tecnologías respecto a las mezclas asfálticas en caliente se encuentra en el rango de -15% a 15%.”.

Hipótesis Nula (H0): “La variación de la estabilidad Marshall entre las mezclas asfálticas tibias producidas con diferentes tecnologías respecto a las mezclas asfálticas en caliente no se encuentra en el rango de -15% a 15%.”.

De acuerdo a la investigación realizada y como se muestra en la tabla 41 se tiene que la variación de estabilidad Marshall de las mezclas asfálticas tibias producidas con diferentes tecnologías respecto a las mezclas asfálticas en caliente se encuentra comprendido en el rango de -32.25% a 30.31%.

Por lo tanto, se verifica la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis alterna.

7.5.2 Hipótesis específica 2

Hipótesis Alterna (H1): “La variación de la fluencia Marshall entre las mezclas asfálticas tibias producidas con diferentes tecnologías respecto a las mezclas asfálticas en caliente se encuentra en el rango de -15% a 15%”.

Hipótesis Nula (H0): “La variación de la fluencia Marshall entre las mezclas asfálticas tibias producidas con diferentes tecnologías respecto a las mezclas asfálticas en caliente no se encuentra en el rango de -15% a 15%”.

De acuerdo a la investigación realizada y como se muestra en la tabla 42 se tiene que la variación de la fluencia Marshall de las mezclas asfálticas tibias producidas con diferentes tecnologías respecto a las mezclas asfálticas en caliente se encuentra comprendido en el rango de -31.43% a 31.25%.

Por lo tanto, se verifica la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis alterna.

7.5.3 Hipótesis específica 3

Hipótesis Alternativa (H1): “La variación de la relación estabilidad/fluencia Marshall entre las mezclas asfálticas tibias producidas con diferentes tecnologías respecto a las mezclas asfálticas en caliente se encuentra en el rango de -15% a 15%”.

Hipótesis Nula (H0): “La variación de la relación estabilidad/fluencia Marshall entre las mezclas asfálticas tibias producidas con diferentes tecnologías respecto a las mezclas asfálticas en caliente no se encuentra en el rango de -15% a 15%”.

De acuerdo a la investigación realizada y como se muestra en la tabla 43 se tiene que la variación de la relación estabilidad/fluencia Marshall de las mezclas asfálticas tibias producidas con diferentes tecnologías respecto a las mezclas asfálticas en caliente se encuentra comprendido en el rango de -44.72% a 57.21%.

Por lo tanto, se verifica la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis alternativa.

7.6 Aporte de la investigación

La presente investigación tuvo como finalidad mostrar las ventajas y desventajas al utilizar las diferentes tecnologías de producción de mezclas asfálticas tibias respecto a las mezclas asfálticas en caliente, para ello se hizo el análisis de variación de estabilidad, fluencia y la relación estabilidad/fluencia Marshall. Del análisis realizado podemos demostrar lo siguiente:

1. Se tiene un mejor conocimiento del comportamiento mecánico de las diferentes tecnologías de producción de mezclas asfálticas tibias.
2. Se conoce las diferentes ventajas y desventajas al usar las tecnologías de producción de mezclas asfálticas tibias respecto a las mezclas asfálticas en caliente.

