

UNIVERSIDAD RICARDO PALMA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE TITULACIÓN POR TESIS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



**INFLUENCIA DEL CAUCHO RECICLADO UTILIZADO COMO
AGENTE MODIFICANTE EN LOS PARÁMETROS DE DISEÑO
DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA**

TESIS
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO CIVIL

PRESENTADA POR:

Bach. MACEDO SEMINARIO, SERGIO ALEJANDRO

Bach. URETA TOLENTINO, CRISTIAN WILLYAMS

Asesor: M. Sc. Ing. HUAMÁN GUERRERO, NÉSTOR WILFREDO

LIMA – PERÚ

2020

DEDICATORIA

A mis padres, Tomás y Jessica por su constante apoyo y motivación; a mis hermanos, Ana, Aarón y Natalia por estar siempre en los buenos y malos momentos.

A mis abuelos, Camu, Chela y Ben-Hur por brindarme su amor y apoyo; a mis Padrinos, Momo y Ronny por su apoyo.

A toda mi familia y amigos por todo su apoyo, cariño y consejos brindados.

Sergio Alejandro Macedo Seminario

A mi madre Yolanda Tolentino C. y a mis hermanos, Jeremías, Raquel, Marco, Josías y Kimberly por su absoluto apoyo y enseñanza, por permanecer constantes en mi desarrollo y formación, por ser fuente de mi inspiración.

A mi novia Xiomara M. S. por todo su apoyo incondicional y su constante motivación para lograr mis metas. Por último, pero no menos importante, a todos mis amigos que formaron parte de este logro.

Cristian Willyams Ureta Tolentino

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a Dios, a nuestras familias, y a todas las personas que estuvieron e hicieron que esto sea posible.

Sergio A. Macedo Seminario y Cristian W. Ureta Tolentino

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	xv
ABSTRACT.....	xvi
INTRODUCCIÓN.....	1
1. CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.1 Formulación y delimitación del problema	2
1.1.1 Problema general.....	4
1.1.2 Problemas Específicos	4
1.2 Importancia y justificación del estudio	4
1.3 Limitaciones del estudio	5
1.4 Objetivos	6
1.4.1 Objetivo Principal	6
1.4.2 Objetivos Específicos	6
2. CAPITULO II: MARCO TEÓRICO	7
2.1. Marco Histórico	7
2.1.1. Marco Histórico del Asfalto.....	7
2.1.2. Marco Histórico del Caucho	10
2.2. Investigaciones relacionadas.....	11
2.2.1. Investigaciones Nacionales	11
2.2.2. Investigaciones Internacionales.....	16
2.3. Estructura teórica	26
2.3.1. Asfalto	26
2.3.2. Mezclas Asfálticas	26
2.3.3. Mezclas asfálticas en caliente (MAC).....	27
2.3.3.1. Composición de las mezclas asfálticas en caliente.....	30
2.3.3.2. Materiales de las mezclas asfálticas en caliente	32
2.3.3.3. Requisitos de las mezclas asfálticas en caliente	37
2.3.3.4. Parámetros Diseño Marshall de las mezclas asfálticas en caliente... ..	39
2.3.4. Aplicaciones del caucho de neumático (NFU).....	54
2.3.4.1. El polvo de caucho	55
2.3.4.2. Consideraciones técnicas	56
2.3.4.3. Consideraciones medioambientales.....	59
2.3.4.4. Características físicas del caucho en polvo	60

2.3.4.5. Métodos de recuperación de material presente en los neumáticos.....	62
2.3.5. Volumen de llantas reciclado en el uso de mezclas asfálticas	63
2.3.6. Técnicas de utilización de polvo de caucho en mezclas asfálticas	65
2.3.6.1. Proceso por vía seca	65
2.3.6.2. Proceso por vía húmeda.....	68
2.3.7. Método de diseño de mezclas asfálticas convencionales	69
2.3.7.1. Ensayo Marshall	69
2.3.8. Método de diseño de mezclas asfálticas modificadas con caucho	71
2.3.9. Desempeño de las mezclas Asfálticas.....	73
2.3.9.1. Resistencia a la deformación Permanente	73
2.3.9.2. Modulo resiliente a la tensión indirecta.....	74
2.3.9.3. Resistencia a la fatiga	77
2.4. Experiencia de la Implementación de caucho reciclado de llantas como agente modificante en proyectos de pavimentación	78
2.4.1. Empleo de caucho dentro de Norteamérica	78
2.4.2. Empleo de caucho dentro de Europa.....	81
2.4.2.1. Alemania.....	81
2.4.2.2. España.....	83
2.5. Normas técnicas y Manuales del uso del caucho.....	87
2.5.1. Manual de Carreteras: Especificaciones técnicas generales RD N° 22-2013-MTC/14, Perú 2013.	87
2.5.2. Manual del empleo del caucho NFU en mezclas bituminosas, España 2007.....	87
2.5.3. Norma N-CMT-4-05-002-06, México 2006.	88
2.5.4. Demás normas y manuales.....	90
2.6. Ventajas y desventajas de la utilización del caucho reciclado.....	90
2.6.1. Ventajas de su empleo.....	90
2.6.2. Desventajas de su empleo	91
2.7. Definición de términos básicos	92
3. CAPITULO III: SISTEMA DE HIPÓTESIS	94
3.1. Hipótesis General.....	94
3.2. Hipótesis Específicas	94
3.3. Variables	95
3.3.1. Definición Conceptual de las Variables	95
3.3.2. Operacionalización de las Variables	96

4. CAPITULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	97
4.1. Tipo y método de investigación	97
4.1.1. Tipo de investigación	97
4.1.2. Método de investigación	97
4.1.3. Diseño de investigación	98
4.1.4. Nivel de investigación.....	99
4.2. Población de estudio	100
4.3. Diseño muestral.....	100
4.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	100
4.5. Procedimientos para la recolección de datos	101
4.6. Técnicas de procesamiento y análisis de datos	101
5. CAPITULO V: DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS CON POLVO DE NEUMÁTICOS.....	102
5.1. Tamaño y forma de las partículas de caucho reciclado	104
5.2. Grado de temperatura de la mezcla asfáltica modificada con caucho	109
5.3. Porcentaje de incorporación de caucho reciclado en la mezcla asfáltica.....	114
5.4. Contenido de asfalto dentro de la mezcla modificada con caucho	119
5.5. Contenido de vacíos de aire dentro de la mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho.....	121
5.6. Grado de VMA dentro de las mezclas asfálticas modificadas con caucho.....	124
5.7. Densidad obtenida dentro de las mezclas asfálticas modificadas con caucho ..	127
5.8. Valor de la Estabilidad dentro de las mezclas modificadas con caucho.....	130
5.9. Valor del Flujo dentro de las mezclas modificadas con caucho	133
5.10.Resultado de las pruebas de ensayo de Desempeño de las mezclas asfálticas convencionales y mezclas asfálticas modificadas con caucho.....	136
5.10.1. Resistencia a la Fatiga de las mezclas asfálticas modificadas frente a las convencionales	136
5.10.2. Resultados del ensayo de modulo resiliente de las mezclas asfálticas modificadas frente a las convencionales	138
5.10.3. Resistencia a la compresión diametral de las mezclas asfálticas modificadas frente a las convencionales.....	140
6. CAPITULO VI: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN	143
6.1. Análisis correlacional de la recopilación filtrada de la base de datos, resultados en cuanto a los ensayos Marshall de mezclas asfálticas modificadas con caucho.....	143
6.1.1. Análisis correlacional del grado de temperatura, el porcentaje de caucho y contenido de asfalto con respecto al porcentaje de Vacíos dentro de las mezclas modificadas.....	144

6.1.2. Análisis correlacional del grado de temperatura, el porcentaje de caucho y contenido de asfalto con respecto a la Densidad de las mezclas modificadas. .	148
6.1.3. Análisis correlacional del grado de temperatura, el porcentaje de caucho y contenido de asfalto con respecto a los VMA de las mezclas modificadas.....	152
6.1.4. Análisis correlacional del grado de temperatura, el porcentaje de caucho y contenido de asfalto con respecto a la Estabilidad de las mezclas modificadas.....	156
6.1.5. Análisis correlacional del grado de temperatura, el porcentaje de caucho y contenido de asfalto con respecto al Flujo de las mezclas modificadas.	159
6.2. Síntesis del análisis correlacional de la data resultante.....	162
6.3. Contrastación de Hipótesis General y Especificas.....	163
CONCLUSIONES	176
RECOMENDACIONES.....	178
BIBLIOGRAFIA	179
ANEXOS	185
Anexo 1: Matriz de consistencia.....	185
Anexo 2: Infraestructura Vial Existente del Sistema Nacional de Carreteras	186

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Historia del asfalto.....	8
Tabla 2: Desarrollo cronológico del asfalto como Material de Construcción	9
Tabla 3: Gradación de las mezclas asfálticas en caliente	35
Tabla 4: Especificaciones para la gradación cerrada - ASTM D3515.....	35
Tabla 5: Selección del tipo de cemento asfáltico.....	36
Tabla 6: Causas y efectos de la inestabilidad del pavimento.....	45
Tabla 7: Causas y efectos de la baja durabilidad	46
Tabla 8: Causas y efectos de la permeabilidad de la mezcla	47
Tabla 9: Causas y efectos en la trabajabilidad de la mezcla.....	49
Tabla 10: Causas y efectos de la pésima resistencia a la fatiga.....	50
Tabla 11: Causas y efectos de la baja resistencia al deslizamiento	51
Tabla 12: Composición de llantas según el tipo	56
Tabla 13: Huso granulométrico específico para el caucho en polvo	61
Tabla 14: Parque automotor estimado según departamento	64
Tabla 15: Parque automotor y neumáticos fuera de uso en el Perú.....	64
Tabla 16: Tramos construidos con el uso del caucho en las mezclas asfálticas	84
Tabla 17: Tramos construidos con el uso del caucho en las mezclas asfálticas	85
Tabla 18:Obras Españolas realizadas con Asfalto modificado con caucho.....	86
Tabla 19: Especificaciones del cemento asfáltico modificado con caucho	87
Tabla 20:Requisitos de calidad para cementos asfálticos AC-5 y AC-20 modificados .	89
Tabla 21:Requisitos de granulometría para hule molido	90
Tabla 22: Definición de las variables	95
Tabla 23: Operacionalización de variables.....	96
Tabla 24: Investigaciones analizadas en el presente estudio	102
Tabla 25: Base de datos detallado de las investigaciones analizadas para el proceso de incorporación de caucho por vía seca	103
Tabla 26: Detalle del tamaño de caucho utilizado en distintas investigaciones analizadas	104
Tabla 27: Tamaño de partículas usadas con mayor frecuencia por las investigaciones analizadas.....	105
Tabla 28: base de datos de las diferentes temperaturas empleadas en las Investigaciones analizadas.....	109

Tabla 29: Frecuencia de temperaturas empleadas en las diferentes investigaciones analizadas.....	110
Tabla 30: Porcentajes de caucho empleados en las investigaciones analizadas	114
Tabla 31: Frecuencia en el uso de porcentajes de caucho según sus temperaturas empleados en las Investigaciones analizadas.....	115
Tabla 32: Porcentajes de caucho empleado con mayor frecuencia dentro de las investigaciones analizadas	117
Tabla 33: Contenido de asfalto empleado con mayor frecuencia dentro de las investigaciones analizadas	119
Tabla 34: Porcentaje de Vacíos obtenidos acorde al empleo de temperatura, porcentaje de caucho y contenido de asfalto dentro de las mezclas asfálticas de las Investigaciones analizadas.....	121
Tabla 35: Porcentaje de VMA obtenidos acorde al empleo de temperatura, porcentaje de caucho y contenido de asfalto dentro de las mezclas asfálticas de las Investigaciones analizadas.....	124
Tabla 36: Densidad obtenidos acorde al empleo de temperatura, porcentaje de caucho y contenido de asfalto de las mezclas asfálticas de las Investigaciones analizadas	127
Tabla 37: Resultados de la estabilidad acorde al empleo de temperatura, porcentaje de caucho y contenido de asfalto de las mezclas asfálticas de las Investigaciones analizadas.	130
Tabla 38: Resultados del parámetro Flujo acorde al empleo de temperatura, porcentaje de caucho y contenido de asfalto de las mezclas asfálticas de las Investigaciones analizadas.	133
Tabla 39: Resultados de ensayos de fatiga para mezclas asfálticas con 0%, 0.5%, 1.0% y 1.5% de caucho	136
Tabla 40: Resultados de ensayo de Rueda de Hamburgo para mezclas asfálticas con 0% y 0.5% de caucho	137
Tabla 41: Resultados de ensayo Rueda de Hamburgo para mezclas asfálticas con 0% y 0.5% de caucho	137
Tabla 42: Resultados de ensayo Módulo Resiliente para mezclas asfálticas con 0%, 0.5%, 1% y 1.5% de caucho a 25°C y 40°C de temperatura de ensayo.....	138
Tabla 43: Resultados de ensayo de Modulo resiliente y sensibilidad a la temperatura de mezcla asfáltica con 0% y 0.5% de caucho	139

Tabla 44: Resultados de ensayo de Resistencia a la Compresión Diametral de una mezcla asfáltica con 0%, 0.5%, 1% y 1.5% de caucho	140
Tabla 45: Resultados de ensayo de Resistencia a la Compresión Diametral de una mezcla asfáltica con 0% y 0.5% de caucho.....	140
Tabla 46: Resultados de ensayo de Resistencia a la Compresión Diametral de una mezcla asfáltica con 0.25%, 0.5%, 0.75% y 1% de caucho	141
Tabla 47: Porcentaje de vacíos resultante de la modificación de las mezclas asfálticas con caucho obtenidos de las Investigaciones UCV TARAPOTO 2019, UCV CHIMBOTE 2019, URP MAESTRIA 2019, TESIS ECUADOR 2016, URP MAESTRIA 2017, UCV LIMA 2018 I y UCV LIMA 2018.	144
Tabla 48: Densidad resultante de la modificación de las mezclas asfálticas con caucho obtenidos de las Investigaciones UCV TARAPOTO 2019, UCV CHIMBOTE 2019, URP MAESTRIA 2019, TESIS ECUADOR 2016, URP MAESTRIA 2017, UCV LIMA 2018 I y UCV LIMA 2018.	148
Tabla 49: Porcentaje de VMA resultante de la modificación de las mezclas asfálticas con caucho obtenidos de las Investigaciones UCV TARAPOTO 2019, UCV CHIMBOTE 2019, URP MAESTRIA 2019, TESIS ECUADOR 2016, URP MAESTRIA 2017, UCV LIMA 2018 I y UCV LIMA 2018.	152
Tabla 50: Estabilidad resultante de la modificación de las mezclas asfálticas con caucho obtenidos de las Investigaciones UCV TARAPOTO 2019, UCV CHIMBOTE 2019, URP MAESTRIA 2019, TESIS ECUADOR 2016, URP MAESTRIA 2017, UCV LIMA 2018 I y UCV LIMA 2018.	156
Tabla 51: Flujo resultante de la modificación de las mezclas asfálticas con caucho obtenidos de las Investigaciones UCV TARAPOTO 2019, UCV CHIMBOTE 2019, URP MAESTRIA 2019, TESIS ECUADOR 2016, URP MAESTRIA 2017, UCV LIMA 2018 I y UCV LIMA 2018.	159
Tabla 52: Porcentaje de cemento asfáltico utilizados para cumplir los parámetros Marshall	163
Tabla 53: Tabla de distribución T de Student.....	164
Tabla 54: Porcentaje de disminución de la densidad según dosificación de caucho....	165
Tabla 55: Datos iniciales para el desarrollo de prueba T de Student – 1era hipótesis..	166
Tabla 56: Análisis del valor crítico con el software Excel.	166
Tabla 57: Datos para el cálculo del estadístico “t” de prueba – 1era hipótesis.	166

Tabla 58: Porcentaje de incremento del contenido de vacíos al incorporar 0.5% de caucho a diferentes temperaturas.	167
Tabla 59: Datos iniciales para el desarrollo de prueba T de Student – 2da hipótesis...	168
Tabla 60: Análisis del valor crítico con el software Excel.	168
Tabla 61: Datos para el cálculo del estadístico “t” de prueba – 2da hipótesis.....	168
Tabla 62: Porcentaje de disminución del VMA según dosificación de caucho a una temperatura de 170°C	169
Tabla 63: Datos iniciales para el desarrollo de prueba T de Student – 3era hipótesis..	170
Tabla 64: Análisis del valor crítico con el software Excel	170
Tabla 65: Datos para el cálculo del estadístico “t” de prueba – 3ra hipótesis	170
Tabla 66: Porcentaje de incremento del Flujo según dosificación de caucho a una temperatura de 170°C	171
Tabla 67: Datos iniciales para el desarrollo de prueba T de Student – 4ta hipótesis....	172
Tabla 68: Análisis del valor crítico con el software Excel	172
Tabla 69: Datos para el cálculo del estadístico “t” de prueba – 3ra hipótesis	172
Tabla 70: Porcentaje de disminución de la Estabilidad según dosificación de caucho	173
Tabla 71: Desarrollo de prueba T de Student para la H. específica 4 (Estabilidad).....	173
Tabla 72: Análisis de datos mediante Excel para la H. específica 4 (Estabilidad).....	174
Tabla 73: Cálculo estadístico de la prueba T de Student para la H. específica 4 (Estabilidad).....	174

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Estructura típica de pavimento flexible.....	10
Figura 2: Esquema planta de producción continua.....	28
Figura 3: Esquema planta de producción discontinua.....	29
Figura 4: Requerimientos para los agregados gruesos.....	33
Figura 5: Requerimiento para el agregado fino de la mezcla.....	34
Figura 6: Especificaciones del cemento asfáltico clasificado por penetración.....	36
Figura 7: Requisitos para mezclas de concreto bituminoso.....	37
Figura 8: Requisitos de adherencia.....	38
Figura 9: Vacíos mínimos en el agregado mineral (VMA).....	38
Figura 10: Requisitos para mezclas de concreto bituminoso - Parámetros de diseño Marshall.....	39
Figura 11: Esquema del VMA.....	42
Figura 12: Determinación de flujo para el tipo (a) de falla de la muestra.....	53
Figura 13: Determinación de flujo para el tipo (b) de fallas en la muestra.....	54
Figura 14: Composición interna de llantas.....	56
Figura 15: Esquema de fabricación de asfalto modificado con caucho por vía seca.....	66
Figura 16: Esquema de fabricación de asfalto modificado con caucho por vía húmeda.....	69
Figura 17: Máquina para ensayo Wheel Tracking.....	74
Figura 18: Montaje del Ensayo.....	75
Figura 19: Carga típica y deformación vs Relaciones de tiempo para ensayo de tensión indirecta con carga repetida.....	76
Figura 20: Ensayo de deformación controlada.....	77
Figura 21: Cambio en la viscosidad sobre el tiempo de mezclado.....	79
Figura 22: Longitud total en kilómetros de pavimento con caucho por comunidad.....	86
Figura 23: Detalle del tamaño de caucho utilizado en distintas investigaciones analizadas.....	105
Figura 24: Proceso de digestión del caucho.....	107
Figura 25: Profundidad de la huella vs tamaño de caucho.....	107
Figura 26: resistencia a la tensión vs tiempo de aplicación de carga.....	108
Figura 27: resistencia a la tensión vs ciclos de carga.....	108
Figura 28: Frecuencia de temperaturas empleadas en las investigaciones analizadas.....	111
Figura 29: Tendencia de los resultados de las mezclas con 0.5% y 1.0% de caucho y tiempo de digestión de 2 horas.....	112

Figura 30: Resultados de las mezclas P1, M1, M7 y M11.	113
Figura 31: Perdida de propiedades de las mezclas modificadas por aumento de temperatura.	113
Figura 32: Frecuencia en el uso de porcentajes de caucho según sus temperaturas empleados en las investigaciones analizadas.....	116
Figura 33: Porcentajes de caucho empleado con mayor frecuencia dentro de las investigaciones analizadas	118
Figura 34: Contenido de asfalto empleado con mayor frecuencia dentro de las investigaciones analizadas	119
Figura 35: Resistencia a la compresión diametral de las mezclas asfálticas modificadas con caucho a temperaturas de 150, 160 y 170°C.....	142
Figura 36: Requisitos para mezclas de concreto bituminoso - Parámetros de diseño Marshall	143
Figura 37: Tabla de criterios de diseño Marshall según el tráfico inducido.....	143
Figura 38: Porcentaje de vacíos vs Porcentaje de asfalto según temperatura con 2% de caucho	145
Figura 39: Porcentaje de vacíos vs Porcentaje de asfalto según temperatura con 1% de caucho	146
Figura 40: Porcentaje de vacíos vs Porcentaje de asfalto según temperatura con 0.5% de caucho	146
Figura 41: Porcentaje de vacíos vs Porcentaje de asfalto según porcentaje de caucho a 170°C	147
Figura 42: Densidad vs Porcentaje de asfalto según porcentaje de caucho a 150	149
Figura 43: Densidad vs Porcentaje de asfalto según porcentaje de caucho a 160 °C... 150	150
Figura 44: Densidad vs Porcentaje de asfalto según temperatura con 0.5% de caucho 150	150
Figura 45: Densidad vs Porcentaje de asfalto según porcentaje de caucho a 170 °C... 151	151
Figura 46: Densidad vs Porcentaje de asfalto según porcentaje de caucho a 170 °C... 151	151
Figura 47: VMA vs Porcentaje de asfalto según temperatura con 0.5% de caucho	153
Figura 48: VMA vs Porcentaje de asfalto según temperatura con 1% de caucho	154
Figura 49: VMA vs Porcentaje de asfalto según temperatura con 2% de caucho	154
Figura 50: VMA vs Porcentaje de asfalto según porcentaje de caucho a 170 °C.....	155
Figura 51: Estabilidad vs Porcentaje de asfalto según temperatura con 0.5% de caucho	157
Figura 52: Estabilidad vs Porcentaje de asfalto según porcentaje de caucho a 170 °C	158

Figura 53: Estabilidad vs Porcentaje de asfalto según porcentaje de caucho a 150 °C	158
Figura 54: Flujo vs Porcentaje de asfalto según temperatura con 0.5.% de caucho.....	160
Figura 55: Flujo vs Porcentaje de asfalto según temperatura con 1% de caucho.....	161
Figura 56: Flujo vs Porcentaje de asfalto según porcentaje de caucho a 170 °C	161

RESUMEN

Esta investigación de enfoque cuantitativo y no experimental, sintetizó y analizó investigaciones a nivel nacional e internacional, donde mostraban resultados de los parámetros de diseño Marshall y ensayos por desempeño para mezclas asfálticas convencionales y modificadas con caucho, empleando especialmente la incorporación por vía seca, a su vez, detallamos sobre el impacto positivo que conlleva hacer uso de este agente modificador dentro del medio ambiente, las ventajas y desventajas en la parte técnica con base en una revisión bibliográfica. Así mismo, los resultados de estas investigaciones se extrajeron a una base de datos del cual se llevó a cabo un filtro inicial y final, con el objetivo de poder utilizarlos dentro de un único análisis correlacional y estadístico para cada parámetro Marshall, a su vez, se analizaron las variables intervinientes en las mezclas asfálticas modificadas con caucho, tales como el tamaño y forma de partícula, el porcentaje a incorporar de caucho, la temperatura y tiempo de digestión. Todo ello para conocer de qué manera influye la incorporación de caucho dentro de los parámetros de diseño Marshall y a su vez lograr un porcentaje que sea cercano al óptimo.

De esto, se obtuvieron resultados concluyentes, dado a que se cumplió los parámetros Marshall al incorporar 0.5% de caucho a una dosificación de 5.5% de asfalto con una temperatura de 170°C y un tiempo de 2hrs para su digestión, a su vez, se creó una tabla donde se puede modificar estas variables para cumplir con los parámetros Marshall.

Palabras clave: Diseño Marshall, dosificación, ensayos por desempeño, tiempo de digestión, mezcla asfáltica modificada, caucho.

ABSTRACT

This research, with a quantitative and non-experimental approach, synthesized and analyzed research at a national and international level, which showed results of the Marshall design parameters and performance tests for conventional and rubber-modified asphalt mixtures, especially using dry incorporation, to in turn, we detail the positive impact of using this modifying agent within the environment, the advantages and disadvantages in the technical part based on a bibliographic review. Likewise, the results of these investigations were extracted into a database from which an initial and final filter was carried out, in order to be able to use them within a single correlational and statistical analysis for each Marshall parameter, in turn, The variables influencing the modified asphalt mixtures with rubber were analyzed, such as the size and shape of the particle, the percentage of rubber to be incorporated, the temperature and the digestion time. All this to know in what way the incorporation of rubber influences within the Marshall design parameters and in turn achieve a percentage that is close to the optimum.

From this, conclusive results were obtained, given that the Marshall parameters were met by incorporating 0.5% of rubber at a dosage of 5.5% of asphalt with a temperature of 170°C and a time of 2 hours for its digestion, in turn, a table was created where you can modify these variables to meet the Marshall parameters.

Keywords: Marshall design, dosage, performance tests, digestion time, modified asphalt mix, rubber

INTRODUCCIÓN

En Perú no se ha aplicado aún la tecnología de mezclas asfálticas modificados con caucho, esto se debe a que no hay una normativa con los parámetros para la aplicación de esta tecnología. La importancia de implementar esta tecnología es la de mejorar los parámetros de las mezclas, además de que sería beneficioso para el medio ambiente ya que se reciclarían los neumáticos fuera de uso que se encuentran en botaderos para obtener el polvo de caucho. La presente tesis tiene como objetivo mostrar de qué manera influye el caucho de neumático en los parámetros de las mezclas asfálticas en caliente al agregarle polvo de caucho por el proceso de vía seca.