CONCLUSIONES

1. De acuerdo al análisis realizado en la investigación y tomando como datos los resultados de ensayos realizados en investigaciones nacionales e internacionales realizados anteriormente, se concluye que la variación de las propiedades mecánicas de estabilidad, fluencia y relación estabilidad/fluencia obtenidas del ensayo Marshall de las mezclas asfálticas tibias producidas con diferentes tecnologías respecto a las mezclas asfálticas en caliente se encuentra comprendida en el rango de -44.72% a 57.21%.
2. Luego de hacer el análisis de investigación y tomando como datos los resultados de ensayos realizados en investigaciones anteriores, se llega a la conclusión que la variación de estabilidad obtenidas del ensayo Marshall de las mezclas asfálticas tibias producidas con diferentes tecnologías respecto a las mezclas asfálticas en caliente se encuentra comprendida en el rango de -32.25% a 30.31%.
3. Tomando como datos los resultados de ensayos realizados en investigaciones anteriores y luego del análisis de la presente investigación, se concluye que la variación de la fluencia obtenidas del ensayo Marshall de las mezclas asfálticas tibias producidas con diferentes tecnologías respecto a las mezclas asfálticas en caliente se encuentra comprendida en el rango de -31.43% y 31.25%.
4. Con el análisis realizado en la presente investigación y tomando como datos los resultados de ensayos realizados en investigaciones anteriores, se llega a la conclusión que la variación de la relación estabilidad/fluencia obtenidas del ensayo Marshall de las mezclas asfálticas tibias producidas con diferentes tecnologías respecto a las mezclas asfálticas en caliente se encuentra comprendida en el rango de -44.72% y 57.21%.
5. El promedio de la variación de la estabilidad obtenidas del ensayo Marshall de las mezclas asfálticas tibias producidas con diferentes tecnologías respecto a las mezclas asfálticas en calientes es -6.05%, el promedio de la variación de fluencia es -1.55% y el promedio de la variación de relación estabilidad/fluencia es -1.83%.

6. La menor variación de estabilidad obtenidas del ensayo Marshall de las mezclas asfálticas tibias producidas con diferentes tecnologías respecto a las mezclas asfálticas en caliente es 0.72%, dicha variación se presenta cuando se usa mezcla asfáltica tibia con Genamin BTA al 3% a una temperatura de 121 °C.
7. La menor variación de fluencia obtenidas del ensayo Marshall de las mezclas asfálticas tibias producidas con diferentes tecnologías respecto a las mezclas asfálticas en caliente es 0%, dicha variación se presenta cuando se usa mezcla asfáltica tibia con zeolita a 0.09% y con una temperatura de 140 °C.
8. La menor variación de la relación estabilidad/fluencia obtenidas del ensayo Marshall de las mezclas asfálticas tibias producidas con diferentes tecnologías respecto a las mezclas asfálticas en caliente es 0.11% , dicha variación se presenta cuando se usa mezcla asfáltica tibia con Quimibond a 0.8% y con una temperatura de 140 °C.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda el posterior estudio de ensayos de desempeño al usar las diferentes tecnologías de mezclas asfálticas tibias y la variación de resultados respecto a las mezclas asfálticas en caliente.
2. Se recomienda el uso de mezclas asfálticas tibias con aditivo Quimibond 0.8% y a una temperatura de 140 °C, ya que para este tipo de mezcla asfáltica tibia las variaciones de estabilidad, fluencia, y relación estabilidad fluencia son mínimas.
3. Se recomienda el uso de compactadores giratorios para una mejor compactación de las mezclas asfálticas, puesto el pisón Marshall al ser manual puede presentar compactaciones no uniformes.
4. Se debe verificar que el aditivo incorporado en el cemento asfáltico se mezcle de manera homogénea, ya que influye en el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas tibias.
5. Debido a que la trabajabilidad no se ve influenciado en gran magnitud por la temperatura de las mezclas asfálticas tibias y por la baja velocidad de cambio de temperatura, se recomienda estas tecnologías en zonas frías.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASOPAC. (2004). *Cartilla de pavimento asfáltico*.
- Bonilla Miranda, E. (2013). *Determinación del tipo de cemento asfáltico según el grado de desempeño, de acuerdo con la zonificación climática y las cargas de tránsito del país*. Universidad de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Civil, San José.
- Castro Mariño, J. E. (2017). *Evaluación de la capacidad estructural de una mezcla asfáltica tibia MDC-19 utilizando aditivos modificadores de viscosidad*. Universidad Católica de Colombia, Bogotá.
- Córdoba Maquilón, J. E., Senior Arrieta, V., & Johana Posada, D. (2020). *Mezclas asfálticas tibias: una alternativa eficaz para la construcción de pavimentos medioambientalmente amigables*. Universidad Nacional de Colombia.
- D'Angelo, J., Harm, E., Bartoszek, J., Baumgardner, G., & Corrigan, M. (2008). *Warm-Mix Asphalt: European Practice*.
- EG-MTC. (2013). *MANUAL DE CARRETERAS EG-2013*.
- Eroski, C. (2020). *Consumer.es*. Obtenido de Recuperado de www.consumer.es/
- Flores Gonzales, R. K., & Rojas Pardo, J. G. (2019). *COMPORTAMIENTO DE LAS MEZCLAS ASFÁTICAS TIBIAS ADICIONANDO TENSOACTIVOS Y SUS BENEFICIOS RESPECTO A LAS MEZCLAS ASFÁTICAS EN CALIENTE*. (Tesis de Pregrado)Lima-Peru.
- Garnica Anguas, P., Delgado Alamilla, H., & Sandoval Sandoval, C. D. (2005). *Análisis comparativo de los métodos Marshall y SUPERPAVE para compactación de mezclas asfálticas*. Instituto Mexicano del Transporte, Ciudad de México.
- Garnica Anguas, P., Flores Flores, M., Gómez López, J. A., & Delgado Alamilla, H. (2005). *Caracterización Geomecánica de mezclas asfálticas*. Instituto Mexicano del Transporte, Ciudad de Mexico.
- Hurley, G. C., & Prowell, B. D. (2005). *Evaluación of Aspha-min zeolite for use in warm mix asphalt, NCAT Report 05-04*. National Center of Asphalt Technology, USA.
- Labic, L. (2012). *Investigación de nuevas mezclas de baja energía para la rehabilitación superficial*. España.