Esta investigación permitirá conocer el comportamiento de la mezcla asfáltica al ser modificada con caucho, en base a los resultados de ensayos obtenidos en investigaciones nacionales e internacionales, lo cual servirá para incentivar el uso de esta tecnología en el Perú.

En el capítulo I, se explica la deficiencia que atraviesa la infraestructura Vial en Perú, así como también, el problema generado por la acumulación de neumáticos fuera de uso; en el capítulo II, se presenta el desarrollo del marco teórico en el cual se incluyen las investigaciones relacionadas al tema y las bases teóricas que permiten entender la investigación; en el capítulo III, se presentan las hipótesis, así como también la definición de las variables y su operacionalización; en el capítulo IV, se presenta la metodología utilizada en el desarrollo de la tesis así como las herramientas empleadas en la recolección de datos; en el capítulo V, se presenta el diseño de las mezclas asfálticas así como el resultado de pruebas de desempeño y en el capítulo VI, se presentan y analizan los resultados obtenidos de la investigación, además se presenta la contrastación de las hipótesis. Por último, se añade las conclusiones y recomendaciones debidamente enfocadas a los resultados obtenidos en el capítulo VI.

CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Formulación y delimitación del problema

Se espera que, para la continuidad del desarrollo vial de nuestro país, se tenga un balance entre el costo que demanda ejecutar una pavimentación, con respecto al tiempo de servicio que brindara sin sufrir daños prematuros.

En la actualidad nuestro país cuenta con una infraestructura vial existente del sistema nacional de carreteras, la cual está compuesta de tres redes de carreteras según superficie de rodadura: red vial nacional (79.6%), red vial departamental (13.5%) y la red vial vecinal (6.9%), siendo de tal modo que solo llevamos un 16% de vías pavimentadas del total de dicha infraestructura vial existente. (MTC. OGGP. Oficina de estadística, 2018)

Así mismo, de acuerdo a los informes provenientes del Ministerio de Transporte en torno a la red vial nacional, en su mayoría se encuentran pavimentos flexibles; tales como carpeta asfáltica o bicapa, en el cual vehículos livianos y pesados circulan continuamente, causando fallas o deterioros de dichas vías, por lo cual es de suma importancia considerar estos miles de kilómetros que atraviesa una vía dirigiéndose por distintas zonas del país, las cuales presentan temperaturas diferentes, llegando a influir en su desempeño a razón de su mezcla asfáltica, ya que se entiende que dicha mezcla al ser convencional tiende a ser susceptible a las variaciones de temperatura que existe en las distintas regiones del Perú, todo ello debido a comportarse como un material visco-elástico, en donde también encontramos que la viscosidad de un cemento asfáltico es inversamente proporcional con el valor de la penetración, teniendo un comportamiento rígido al descender la temperatura y fluida al ascender la temperatura. Por ende, hoy en día las mezclas asfálticas convencionales no son adecuadas para resistir los factores de variación del clima junto al tránsito vehicular, lo que nos lleva a desarrollar y optimizar el uso de agentes modificantes para obtener mejoras en cuanto a sus propiedades mecánicas y físicas, llegando a tener un comportamiento satisfactorio, y a su vez encontrando de tal modo un uso adecuado del grano de caucho reciclado como dicho agente modificante.

Está comprobado que acumulación conjunta entre los neumáticos reciclados y los residuos sólidos biodegradables, es perjudicial para estos últimos, debido a que al juntar ambos residuos sólidos generan las condiciones idóneas para la proliferación

de plagas, roedores, insectos, etc., muchos de los cuales darán lugar a la propagación de enfermedades poniendo en riesgo la salud de las personas que se encuentran alrededor. (Segovia Carhuas & Paco Martinez, 2020, pág. 1)

De tal modo, tomando lo expuesto con anterioridad es que nace la emergencia de búsqueda de un agente modificador el cual mejore las mezclas asfálticas y al mismo tiempo colaboren con el descenso de la contaminación en el ambiente.

Cabe mencionar que la incorporación dicho elastómero (caucho) como aporte a la mejora de las propiedades de las mezclas asfálticas convencionales dependerá de diversos factores, en el cual se encuentra la tecnología de incorporación mediante vía seca o vía húmeda, debido a que interviene un tiempo de digestión para el caso de la vía seca y uno de reacción para el caso de la vía húmeda; de igual manera la granulometría, la dimensión de sus partículas, el grado o porcentaje de adición y la naturaleza de la misma serán los que consoliden la mejora de sus características. Así mismo, dicho material se llega a obtener en diferentes procesos, de los cuales se menciona los principales; la trituración a temperatura ambiente, el cual radica en una trituración mecánica para conseguir diversos tamaños de grano, y trituración criogénica, en donde se somete los neumáticos a temperaturas bajo cero para conseguir pequeñas partículas de caucho.

Dicho lo anterior, este estudio bibliográfico comparativo y analítico de carácter descriptivo, correlacional y no experimental, tiene como base el proceso de incorporación de caucho reciclado en un cemento asfáltico CAP-PEN 60/70, con un rango de temperatura de 150°C – 200°C y mediante un proceso de adición por vía seca, abarcando en tal sentido a realizar una base de datos de los resultados de un ensayo Marshall de distintas investigaciones que tengan dicha base de proceso de incorporación, dando así el principal resultado a alcanzar, el cual es obtener un porcentaje de caucho próximo al adecuado para consolidar un óptimo diseño Marshall de mezcla asfáltica modificada.

1.1.1 Problema general

¿De qué manera influye la incorporación de caucho como agente modificante en los parámetros de diseño de una mezcla asfáltica convencional mediante el proceso de vía seca?

1.1.2 Problemas Específicos

- a) ¿En qué medida la incorporación de caucho mediante el proceso de vía seca influirá en la Densidad de la mezcla?
- b) ¿En qué medida la incorporación de caucho mediante el proceso de vía seca influirá en la presencia de Vacíos con aire?
- c) ¿En qué medida la incorporación de caucho mediante el proceso de vía seca influirá en la presencia de Vacíos de Agregado Mineral de la mezcla asfáltica?
- d) ¿En qué medida la incorporación de caucho mediante el proceso de vía seca influirá en el Flujo y Estabilidad de la mezcla asfáltica?

1.2 Importancia y justificación del estudio

En el contexto actual no es nueva la idea de un desarrollo ecológico o amigable en cuanto a la construcción de vías, no obstante, hoy en día se asume mayor importancia a la participación en el desarrollo sostenible, a lo cual todos los países del mundo se encuentran dirigido. De manera que se tenga un desarrollo la cual es capaz de suplir las necesidades sin comprometer recursos para las generaciones futuras. Abogando a la falta de realizar un criterio que abarque la Tecnología, Economía y Ecología dirigiéndonos a un desarrollo sostenible.

Dicho eso, y entendiendo que alrededor del mundo en muchos países se desechan miles de toneladas de neumáticos por año, las cuales terminan como desechos ambientales no biodegradables y en caso más desfavorable de producir un impacto negativo al emitir CO₂ debido a la quema de llantas, es que se encuentra importante el reciclaje de dicho componente como agente modificante en mezclas asfálticas. Por otro parte, debido a estudios previos se conoce que existen experiencias de uso de mezclas asfálticas modificadas con la adición de caucho en diversos países alrededor del mundo, sin embargo, específicamente dentro de nuestro país se tiene una baja experiencia y uso de dicha incorporación.

Sumado a eso, se conoce el deterioro constate de manera prematura que sufren las mezclas asfálticas convencionales en su tiempo de vida debido al cambio de temperatura extremo a la cual son expuestos a laborar, mostrando de tal forma su principal imperfección propia, de modo que el presente estudio busca procesar los resultados obtenidos de los conocimientos e investigaciones previos confiables y afines con la finalidad que consolidar nuevos conocimientos en cuanto a la influencia en porcentajes de caucho adicionado a las mezclas asfálticas, empleando un método comparativo, identificando el problema, planteado los objetivos, mediante el alcance descriptivo y su aplicación para el beneficio de proyectistas en el campo vial.

Por último, en dicha investigación comparativa de carácter descriptiva, se cuantificará y procesará la base de datos expuestos en los distintos estudios, dicha base obtenida de un ensayo Marshall para los parámetros de diseño, del tal proceso y en función a lo expuesto en dichas investigaciones se tomará decisiones para conseguir un porcentaje próximo al adecuado para el óptimo diseño de mezcla asfáltica en caliente. De manera consecuente esta base de datos cumplirá con las mismas características em cuanto al uso del cemento asfáltico CAP PEN 60/70, incorporando porcentajes de caucho mediante el proceso de vía seca en un rango de temperatura de 150°C a 200°C.

1.3 Limitaciones del estudio

En cuanto al desarrollo de la presente investigación de carácter descriptivo, se planteó como base y de manera significativa para la búsqueda bibliográfica, un diseño de mezcla asfáltica adicionando caucho mediante el proceso de vía seca a un rango de temperatura de 150°C a 200°C, debido a que en la amplia gama de investigaciones se tiene el proceso de vía seca y húmeda, con varios grados de temperatura a las cuales fueron sometidos, así también el dicho cemento asfáltico debe ser un CAP PEN 60/70, todo ello para la homogeneidad y categorización.

Por otro lado, en base a los resultados obtenidos de otras investigaciones dado a dicho estudio bibliográfico, se tiene que esta comprende únicamente ensayos de laboratorio Marshall para los parámetros de diseño (MTC E-504, MTC E-518), de manera que se presenta la limitación en la base de data a dichos resultados de ensayo.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Principal

Determinar de qué manera influye el caucho como agente modificante en los parámetros de diseño de una mezcla asfáltica convencional utilizando el proceso de vía seca, basándonos en información obtenida de investigaciones relacionadas al tema.

1.4.2 Objetivos Específicos

- a) Determinar en qué medida la incorporación de caucho mediante el proceso de vía seca influirá en la Densidad de la mezcla, basándonos en información obtenida de investigaciones relacionadas al tema.
- b) Determinar en qué medida la incorporación de caucho mediante el proceso de vía seca influirá en la presencia de Vacíos con aire, basándonos en información obtenida de investigaciones relacionadas al tema.
- c) Determinar en qué medida la incorporación de caucho mediante el proceso de vía seca influirá en la presencia de Vacíos en el Agregado Mineral (VMA), basándonos en información obtenida de investigaciones relacionadas al tema.
- d) Determinar en qué medida la incorporación de caucho mediante el proceso de vía seca influirá en el Flujo y Estabilidad de la mezcla asfáltica, basándonos en información obtenida de investigaciones relacionadas al tema.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Marco Histórico

2.1.1. Marco Histórico del Asfalto

Los componentes naturales basados del asfalto son mayormente pétreos. El termino asfalto viene derivado del acadio, lengua semítica actualmente extinta hablada en las orillas del Tigris superior, acorde a los años 1400 y 600 A.C. en efecto, dentro de este lugar se encuentran la palabra “Sphalto” la cual significa “lo que hace caer”. Más adelante esta palabra se adoptó en el griego, pasando al latín y en adelante, al francés como asphalte, al inglés como asphalt y al español como asfalto. De acuerdo con estudios arqueológicos, apuntan a que dicho material constructivo es el más antiguo que usado por el hombre.

En cuanto al uso más antiguo para el ámbito de la construcción de dicho material, aproximadamente se remonta al año 3200 A.C. encontrados en excavaciones que fueron ejecutadas en TellAsmer, cerca de Bagdad, permitiendo conocer y grabar que los Sumerios hicieron uso de un mastic, compuesto de betún, minerales finos y paja, o dicho de otro nombre asfalto para construcciones, los estudios constataron que el uso era para pegar ladrillos, en la ejecución de pavimentos internos o como revestimiento impermeable. Por otra parte, antiguamente los egipcios también encontraron otros usos para dicho material, como en momificaciones, rellenando el cuerpo, práctica que se extendió hasta los años 300 A.C. Así mismo, en cuanto a los árabes, tuvieron un desarrollo en cuanto al uso medicinal del asfalto.

En suma, existe un primer antecedente de 1802 en Francia, en el cual se hizo uso de un tipo de asfalto. Más adelante en 1824 la firma Pillot et Eyquem empezó la elaboración de adoquines compuestos de asfalto, la cual para 1837 fueron usados en la Plaza de la Concordia y los Campos Elíseos en Paris como pavimentación. Así también, para 1852 fue implementado el asfalto Val Travers para construir la carretera Paris – Perpiñan, comenzando así una nueva y significativa manera de construcción vial. Por otra parte, para 1869 el procedimiento es introducido en Londres, con dicho asfalto Val de Travers, para continuar Estados Unidos en 1870 realizo lo mismo con dicho ligante.

Luego de esta época, el asfalto se catapultó concretamente inclinándose especialmente al uso vial. Así también, la primera construcción de pavimento como tal, del tipo Sheet Asphalt, se da en 1876 en Washington D.C., con importaciones de asfalto natural. Por consiguiente, para 1900 es que da inicio las primeras mezclas en caliente, las cuales fueron usados en Paris, específicamente en la zona de Rue Du Louvre y también en Avenue Victoria, todo ello diseñada y trabajada con asfalto natural extraída de la isla Trinidad. Para los años siguientes, desde 1902 da inicio al empleo de ligante destilado de petróleo en los EE. UU. debido a sus características resaltantes de pureza, como económicas correspondiente al asfalto natural, usado con anterioridad.

En la actualidad esto constituye una de las principales fuentes de abastecimiento para el ámbito vial. Para finalizar, desde 1920 en México se fueron realizando distintas pruebas y diseños, a sumando la variedad de materiales que fueron usados en riegos profundos y superficiales. Por último, alrededor de los años 30 se llega a hacer uso de las emulsiones asfálticas por primera vez, pero no fue hasta los setenta que, dado a la crisis energética, se llegó a incrementar estudios para este tipo de material, llamados emulsiones asfálticas.

Tabla 1: Historia del asfalto

AÑO	USO
6 000 a.C.	En Sumeria (Oriente Medio – Mesopotamia), se utilizaba en la industria de navegación. La torre de Babel (Babilonia – Baja Mesopotamia) es una de las tantas construcciones en donde se utilizó como mortero.
3 200 – 2600 a.C.	Utilizado por los egipcios para impermeabilizar.
2 600 – 540 a.C.	Excavaciones arqueológicas recientes, indican el amplio uso del asfalto en Mesopotamia y el Valle del Indo como aglomerante para albañilería y construcción de carreteras, así como capas de impermeabilización en estanques y depósitos de agua.
300 a.C.	Se emplea ampliamente en Egipto para embalsamientos.
1 802 d.C.	En Francia se emplea roca asfáltica para pavimentación de suelos, puentes y aceras.
1 803 d.C.	En Filadelfia se emplea roca asfáltica importada en la construcción de aceras.
1 870 d.C.	Construcción del primer pavimento asfáltico en Newark, Nueva Jersey por el profesor E. J. DeSmedt, químico belga.
1 876 d.C.	Construcción del primer pavimento de tipo sheel asphalt en Washington D. C. con asfalto de lago importado.

1 902 d.C.	En Estados Unidos, se obtienen de la destilación del petróleo aproximadamente 120,000 barriles al año
------------	---

Fuente: PEMEX. Refinación. Ing. Jorge Rodríguez Villar. 2000 (México).

Tabla 2: Desarrollo cronológico del asfalto como Material de Construcción

AÑO	SUCESO
Siglo XVI	Cristóbal Colón descubre el betún natural a mediados del siglo XVI, en la Isla de Trinidad. Un siglo más tarde, Sir. Walter Raleigh quedó asombrado ante este Lago de betún y tomó posesión de él para la Corona Británica.
1681	El 19 de agosto de 1681, los ingleses Joakin Becher y Henry Serie registraron una patente relativa a “un nuevo método para extraer brea y alquitrán del carbón de piedra”.
1712	El griego Eirini D'Eyrinis descubrió, el yacimiento de asfalto de Val de Travers en Suiza y luego el yacimiento de Seyssel en el Valle del Rodano. A partir de estos yacimientos se elaboró el “mastic de asfalto”, aplicado al revestimiento de caminos.
1824	La firma Pillot et Eyquem comenzó a fabricar adoquines de asfalto.
1837	Se pavimentó, con adoquines de asfalto, la plaza de la concordia y los Campos Elíseos en Paris.
1852	Se construyó la carretera Paris-Perpiñan con asfalto de Vals Travers, que significó el comienzo de una nueva forma de construcción Vial.
1869	Se introduce el procedimiento de construcción con asfalto en Londres (con asfalto de Vals de Travers).
1870	Se introduce el procedimiento de construcción con asfalto en los Estados Unidos. Desde esta época, el “asfalto” se implantó sólidamente en las vías urbanas y propició significativamente su uso vial.
1876	Se realizó la construcción del primer pavimento, tipo Sheet Asphalt, en Washington D.C., con asfalto natural importado.
1900	Aparece la primera mezcla asfáltica en caliente, utilizada en la rue du Louvre y en la Avenue Victoria en Paris, la cual fue confeccionada con Asfalto natural de la Isla de Trinidad.
1902	A partir de este año se inicia el empleo de los asfaltos destilados en los Estados Unidos.
1903	Aparecen los tratamientos superficiales a base de emulsiones, con objeto de enfrentar los nubarrones de polvo producto de la circulación automovilística en las carreteras.
1909	En Versailles, sobre el firme de una carretera con un tráfico diario de 5000 vehículos, se construyó una capa de aglomerado bituminoso de 5 cm de espesor.

Fuente: Tesis “Aplicaciones de las Emulsiones Asfálticas y los Asfaltos Diluidos en mezclas Asfálticas en frío Utilizando agregados del Río Aguaytía-Ucayali” por Medina Ramirez Víctor (2003)

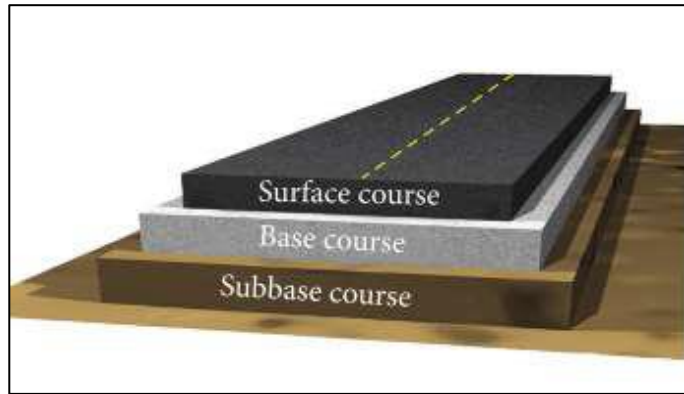


Figura 1: Estructura típica de pavimento flexible

Fuente: Adaptado de Nuha et al. (2013).

2.1.2. Marco Histórico del Caucho

En cuanto al uso del caucho en pavimentos flexible, su uso está dado en dos modos, como un modificador del ligante asfáltico o como un agente mejorador de las mezclas asfálticas, dicho de este modo, el primer caso sería conocido como proceso por vía húmeda y lo segundo como un proceso por vía seca.

El manejo y uso del polvo de caucho, como modificador del asfalto que vienen de llantas en fuera de uso, fue implementado y fomentado por Charles McDonalds en los años sesenta, tanto para el tratamiento de bacheos, como para los tratamientos superficiales. Llegado los setenta, el uso de este modificador llegó a extenderse por Europa, inicial y primordialmente en Francia y Bélgica.

Así mismo, en el año 1974 el uso llegó a España, específicamente Barcelona, el ingeniero Juan Gallego Medina impulsó el uso de este material debido a sus estudios desde 1990. De igual manera, también existe la experiencia de uso de caucho en América Latina, principalmente en Colombia y México. Así también, en las zonas de Brasil se llegó a tener tramos de prueba, así como en Argentina al cabo del 2002 y en desde el 2004 en Chile. (Ramírez Palma, 2006).

En el año 1997, ASTM (Asociación América para el Ensayo de Materiales, en español) llega a establecer especificaciones en cuanto a los asfaltos modificados con caucho, mediante las normas ASTM D 6114 y la ASTM D 8. Así también, en México lo llegaron a desarrollar y normar a través de la

estandarización N-CMT-4-05-002-06. Por otro lado, en Madrid desde el 2007 se llega a obligar el uso del polvo de caucho en vías, contando con la estudiante en doctorado de la Universidad Politécnica de Madrid del Departamento de Ingeniería Civil, la cual tuvo un galardón por el diseño y desarrollo a poca temperatura de una mezcla asfáltica modificada con caucho en polvo de neumáticos usados, en la segunda edición de los Premios a la Innovación de Infraestructuras Varias.

Rubber Pavement Association (2016). Por otro parte, la RPA (Asociación de Pavimentos de Caucho, en español) ratifica que dicho asfalto modificado, se llegó a usar en 40 estados de EE. UU. y que desde 1940 se va usando en más de 25 países del mundo. Todo ello señala que el uso del caucho como modificador en los asfaltos viene a ser una tecnología la cual con el tiempo se va fortaleciendo, así también, la RPA indica que en los Estados Unidos se llega a reciclar cerca de los 10 millones de llantas para el desarrollo y construcción de pavimentos asfálticos.

Por último, en cuanto a los procesos de incorporación del caucho, el único fin es la reacción entre el material modificador (caucho) y el ligante (asfalto), la digestión del asfalto con el caucho, para el cual se es necesario de elevadas temperaturas y un adecuado tiempo de digestión.

2.2. Investigaciones relacionadas

2.2.1. Investigaciones Nacionales

Según Maguiña, W. (2019). Este trabajo de investigación surgió de la problemática ocurrida debido a reciclar llantas fuera de uso, y al mismo tiempo acrecentar las propiedades del comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas con adición de granos de caucho en desuso, para conseguir resultados sobre dicha incorporación se hizo de ensayos del método Marshall, mediante el proceso por vía húmedo. El fin principal del estudio es llegar a tener un porcentaje de adición de caucho reciclado al asfalto, con el cual estos resultados se evaluarán comparándolo con las mezclas convencionales. Dentro de los ensayos se realizaron briquetas analizadas acorde las Normas que el MTC establecieron, dichas briquetas contenidas por porcentajes de cemento asfáltico, agregados y granos del caucho. Las briquetas en mención llegaron a

ensayarse en la prensa Marshall con la finalidad de tener resultados que comprueben el porcentaje que se incorporó a las mezclas asfálticas frente a las convencionales. El autor concluye que acorde a los resultados de los ensayos, se demuestra una mejora del comportamiento físico - mecánico al incorporar granos de caucho a las mezclas asfálticas convencionales. Así también, esta adición aumenta el valor de resistencia en cuanto a la deformación plástica, esto está dado a una recuperación por torsión elástica, teniendo un valor de 37% más que en el caso de un asfalto convencional en cuando a su recuperación. Este modificador realizara un gran desempeño cuando se trabaja a temperaturas altas, aumentando el factor de ablandamiento.

Acorde a lo detallado dentro de la investigación de Salazar, G. (2019), indica:

Se elaboro un diseño patrón de la mezclas asfálticas y tres diseños más con adición de caucho (0.5%, 1.2% y 1.8%) con relación al peso total de las briquetas; luego de eso también se realizó la observación directa para obtener los resultados de las briquetas al someterlo mediante el ensayo por el Método Marshall según (AASTHO T-245, ASTM D-1559) que me permitió determinar la estabilidad y flujo de las briquetas ensayadas, mediante gráficos en el software Excel. Finalmente se determinó que al adicionarle caucho como un agregado más, mejoró su estabilidad y flujo. (pág. 11).

Además, una de las conclusiones a la que llego Salazar, G. (2019) es que “Para las mezclas asfálticas mejoradas con caucho, el contenido óptimo de caucho es de 1.2%, con el cual se obtuvieron los mejores valores del comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas.” (pág. 59).

Ubidia, L. (2019) detalla que su investigación se enfoca en:

El diseño de una mezcla asfáltica convencional y modificada con Polvo de Caucho Reciclado (PCR) para la posterior comparación de estas. Actuando a la vez como un esquema de aprovechamiento de los residuos sólidos que representan en sí las llantas usadas, con el objetivo de brindar una nueva alternativa de solución a los problemas que afectan al asfalto y principalmente a la carpeta asfáltica. (pág. 11).

Además, Ubidia, L. (2019) llegó a la conclusión de que “la Estabilidad MARSHALL es mayor con la adición del 0.5% respecto a las muestras con las demás adiciones de polvo de caucho” (pág. 36) lo cual nos demuestra que al adicionar caucho este influye en los parámetros mecánicos de las mezclas asfálticas.

Según Robles, A. (2018) en su investigación nos indica lo siguiente:

Se elaboró una serie de muestras conocidas como briquetas, preparadas en caliente a temperaturas entre los 140° y 170° C; luego de ser elaboradas se disponen a ensayar por medio de la máquina Marshall la cual arrojó datos de estabilidad y flujo. (pág. 15).