- Lesme Brun, J. G. (2015). *Estudio del comportamiento de mezclas asfálticas tibias (mezclas templadas) empleando emulsiones súper-estabilizadas*. Pontificia Universidad Católica De Chile, Santiago de Chile.
- Mallick, R. B., & El-Korchi, T. (2013). *Ingeniería de pavimentos principios y práctica*. New York: Taylor & Francis Group, LLC.
- Mamani Mamani, L. A. (2018). *Incidencias de la adición de Zeolita natural a la mezcla asfáltica en su comportamiento mecánico*. Universidad Ricardo Palma, Lima.
- Miró Recasens, R. (2006). *Nuevas mezclas para capas de rodadura y su influencia en el confort (ruido) y la seguridad*. Universidad Politécnica de Cataluña, Zaragoza.
- Palacios Conrado, L., & Córdoba Maquilon, J. E. (2013). *Diseño y producción de mezclas asfálticas tibias, a partir de la mezcla de asfalto y aceite crudo de Palma*. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Rodríguez Rojas, N., & Sánchez Morales, J. J. (2016). *Desarrollo de una mezcla asfáltica tibia reciclada bajo criterios técnicos y medioambientales*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá.
- Rondón Quintana, H. A., & Reyes Lizcano, F. A. (2015). *Pavimentos materiales, construcción y diseño*. Bogotá: Ecoe Ediciones.
- Sasobit. (2012). *Warm Asphalt Mix- Technologies, Research and Experience*.
- Ulloa, A. (2011). *Mezclas asfálticas tibias*. Programa de infraestructura del transporte.
- Valeriano Turpo, W., & Catacora Mendoza, A. (2017). *Comportamiento del diseño de mezcla asfáltica tibia, con adición de zeolita para la pavimentación de la ciudad Juliaca*. Universidad Nacional Del Altiplano, Escuela Profesional de Ingeniería Civil. Juliaca: Tesis de Pregrado.
- Vargas, X., & Reyes, F. (2009). *El fenómeno de envejecimiento de los asfaltos*. Ingeniería e Investigación.
- W. Button, J., Estakhri, C., & Wimsatt, A. (2007). *A SYNTHESIS OF WARM-MIX ASPHALT*. Texas Transportation Institute.