Además, Robles, A. (2018) llegó a la conclusión de que “La incorporación de partículas de caucho reciclado influye de forma significativa en la resistencia de la mezcla asfáltica convencional solo en el indicador Estabilidad” (pág. 84)

Según Soto, E (2017). este trabajo contempla el producto que se genera a causa de la adición de caucho de llantas en desuso en una MAC, esta incorporación destacó un 1 y 3% óptimo de porcentaje, con el cual se conseguirá mejorar cada propiedad a evaluar de las mezclas asfálticas, con respecto a lo convencional. Estos ensayos se llevaron a cabo en un lapso de 2 horas de tiempo, con temperatura de 170°C. Dicha investigación contempla un estudio comparativo entre las mezclas asfálticas modificadas y convencionales, ejecutando cada exigencia que el MTC propone, así también, los costos del producto adquiridos son menores debido a que son reciclados.

Cabezas, V. y Mendoza, C. (2018) en su trabajo de investigación llegaron a la conclusión de que:

El Polvo de Caucho de NFU, puede usarse para mejorar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas en caliente usándolo como agregado. Asimismo, traerá beneficios en el medio ambiente, ya que el residuo se valoriza y solucionará la mala disposición, reduciendo así la contaminación ambiental. (pág. 99).

Según Villagaray, E. (2017) en su trabajo de investigación indica que:

Mediante el proceso de mezcla modificada que se realizó, se logró obtener mejores resultados a comparación de un asfalto convencional, se puede observar que la estabilidad de un asfalto modificado con caucho reciclado a un 0.5% de agregado fino, la estabilidad aumenta quedando, así como nuestro resultado óptimo estabilidad 1440.4kg con caucho reciclado. Cabe recalcar que el asfalto modificado ofrece propiedades elásticas a la mezcla, también aporta rigidez en un 13.24% a comparación de una mezcla convencional, obteniendo una mezcla con dos cualidades muy importantes para la resistencia ante las deformaciones permanentes. (pág. 6).

Además, llegó a la conclusión de que:

El caucho reciclado puede ser utilizado confiablemente para mejorar las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica, mediante el proceso de la vía seca. Ya que aumenta el factor de rigidez en un 13.24% a comparación de un asfalto convencional, debido a ello el asfalto modificado tiene mejor resistencia. (pág. 69).

Según Granados, J. (2017). Esta investigación tiene como finalidad mejorar las propiedades mecánicas y comportamiento de las mezclas asfálticas modificándolas al adicionar caucho, de ese modo llegar a tener una solución como alternativa frente a las deficiencias que tiene una mezcla convencional, como también de las carpetas asfálticas.

Luego de tener características acerca del agregado y el asfalto, se efectúa los ensayos de compresión-inmersión al asfalto modificado con el fin de hallar un tiempo de digestión y temperatura, así mismo también se realizó ensayos Marshall sobre el asfalto modificado y convencional para poder realizar una evaluación del comportamiento mecánico.

Realizando los diseños adecuados para dichas mezclas, se evaluó el comportamiento al desempeño y caracterización: resistencia a daños por humedad, a compresión diametral; así mismo para el desgaste se hizo el ensayo Cántabro, por medio del ensayo Ruda de Hamburgo se consigue los valores de ahuellamiento, por último, el ensayo Modulo Resiliente. El autor concluye que, al incorporar el caucho a una mezcla asfáltica, esto proporciona a dicha mezcla una mayor resistencia a la humedad, a la deformación, un alto valor a la

cohesión y un incremento a la resistencia por esfuerzo cortante y ahuellamiento, así mismo tiende a tener un alto comportamiento elástico, pero un parecido comportamiento a la disgregación. Todo ello se entiende como un alto valor a la durabilidad ante los factores que desfavorecen a la vida útil del asfalto.

Álvarez, L. y Carrera, E. en su trabajo de investigación indican que:

Consistió en un desarrollo de actividades experimentales en donde inicialmente se diseñará una dosificación analítica de materiales por medio de un tanteo indicado por la norma MTC, para luego elaborar una serie de muestras conocidas como briquetas, preparadas en caliente a temperaturas entre los 140° y 170° C; luego de ser elaboradas se disponen a ensayar por medio de la máquina Marshall la cual arrojó datos de estabilidad y flujo, siendo estos un objetivo específico de la investigación. (pág. 15).

A demás los autores llegaron a las siguientes conclusiones de que:

Solo los flujos de las muestras con % de GCR de 1.5% y de 2% fueron aceptadas al cumplir con los parámetros del MTC, además de que se identificó que solo las muestras (briquetas) con el 1.5% y 2.0% de caucho reciclado cumplieron con los valores superiores de 900kg de estabilidad. (pág. 132).

Según Fajardo, L. y Vergaray, D. (2014). Este trabajo de investigación apoya la incorporación de caucho de llantas fuera de uso mediante el proceso de vía seca, como un agente modificador basado como un fino agregado a las mezclas asfálticas, todo ello con la finalidad de poder usar estos neumáticos en desuso y al mismo tiempo acrecentar el comportamiento físico-mecánico de asfalto. Este proyecto cae en el problema de falta de antecedentes nacionales o extranjeros, propiedad de los materiales empleados y el estudio sobre las propiedades mejoradas debido a la adición de caucho en las mezclas bituminosas. Por último, el autor concluye que este proceso al adicionar el caucho llega a disminuir los porcentajes de vacíos de aire y VMF, por su parte detalla que el proceso de incorporación por vía húmeda necesita de sofisticados equipos en las plantas, por el contrario, el proceso aplicado en este estudio no necesita de cambio mayores en las plantas asfálticas, sino solo hacer manejo

del caucho como parte del agregado fino. En cuanto a los costos por mantenimiento al usar el polvo de caucho en las mezclas asfálticas llegan a ser beneficiosas, dado a que en el plazo de 10 años, estos costos son reducidos alrededor de un 16% respecto a las mezclas asfálticas convencionales.

2.2.2. Investigaciones Internacionales

Según Mantilla, J. y Castañeda, E. (2019). En este trabajo de investigación se hace mención sobre el aumento y crecimientos cada vez mayor de los esfuerzos sobre las carreteras, debido a esto es que diversos y distintos aditivos fueron añadidos a las mezclas convencionales con la finalidad de mejorar los desempeños de dichos pavimentos. En dicha investigación se presentó la caracterización de propiedades viscoelásticas en las briquetas de los asfaltos modificados con caucho, material reciclado de las llantas en fuera de uso, frente a mezclas asfálticas convencionales, variando la temperatura y frecuencia. Así mismo, se lograba encontrar una optimización de propiedades de dicho material, mientras se busca una solución a los problemas medioambientales. En la mencionada investigación se tuvo un análisis de la rigidez a través de las pruebas a compresión axial.

Concluyendo que la resultante obtenida de las muestras da un aumento significativo de la propiedad de rigidez y elasticidad al modificar el asfalto en las temperaturas establecidas.

Según Salamanca, D. (2018) nos indica que su trabajo de investigación contempla el diseño, desarrollo y seguimiento de unos 3 tramos de prueba, cada una de 500 metros continuos de largo, construidas en base a la modificación de las mezclas, la primera se realizó modificándolo con polímeros, el segundo modificado con multigrano y en el tercero se modificó con caucho de llantas en fuera de uso, todo el trabajo de incorporación se realizó por vía seca. La finalidad de esta investigación al realizar dichos tramos fue el de hacer un estudio comparativo de dichas adiciones de modificantes al asfalto a través de varios ensayos, para de esta manera poder establecer las ventajas y desventajas que se presentan en cada uno de los tramos evaluados. El autor concluye con lo siguiente, que se verifica y comprueba que al modificar el asfalto con caucho la mezcla llega a ser más rígida en comparación a las demás mezclas que fueron

modificadas. Así también, al modificar los asfaltos con polímeros, estos tienden a comportarse óptimamente a la fatiga y ahuellamiento. Así mismo, para el caso del asfalto modificado a multigrano, tiene un buen desarrollo frente al ahuellamiento, no obstante, su comportamiento frente a la fatiga es aleatorio, de modo que esta última parte es la principal desventaja de los pavimentos. Por último, el autor consigna que al modificar con caucho el asfalto, esta llega a presentar un satisfactorio comportamiento mecánico, acorde a las bajas condiciones de susceptibilidad al ahuellamiento, tales como estacionamientos y peajes, no obstante, todo ello si de efectúa y asegura un adecuado tiempo de digestión, el cual se complica para realizar un buen control en el terreno.

Martinez-Argellez, y otros (2018). Esta investigación en mención describe uno a uno las distintas etapas que se aborda el IDU con la finalidad de tener una adecuada aplicación de las mezclas asfálticas modificadas con GCR. Para la primera etapa de dicha investigación de laboratorio incluyo una absoluta evaluación de propiedades y comportamiento mecánico del asfalto modificado, acorde a la tipología de las mezclas usadas en Colombia. Así mismo, se realizó un breve ensayo de fatiga continua con el objetivo de llegar a evaluar el deterioro de las ya mencionadas mezclas asfálticas de una forma acelerada como una primera etapa. Luego de ello, para la siguiente etapa se realizó una evaluación, comparando el desempeño frente a otras mezclas asfálticas las cuales fueron modificadas con polímeros que se encontraron dentro del mercado colombiano. Dentro de esta última etapa se llegó a involucrar la ejecución del tramo de prueba en escala real con distintas secciones en la cual intervino el uso de la mezcla asfáltica modificada con los polímeros SBS y SBR, y un par de secciones más en las cuales se usó asfalto modificado con caucho, incorporando dicho material modificante mediante los procesos de vía seca y vía húmeda. El resultado conseguido debido a estas etapas y fases de la investigación fue el desarrollo de unas especificaciones técnicas, la cual da un lineamiento sobre el análisis y modificación de las mezclas asfálticas con GCR. Por último, se añade una descripción de las ventajas al medio ambiente debido a la aplicación de dicha tecnología.

Según Pelaez, Velasquez y Giraldo (2017). En este trabajo de investigación se presentan materiales bibliográficos, revisión de la literatura acerca del uso y

manejo del caucho reciclado, en la cual se manifiestan aplicaciones comerciales y otros estudios que se enfocan en el desarrollo de la investigación enfatizada al uso de material.

Concluyendo que hay un gran potencial de consumo a volúmenes mayores para los sectores infraestructura y construcción vial, como asfaltos, concretos y equipos de aislamiento para estructuras livianas.

Guamanquispe, F. (2017) nos indica que dentro de este trabajo de investigación se comprende el desarrollo de muestras con el objetivo de conocer y determinar diferencias que se puedan hallar entre una mezcla asfáltica tradicional frente a unas muestras de asfalto modificado con diferentes porcentajes de caucho de llantas recicladas, donde se encuentran variedad de partículas de dicho material. La muestra general que se elaboró fue de 60 briquetas, dentro de las cuales se encontraba las mezclas convencionales y las modificada, todo ello fue debidamente ensayados, evaluados y comparados en el laboratorio correspondiente.

Específicamente, se ensayaron 15 briquetas de las muestras de asfalto convencional, estas con diferentes porcentajes de asfalto, las cuales iban desde el 5 al 7% del total del peso de la mezcla. Así mismo, otras 15 briquetas se llegaron a moldear, están con distintas dosificaciones y reemplazando un 1% del cemento asfáltico por fibra del caucho reciclado, una tercera tanda de 15 briquetas se elaboró en donde se reemplazó parcialmente la parte del cemento asfáltico por 1.5% de fibra de caucho, por último, en una cuarta tanda de briquetas se realizaron de la misma manera un reemplazo del cemento asfáltico por un 2% de caucho.

El autor concluye de acuerdo con los resultados de su investigación, que los valores arrojados por los ensayos realizados a las briquetas, revela una mejora por parte de las propiedades de la mezcla asfáltica que fue modificada, como en el caso del porcentaje de vacíos, donde su aumento va acorde a un aumento en los porcentajes de cemento asfáltico y fibra de caucho reciclado.

Según Schilling, J. (2018). Nos indica que este trabajo de investigación estudia el asfalto CA-24 modificado mediante la adición de polvo de caucho, donde se cuenta con una definida granulometría, las cuales cumplen las características y

ensayos del desempeño. Los ensayos se efectuaron con asfaltos modificados incorporando el caucho mediante el proceso de vía húmeda, este proceso se llevó a cabo con distintas concentraciones del material modificantes, tales concentraciones son de 0%, 5%, 10% y 15%.

Dando resultados que describen que esta incorporación de caucho aumenta efectivamente las propiedades de viscosidad a altos valores de temperatura, desde un estado primario a uno envejecido. Así mismo, se consigue notar que la incorporación de este material llega a mejorar los rendimientos del asfalto dentro una mezcla, dado que los resultados de los ensayos de laboratorio presentan un crecimiento del factor recuperación elástica y una reducción de las deformaciones acorde a una fluencia que no es recuperable, dicho de otro modo, los valores de la deformación permanente son bajos. Los parámetros que más sobresalieron en la parte experimental, se recalca las condiciones previas, tales como la temperatura a la cual se efectúa la modificación, la cantidad de caucho y el tiempo que se mezcla, todo lo mencionado deben de estar inspeccionados con sumo cuidado y exactitud, debido a que si hay alguna alteración de uno de estos factores producirá algún cambio en la búsqueda de las propiedades, y primordialmente afectaría a la viscosidad, lo que conlleva principalmente a la parte de trabajabilidad del asfalto.

Díaz, C. y Castro, L. (2017). Nos indican que este trabajo de investigación se enfoca y sintetiza distintas investigaciones internacionales, en los cuales se demuestran el uso e implementación del GCR en pavimentos, haciendo énfasis en ser alternativa de solución frente a los problemas de las propiedades mecánicas que tienen las mezclas asfálticas, así mismo, aplacar el impacto ambiental que se va generando por el mal empleo del desecho de llantas. La incorporación del GCR como agente modificante dentro de las mezclas bituminosas, se entiende como un mejoramiento o beneficios que trae consigo el material. Los estudios del trabajo establecen mediante la revisión bibliográfica que se demostró que el material en cuestión como modificador llegan a ser de mayor duración respecto a las mezclas convencionales, con costos económicos en un plazo largo dado a que se reducen las partes de mantenimiento, debido a que llegan a ser de mayor duración. El autor concluye, presentando con la base bibliográfica que se revisó, un resumen de ventajas y

desventajas económicas, técnicas y medioambientales que se produce debido al uso de este modificador.

Rodriguez, E. (2016). Con la finalidad de asentar y aminorar el impacto ambiental dado a las llantas fuera de uso las cuales son desechadas, se emplea como un agregado a las mezclas asfálticas, incorporando a este pavimento asfáltico como un agente modificante.

La incorporación esta dado por dos medios, vía seca o vía húmeda, teniendo como finalidad la reacción de caucho asfalto. Logrando obtener beneficios significativos en cuando al incremento de volumen al realizar esta adición de caucho, llegando a emplearse como envolvedor.

Según Vega, R. (2017). Nos indica que tiene como objetivo el de realizar una investigación en cuanto a la presión de la parte negra superior constituida de neumáticos reusados como modificador para el asfalto. Así mismo, se llega a tener el uso del proceso seco para la incorporación del caucho en la mezcla asfáltica, de manera que se logre una modificación acorde. Haciendo un enfoque en el método Marshall con el cual se llega a basar para el diseño de mezclas, para que se consiga evidenciar las mejoras y beneficios que se originan. En cuanto al proceso, se reemplazó los porcentajes de 1, 2 y 3% en peso del total de fino por el polvo de caucho como agente modificante mediante el proceso por vía seca, de este modo se evalúa las mezclas top black que se produjeron, como también el espesor, pruebas grandes hipotéticas de gravedad (RICE), espesor de masa (Density) y el grado de vacíos completo y totales. Por lo tanto, concluyendo el autor acerca de resultados obtenidos de la investigación, explica que se llega a obtener un mejor valor de estabilidad en mezclas modificadas con un 7% de asfalto que lo habitual, como también un valor mayor para el flujo con un 6.5 y 7%, por lo que, se realiza una mejora en la durabilidad y la deformación debido a cargas que se producen dado al tráfico. Llegando a tener en torno a todo esto un bajo desgaste, por ende, el amplio plazo de mantenimiento y consecuentemente una reducción de los costos totales.

Según Pedraza, A. y Gonzales, D. (2016). Nos indican que haciendo un énfasis a la temperatura, esta investigación detallada cambios de tal factor, como el

disminuir la temperatura referencial de una mezcla asfáltica en 30°C debajo de lo habitual, lo cual llega a mostrar una relación inversa de densidad frente al porcentaje de vacíos en la mezcla, disminuyendo en un 2.17% la densidad, y aumentando los porcentajes de vacío llegando a los 36.6%, llegando finalmente a un 5.9% de vacíos, no obstante aun con el incremento de vacíos, esta no llega a pasar los límites permisibles por las normas específicas Invias 2013, en el cual se establece valores de densidad las que permiten los valores de 6% en porcentaje de vacíos como máximos, de tal modo que el autor llega a concluir que aun estando con valores disminuidos de la temperatura de compactación de asfalto modificado y también un valor reducido de densidad, la mezcla continuara con la misma capacidad de resistir el envejecimiento y deterioro prematuro por oxidación del asfalto.

Esta investigación realizo análisis de la modificación de las mezclas con GCR, las cuales fueron compactadas con valores reducidos de temperatura de entre 110°C y 150°C acorde a la metodología Marshall, la cual permitió mediante análisis de gráficos y laboratorios el comportamiento del flujo, estabilidad, la rigidez Marshall, obteniendo una reducción del 42% respecto a la temperatura habitual de compactado, así mismo, llegando a tener una inestabilidad del pavimento, al mismo tiempo bajo cargas de transito repetitivo no lograra obtener su forma, consiguiendo ahuellamiento, ondulaciones en el asfalto y demás señales que permiten mostrar los cambios de la mezcla.

Para finalizar, mediante los estudios de asfaltos modificados con GCR, se logró comparar mediante graficas medidas de estabilidad-flujo respecto a las mezclas asfálticas convencionales, hallando que existe un incremento de hasta 15% en factores de estabilidad y flujo en las mezclas asfálticas modificadas acorde a una similar temperatura de 140°C de compactación, tal temperatura es una recomendación del ensayo de curva geológica de cemento asfaltico 60/70 – 80/100 con el cual para mantener características adecuados de estabilidad – flujo se establecen parámetros para temperaturas de compactación en primera instancia, de tal forma se llega a mitigar los factores asociados al ahuellamiento, fatiga y demás, factores encontrados en las mezclas asfálticas convencionales.

Campaña, Galeas, y Guerrero (2015). Indican que su trabajo de investigación tuvo como finalidad hacer una evaluación de la mezcla asfáltica tradicional, frente al diseño el cual está siendo adicionado de caucho mediante un proceso húmedo, adicionando los porcentajes de 10, 15 y 20% de polvo modificador, como también para un proceso seco la adición fue de 1, 2 y 3% de polvo modificador.

Concluyendo sobre los resultados, que el desempeño evaluado efectuado mediante el módulo de deformación y rigidez el cual presento una mayor ratio fue el diseño de 10% en la mezcla, así también, se presentó una mayor resistencia a la fatiga en un diseño de mezcla con adición de 20% de caucho el cual fue procesado mediante la vía húmeda.

Según Llago, R. (2015). Esta investigación contempla como objetivo establecer diferentes fórmulas y métodos a trabajar en cuanto al uso del caucho obtenidas de moliendas de llantas que se encuentran en desuso (NFU) adicionadas a las mezclas asfálticas o bituminosas, así también el análisis de su comportamiento y características mecánicas, durabilidad y físicas.

Todo esto con la finalidad de encontrar soluciones al uso del caucho, el cual en la actualidad es un problema al medio ambiente, dado a que es un residuo que necesita de un tratamiento y procesamiento para su reutilización. Se detalla y comprueba que existen distintas técnicas de incorporación de este material a las mezclas de asfalto. Las aplicaciones directas se basan en fabricar asfaltos ya modificados, y las otras aplicaciones por el contrario requieren de experimentación. Cualquiera de estas técnicas que se mencionan tiene por su parte ventajas y un campo de aplicación, porque es de sumo interés desarrollar cada una de ellas, así mismo, la técnica mencionada con anterioridad consigue eliminar mayor cantidad de llantas, lo cual es un punto primordial.

Por otro lado, aun con la necesidad urgente de la aplicación de las llantas en desuso, se debe tener en consideración que el uso de este material en las carreteras deberá de pasar filtros claros de características bien definidas, características como la durabilidad y mecánicas minuciosamente en cada caso que corresponde.

Navarro, N. (2013). En esta investigación trabajada y estudiada en Chile, se planteó por primera vez el diseño, elaboración y seguimiento de un par de tramos de prueba, fueron construido a través de capas de mezcla asfáltica en caliente adicionando polvo de caucho, material obtenido de neumáticos sin uso o NFU. La incorporación del dicho material de fracción fina fue mediante la vía seca, como un agregado.

En tal proceso de vía seca, el modificador caucho actúa y reacciona con el asfalto mediante el proceso de digestión, donde se realiza la modificación de la reología y también la viscosidad del asfalto. Dicho diseño y procedimiento difiere en cuanto a lo que se trata de un diseño de mezcla convencional, debido a que se necesita realizar mayores ensayos que permitan determinar la temperatura y tiempo de digestión mínimo, la cual se requiere para lograr un grado de modificación necesario que suministre a la mezcla asfáltica un aumento importante de las propiedades mecánicas.

Concluyendo sobre los resultados, el autor menciona que el modificador caucho usado como material para las mezclas asfálticas es un buen planteamiento y solución frente al cambio climático, dando un valor viable como agregado adicional de caucho NFU y así mismo, permite alcanzar un valor más económico frente a los asfaltos con polímeros y dando así un precio cercanamente competitivo, añadiendo un aporte ventajoso técnico de carreteras. En consecuencia, comparando con la mezcla asfáltica convencional, se logró obtener un ascenso de resistencia a cambios térmicos, los valores de susceptibilidad al factor humedad fueron menores (disgregación), también se logró valores óptimos frente al envejecimiento y ahuellamiento. Por consiguiente, dicho material de adición provee a la capa superficial una mayor capacidad estructural y resistencia frente al deslizamiento.

Rondon, H. (2011). La investigación tiene de referencia varias bases y fuentes bibliográficas, en donde se establecen y resaltan los beneficios del uso de grano de caucho de llantas en fuera de uso, las cuales fueron molidos para material modificante de los asfaltos.

El autor concluye que de dicho material que se emplea para modificar las mezclas asfálticas, se observa y demuestra que este diseño llega a ser de mayor

duración y económicas, como también tiene un gran factor a favor de mejorar el impacto ambiental que se produce al no hacer ningún tratamiento de las llantas que están en fuera de uso.

Wulf, F. (2008). En su trabajo de investigación llegó a concluir que de acuerdo con el análisis realizado de los resultados que llegaron a obtener de la fluencia y estabilidad, quedaría demostrado que las mezclas modificadas en respecto a una convencional, este diseño de mezcla con la adición de un modificador llegó a poseer un gran comportamiento, tal y como se lo esperaban, dado a que la finalidad de este caucho como modificador al asfalto es de mejorar las propiedades.

Ramírez, N. (2006). En su investigación evalúa que a través de los procesos de incorporación por vía seca y vía húmeda se encontró con factores como la granulometría, esencia y dimensión de las partículas de caucho, método de incorporación y grados de adición. Factores esenciales y necesarios que posibilitan la mejora de las propiedades de la mezcla asfáltica al realizar la incorporación del agente molido. Por último, el autor concluye que para llegar a tener óptimos y resaltantes resultados se debe al tamaño y dimensión de las partículas de caucho, específicamente de menor tamaño, las cuales obtendrán beneficios y ventajas que le hacen frente a las propiedades que se relacionan para la durabilidad.

Según Angulo y Duarte (2005). Su trabajo de investigación tiene como objetivo proponer la realización de un diseño de asfalto el cual se modifica con caucho de llantas recicladas, de tal modo que también se propone un esquema de aprovechamiento de residuos que las llantas presentan, todo ello con la finalidad de llegar a una solución como alternativa frente a los defectos que presenta un asfalto convencional, subsecuente al pavimento asfáltico. Dicha investigación nace también a la necesidad de contribuir con los problemas del medio ambiente, ya que se incorpora caucho de llantas que están fuera de uso a una mezcla asfáltica, método y tendencia que ya se lleva a cabo en otros países, donde se llegaron a obtener resaltantes y favorables resultados, así también, que continúan perfeccionándolo con el objetivo de que para la actualidad sea aún más factible trabajar con este método.

El autor concluye, que al modificar un asfalto tradicional con caucho de llantas que fue reciclado se llega a alcanzar una mejora en las propiedades, tal como la recuperación de la elasticidad, como también se logra notoriamente un aumento en la resistencia de la deformidad.

Según Gallego y Prieto (2004). En este trabajo de investigación nos hace mención sobre la existencia de distintas tecnologías de incorporación de caucho de llantas que se encuentran en desuso a las mezclas asfálticas. Enfocándose primero en el estudio primordialmente de la incorporación por vía seca, donde la incorporación del material se desarrolla mediante una fracción de los áridos, por otro lado, la vía de incorporación húmeda es en la cual se diseña un asfalto con caucho el cual debe contener alrededor del 10% o 20% de caucho, respectivamente serán llamados de contenido bajo y de contenido alto de caucho. Esta investigación o comunicación técnica viene a explicar las distintas particularidades de estas tecnologías ya mencionadas, y por ende sus aplicaciones que sean idóneas en construcción y preservación de vías, detallando ejemplos muy recientes de España. El autor concluye en esta entrega algo sumamente importante, el cual es que cuanto mayor sea el contenido de caucho a incorporar y también del mismo modo para el contenido de asfalto, las fisuraciones reflejadas y la fatiga tendrán mayor resistencia reflejada. En tal sentido, las mezclas asfálticas con contenido alto de caucho se acercan más a ser las de mayor ventaja para emplearlos en carreteras, dado a su alta conservación.

Según Gallego y De los Santos (2003). Este artículo de investigación primero hace un enfoque acerca de los neumáticos, los cuales se encuentran fuera de uso, que estos presentan un gran problema frente al medio ambiente en varios países alrededor del mundo. Así mismo, declara que recientemente la Unión Europea publicó una legislación el cual impulsa al desarrollo de reciclado de neumáticos fuera de uso.

Por otro lado, en España se cuenta con el Plan Nacional de NFU, el cual prohíbe admitir estos residuos en vertederos desde enero del 2007. Acorde a todas estas condicionantes, la Dirección General de Carreteras envió una Orden Circular que anima el uso y empleo del caucho de llantas en las mezclas bituminosas.

Este trabajo detalla y analiza la tecnología de asfaltos modificados con un contenido alto de caucho.

Específica y explica que para una tonelada de mezcla asfáltica se tendría que incorporar cerca de 3 neumáticos de un coche, el cual bordea un 2% de dicha mezcla. El autor concluye que un contenido alto de este material modificante otorga a la mezcla mayor resistencia al fisuramiento y un mayor enfrentamiento a la fatiga, las cuales no se consiguen con tecnologías de incorporación a las mezclas asfálticas que contiene mediano o bajo porcentaje de caucho. Por último, este artículo hace una breve descripción y explicación de la ejecución de una autopista en Valencia, A-7.

2.3. Estructura teórica

2.3.1. Asfalto

Velazques (1977). La sustancia bituminosa o asfalto es un interesante y particular material para los ingenieros, dado a que es un compuesto aglomerante con características como su alta adhesividad, la resistencia, sumamente duradero e impermeable. Sustancia de alta plasticidad que añade una flexibilidad adecuada a todo tipo de mezclas con áridos, las cuales se combinan habitualmente. Así mismo, tiene un alto grado de resistencia frente a casi todos los ácidos, sales y álcalis. No obstante, esta sustancia llega a ser semisólida o sólida a temperaturas usuales o comunes, y al ser aplicados al calor llegan a licuarse con facilidad, debido a las acciones volátiles de disolventes variables o emulsificantes.

2.3.2. Mezclas Asfálticas

Una mezclas bituminosa o asfáltica pertenecen a un grupo combinado de materiales, las cuales fueron establecidos en proporciones de agregados con granulometría fijada, un ligante o cemento asfáltico, con ciertas cantidades de vacíos de aire las cuales se controlan en el proceso de compactado. Al realizar o elaborar dichas mezclas se busca que toda partícula árida que contenga sea cubierta con una película homogénea de cemento bituminoso (asfalto). Para los pavimentos flexibles, este tipo de mezcla asfáltica con el principal componente constructivo, el cual tiene como base estas etapas de fabricación: Primero la subestructura o soporte, tales como la subrasante, subbase, base y drenaje.

Segundo el manto de rodadura, el cual se compone del transporte, colocación y compactado de la mezcla bituminosa. Por último, un control de calidad.

Dentro de estas mezclas bituminosas o asfálticas encontramos una clasificación variada de tipos acorde a una temperatura de elaboración, dentro de las principales se encuentran: mezclas frías, mezclas tibias y mezclas calientes, siendo la última la más utilizada.

2.3.3. Mezclas asfálticas en caliente (MAC)

La elaboración o fabricación de la mezcla asfáltica en caliente (MAC) son preparadas dentro de plantas especializadas de producción, en donde se realiza la combinación y mezclado de componentes que pertenecen a dichas mezclas, esta preparación se realiza a elevadas temperaturas (superando los 180°C).

Dichas plantas de MAC están establecidas por una lista de equipos especializados, con el fin que poder dosificar, calentar, secar y mezclar los áridos con el ligante bituminoso. La clasificación de estas mezclas a producir se basa en las especificaciones técnicas que cada proyecto lo exija, tanto para sus proporciones y cantidades a elaborar. Dependiendo el tipo de MAC a fabricar, se tendrá un tipo de procedimiento, por ende, un tipo diferente de planta en la cual se llevará a cabo la fabricación. Por consiguiente, se tendrá una breve descripción y características de las Plantas Continuas y Plantas Discontinuas.

Plantas Continuas: Esta planta está caracterizada por desarrollar un control en la granulometría en frío, donde los agregados son transportados por correas en las cuales se mide y acorde a este flujo de los agregados se llega a proporcionar las cantidades de cemento asfáltico.

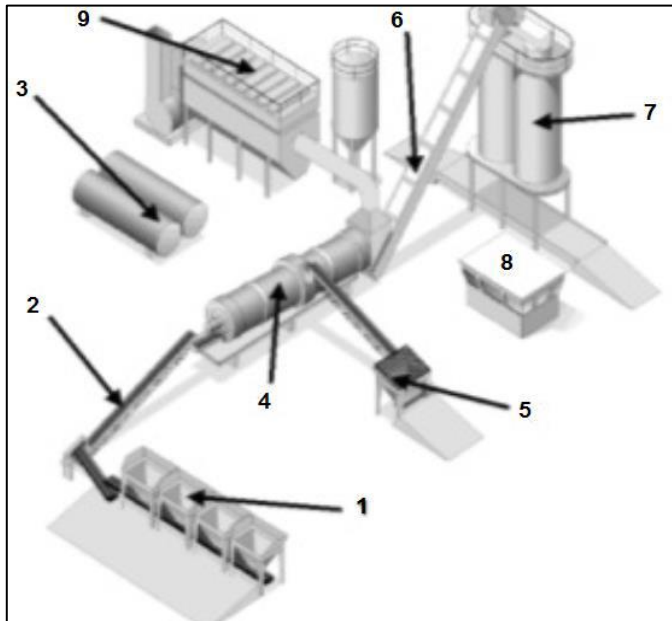


Figura 2: Esquema planta de producción continua

Fuente: Delgadillo Sturla, Rodrigo. 2014. Apuntes de clase CIV-369.

Equipamiento:

1. Almacén de áridos.
2. Banda transportadora.
3. Almacén de betún.
4. Tambor de secado y mezclado.
5. Almacenamiento de los elementos reciclados.
6. Banda transportadora.
7. Almacén de mezcla.

Plantas Discontinuas: Esta planta esta caracterizado por desarrollar un control en la granulometría en caliente, el ligante asphaltico se inspecciona mediante un contenedor de pesaje, ingresando al tambor se realiza la succión de filler y también el secado por parte de los áridos, todo esto mediante la dirección de contraflujo.

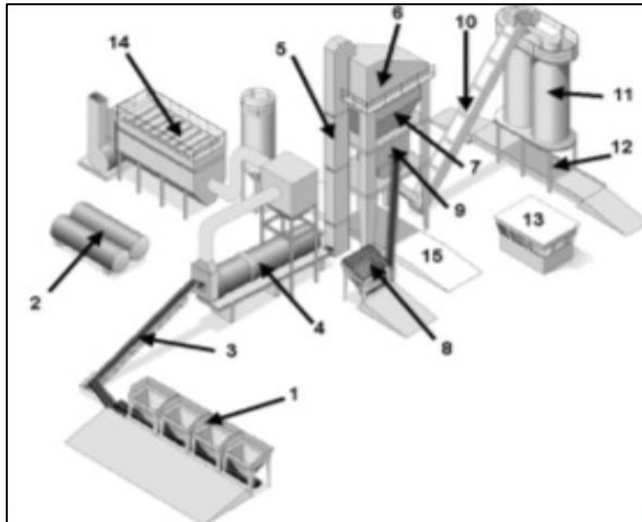


Figura 3: Esquema planta de producción discontinua

Fuente: Delgadillo Sturla, Rodrigo. 2014. Apuntes de clase CIV-369.

Equipamiento:

1. Almacén de áridos.
2. Almacén de betún.
3. Banda transportadora.
4. Tambor de secado y mezcla.
5. Ascensor.
6. Cernidor.
7. Pesa.
8. Almacenamiento de los elementos reciclados.
9. Ducto de exceso.
10. Banda transportadora.
11. Almacén de mezcla.
12. Cargamento para camiones.
13. Torre de control.
14. Mangas de succión del agregado fino.

Consecutivamente, dicha mezcla asfáltica en caliente preparada será transportada al sitio donde se pavimentará, todo ello con camiones que tendrán que disponer de coberturas las cuales servirán de protección contra la pérdida de temperatura durante el trayecto de la mezcla.

2.3.3.1. Composición de las mezclas asfálticas en caliente

Las MAC o mezcla asfáltica en caliente, se fundamenta de tres principales componentes: uno de ellos es el ligante o cemento asfáltico, el siguiente son los agregados (áridos o pétreos) y por último está el porcentaje de vacíos o huecos de aire.

Ligante asfáltico

Este material está definido como un componente bituminoso de la mezcla, proveniente de la refinación de petróleo o también de procedencia natural, de donde posee su característica de ser aglomerante, con un apariencia viscosa y oscura, con tonalidad de negro agudo, las cuales son usadas en su mayoría por las construcciones viales.

Por otro lado, las que son de procedencia natural, son originados al descomponerse los organismos marítimos, surgiendo hacia la superficie en los lagos de asfalto o adheridos en rocas. Así también, de los ligantes provenientes de lo artificial, son correspondiente a los subproductos derivados del petróleo, y del cual dependerá de donde proviene el crudo para obtener características diferentes en su composición química. Por consiguiente, se hace una descripción breve sobre las propiedades principales que poseen dichos ligantes en su composición química y física.

Propiedades Químicas

Angulo y Duarte (2005), La parte de los llamados hidrocarburos dentro de un asfalto, conforma un compuesto líquido donde existe un conjunto de moléculas pesadas de dichos hidrocarburos llamados asfáltenos, los cuales existen dispersas dentro del medio aceitoso mayormente ligeros, los cuales se son llamadas máltenos, su composición está conformado

por los hidrocarburos saturados, aromático y la resina, todo ello sin la existencia de separación entre dichas fases, sino más bien existe una transición.

El ligante asfáltico se conforma principalmente de moléculas envegadas del hidrocarburo, estas se dividen en los elementos a continuación:

Asfaltenos: sustancia sólida y amorfa de color negro o café, el cual se conforma de un rango entre un 5% al 25% del ligante asfáltico, esta se caracteriza del alto peso molecular que posee, como también de la alta polaridad. Así mismo, dependerá de la materia prima o crudo de donde provenga para su dicha estructura molecular del asfalteno, dado a que este contenido afecta directamente a las propiedades físicas, especialmente tiende a ser una proporción directa en cuanto al incremento de la dureza que posee dicho ligante.

Maltenos: sustancia clasificada por juntar la parte aromática, resinas y saturados.

Resinas: compuesto de clasificación sólida o semisólida de un color negro o café intenso, que posee un alto grado de polaridad, actuando de dispersor en los asfaltenos.

Aromáticos: compuesto de clasificación líquida y viscosa de color negro o café intenso, la cual se conforma como la parte de mayor dispersión en el medio de los asfaltenos, se constituye en un rango de un 40% a un 60% del ligante asfáltico.

Saturados: compuesto de clasificación aceitosa no polar y viscosa de un color blanco intenso. Está conformada químicamente de cadenas abiertas de los hidrocarburos. Se constituye en un rango de un 5% a 20% del ligante asfáltico total.

Propiedades físicas

Angulo y Duarte (2005). Elemento o sustancia de clasificación plástica, el cual aporta una gran y controlable flexibilidad a una mezcla pétreo o áridos con las que se llega a combinar. Sustancia de color plomo o gris

intenso, la cual tiene una consistencia líquida, sólida o semisólida, esta característica de consistencia depende a la exposición de temperatura.

Materiales bituminosos de clasificación semisólida a una temperatura ambiente, proporcionado de la preparación de hidrocarburo natural a través del proceso de destilación, la cual comprende en sus composiciones de un grado bastante bajo de materiales volátiles, el cual tiene propiedades esenciales de aglomerante. Asociados a dicha mezcla asfáltica, a continuación, se muestra las principales propiedades físicas.

- Susceptibilidad térmica: Es el grado de sensibilidad que posee el ligante a los cambios térmicos, el cual influye con su rigidez.
- Durabilidad: Es la capacidad que posee el pavimento para conservar las características originales, pasado la exposición por parte del envejecimiento y degradación.
- Cohesión de la mezcla: Es la capacidad que posee las partículas áridas que son revestidas de betún con la finalidad de juntarlas permanentemente, incluso ante la presencia de agua, cambios en la temperatura y/o cargas vehiculares.
- Flexibilidad: es la capacidad que poseen las mezclas de acondicionarse a deformaciones ocurrentes debido a los asentamientos en la base y subbase sin cuartearse.
- Susceptibilidad a cargas: Debido a que el ligante asfáltico es un material viscoelástico, esto le concede tener una capacidad para resistir mayores esfuerzos repentinos, como también tiende a fluir ante las acciones de cargas continuas.

2.3.3.2. Materiales de las mezclas asfálticas en caliente

Acorde a lo que demanda el Manual de Carreteras – Especificaciones Técnicas Generales para Construcción EG-2013, fundamenta la elaboración de una mezcla asfáltica en caliente, como también su colocación en uno o más capas encima de una debidamente preparada superficie.

Materiales

a. Agregados minerales gruesos

El agregado mineral grueso deberá cumplir necesariamente con los requisitos puestos en el EG-2013, la cual se observa en la siguiente figura sacada de la norma que detalla la Tabla 403.B - 01.

Ensayos	Norma	Requerimiento	
		Altitud (m.s.n.m.)	
		< 3.000	> 3.000
Durabilidad	MTC E 209	18% máx.	15% máx.
Abrasión Los Ángeles	MTC E 207	40% máx.	35% máx.
Adherencia	MTC E 517	+95	-
Índice de Durabilidad	MTC E 214	35% mín.	35% mín.
Partículas chatas y	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.
Arcilla en terrones y partículas	MTC E 212	0% máx.	0% máx.
Soft partícles	ASTM C 235	5% máx.	5% máx.
Adherencia	ASTM D 3625	>95 %	>95 %

*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.

(1) A partir de una altitud A ≥ 3.000 m.s.n.m. debe considerarse el ensayo de durabilidad.

Figura 4: Requerimientos para los agregados gruesos

Fuente: Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción EG-2013.

b. Agregados minerales finos

El agregado mineral fino deberá cumplir necesariamente con los requisitos de la EG-2013, la cual se observa en la siguiente figura tomada a la norma, en el cual detalla la Tabla 403.B -02.

Tabla 403.B-02

Requerimientos para los agregados finos

Ensayos	Norma	Requerimiento	
		Altitud (m.s.n.m.)	
		< 3.000	> 3.000
Equivalente de Arena	MTC E 114	60	70
Angularidad del agregado fino	MTC E 222	30	40
Azul de metileno	AASTHO TP 57	8 máx.	8 máx.
Índice de Plasticidad (malla N°)	MTC E 111	NP	NP
Durabilidad	MTC E 209	18 máx.	18% máx.
Índice de Durabilidad (1)	MTC E 214	35 mín.	35 mín.
Índice de Plasticidad (malla N°)	MTC E 111	4 máx.	NP
Sales Solubles Totales	MTC E 219	0,5% máx.	0,5% máx.
Adherencia Riedel Weber	MTC E 220	>4 %	>4 %
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.

(1) A partir de una altitud $A \geq 3.000$ m.s.n.m. debe considerarse el ensayo de durabilidad.

Figura 5: Requerimiento para el agregado fino de la mezcla

Fuente: Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción EG-2013.

c. Gradación para mezclas asfálticas en caliente

La gradación para las mezclas asfálticas calientes, tendrán que cumplir y avalar a uno de los husos granulométricos, las cuales se especifican en la EG-2013, como alternativa se tiene las especificaciones de la ASTM D 3515 (tabla 4) las cuales se pueden emplear.

Tabla 3: Gradación de 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: Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción EG-2013

Tabla 4: Especificaciones para la gradación cerrada - ASTM D3515

Abertura de malla	Mezcla cerrada								
	Tamaño máximo nominal del agregado								
	2 in	1 1/2 in	1 in	3/4 in	1/2 in	3/8 in	N° 4	N° 8	N° 16
	(50 mm)	(37,5 mm)	(25,0 mm)	(19,0 mm)	(12,5 mm)	(9,5 mm)	(4,75 mm)	(2,36 mm)	(1,18 mm)
2 1/2" (63mm)	100	...	...	...	...	...	...	...	...
2" (50mm)	90 - 100	100	...	...	...	...	...	...	...
1 1/2" (37,5mm)	...	90 - 100	100	...	...	...	...	...	...
1" (25,0mm)	60 - 80	...	90 - 100	100	...	...	...	...	...
3/4" (19,0mm)	...	56 - 80	...	90 - 100	100	...	...	...	...
1/2" (12,5mm)	35 - 65	...	56 - 80	...	90 - 100	100	...	...	...
3/8" (9,5mm)	...	...	...	56 - 80	...	90 - 100	100	...	...
N°4 (4,75mm)	17 - 47	23 - 53	29 - 59	35 - 65	44 - 74	55 - 85	80 - 100	...	100
N°8 (2,36mm)	10 - 36	15 - 41	19 - 45	23 - 49	28 - 58	32 - 67	65 - 100	...	95 - 100
N°16 (1,18mm)	...	...	...	...	...	...	40 - 80	...	85 - 100
N°30 (600µm)	...	...	...	...	...	...	35 - 65	...	70 - 95
N°50 (300µm)	3 - 15	4 - 16	5 - 17	5 - 19	5 - 21	7 - 23	7 - 40	...	45 - 75
N°100 (150µm)	...	...	...	...	...	...	3 - 20	...	20 - 40
N°200 (75µm)	0 - 5	0 - 6	1 - 7	2 - 8	2 - 10	2 - 10	2 - 10	...	9 - 20

Fuente: Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction. NAPA, 1996

d. Cemento asfáltico

Este material deberá satisfacer las especificaciones puestas en la EG-2013, las cuales se basan en la temperatura y clima de las zonas, tal como se muestra en la siguiente Tabla.

Tabla 5: Selección del tipo de cemento asfáltico

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

Fuente: Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción EG- 2013

Así también, tendrá que cumplir los requisitos puestos en la EG-2013 para la calidad del cemento asfáltico, se observa en la siguiente figura tomada a la norma, en el cual detalla la Tabla 415 - 02.

Tabla 415-02
Especificaciones del cemento asfáltico clasificado por penetración

Tipo	Ensayo	Grado Penetración											
		PEN 40-50		PEN 60-70		PEN 85-100		PEN 120-150		PEN 200-300			
Grado		min	máx	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	MTCE 304	40	50	60	70	85	100	120	150	200	300		
Punto de Inflamación, °C	MTCE 312	232		232		232		218		177			
Ductilidad, 25°C, 5cm/min, cm	MTCE 306	100		100		100		100		100			
Solubilidad en Tricloro-etileno, %	MTCE 302	99,0		99,0		99,0		99,0		99,0			
Índice de Penetración (Susceptibilidad Térmica) ⁽¹⁾	MTCE 304	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1		
Ensayo de la Mancha (Oleones) ⁽²⁾													
Solvente Nafta – Estándar		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo			
Solvente Nafta – Xileno, %Xileno	AASHTO M 20	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, %	MTCE 304	55+		52+		47+		42+		37+			
Ductilidad del residuo a 25°C, 5 cm/min, cm ⁽³⁾	MTCE 306			50		75		100		100			

(1), (2) Ensayos opcionales para su evaluación complementaria del comportamiento geológico en el material bituminoso indicado.
 (3) Si la ductilidad es menor de 100 cm, el material se aceptará si la ductilidad a 15,5 °C es mínimo 100 cm a la velocidad de 5 cm/min.

Figura 6: Especificaciones del cemento asfáltico clasificado por penetración
 Fuente: Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción EG-2013.

2.3.3.3. Requisitos de las mezclas asfálticas en caliente

El grado de calidad requerida como característica de las mezclas asfálticas tienen que estar acorde con las exigencias que demandan e indican en la EG-2013 para un concreto bituminoso, según al tipo de mezcla correspondiente a un diseño, tales demandas se muestran más adelante.

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.		

(1) A la fecha se tienen tramos efectuados en el Perú que tienen el rango 2% a 4% (es deseable que tienda al menor 2%) con resultados satisfactorios en climas fríos por encima de 3.000 m.s.n.m. que se recomienda en estos casos.

(2) Relación entre el porcentaje en peso del agregado más fino que el tamiz 0,075 mm y el contenido de asfalto efectivo, en porcentaje en peso del total de la mezcla.

(3) Para zonas de clima frío es deseable que la relación Est. /flujo sea de la menor magnitud posible.

(4) El Índice de Compactabilidad mínimo será 5.
El Índice de Compactabilidad se define como:
$$\frac{1}{\text{GEB } 50 - \text{GEB } 5}$$
Siendo GEB50 y GEB5, las gravedades específicas bulk de las briquetas a 50 y 5 golpes.

Figura 7: Requisitos para mezclas de concreto bituminoso

Fuente: Especificaciones Técnicas Generales para la construcción EG-2013

Por otro lado, la EG-2013 no tiende a un ajuste para el diseño de mezclas modificadas, esto debido que al hacer uso del caucho como agente modificante en las mezclas nos resultan valores altos de estabilidad, consecuentemente la relación estabilidad-flujo tiene a ser alto, por lo que estos resultados se encontrarían muy por encima de los rangos de aceptación requeridos para aun diseño de mezcla convencional, dado a esto se requiere desarrollar el diseño con otras especificaciones de requisitos mínimos indispensables para las mezclas asfálticas, así como las especificaciones generales que se tiene para las

mezclas convencionales y modificadas presentadas del Instituto del asfalto de 1982.

Por lo tanto, dicho lo anterior se presenta los requerimientos para una mezcla asfáltica modificada con caucho de neumático acorde a las demandas del Manual de Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente MS-22 del Instituto del Asfalto.

Tabla 423-07
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

Figura 8: Requisitos de adherencia

Fuente: Especificaciones Técnicas Generales para la construcción EG-2013

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 (1/2")	15	14
19,0 mm (3/4")	14	13
25,0 mm (1")	13	12
37,5 mm (1 1/2")	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.

Figura 9: Vacíos mínimos en el agregado mineral (VMA)

Fuente: Especificaciones Técnicas Generales para la construcción EG-2013

Por último, para la selección de un diseño de mezcla asfáltica, el Manual del Instituto del Asfalto indica que tal diseño seleccionado para ser empleado en un pavimento, por lo general, es aquel que llega a satisfacer de manera muy económico con cada uno de los diferentes criterios que se establecieron. De tal forma, no se deberá realizar un diseño de mezcla con la finalidad de optimizar una propiedad o característica en particular.

Como ejemplo, una mezcla con valores sumamente altos en la estabilidad, con frecuencia son bajamente deseables, esto debido a que los pavimentos de este tipo de mezcla tienden a ser poco durables, agrietándose prematuramente con un flujo grande de vehículos. Por lo tanto, cualquier cambio o variación en los principios de diseño deberán únicamente ser permitidos bajo las circunstancias poco frecuentes, a menos que el comportamiento en servicio de una mezcla asfáltica en particular señale que la solución llega a ser satisfactoria.

2.3.3.4. Parámetros Diseño Marshall de las mezclas asfálticas en caliente

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	<u>Ver Tabla 423-10</u>		
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.		

(1) A la fecha se tienen tramos efectuados en el Perú que tienen el rango 2% a 4% (es deseable que tienda al menor 2%) con resultados satisfactorios en climas fríos por encima de 3.000 m.s.n.m. que se recomienda en estos casos.

(2) Relación entre el porcentaje en peso del agregado más fino que el tamiz 0,075 mm y el contenido de asfalto efectivo, en porcentaje en peso del total de la mezcla.

(3) Para zonas de clima frío es deseable que la relación Est. /flujo sea de la menor magnitud posible.

(4) El índice de Compactabilidad mínimo será 5.
El índice de Compactabilidad se define como:
$$\frac{1}{\text{GEB } 50 - \text{GEB } 5}$$

Siendo GEB50 y GEB5, las gravedades específicas bulk de las briquetas a 50 y 5 golpes.

Figura 10: Requisitos para mezclas de concreto bituminoso - Parámetros de diseño Marshall

Fuente Tabla 423-06 – MTC EG2013

Como se observa en la figura 10, dentro del cual se detalla los parámetros a obtener de una mezcla asfáltica en caliente, cada uno de estos parámetros generalmente es cualquier característica o propiedad que ayuda a delimitar y precisar el diseño a través de ensayos. Por lo cual, para su mayor enfoque de cada uno de estos parámetros, se verán definidos según lo que demanda el Instituto del Asfalto de 1982, en donde los divide como características y propiedades para cada uno de estos parámetros de diseño Marshall.

Acorde a lo que manda el Instituto del Asfalto de 1982, una mezcla asfáltica preparada en un laboratorio llega a ser analizada con la finalidad de hallar la posible función como estructura de pavimento. Dicho análisis se enfoca en cuatro puntos característicos de las mezclas, y el grado de incidencia que lograrían tener dentro del comportamiento del pavimento. Estas características son:

- Densidad de la Mezcla
- Vacíos de aire
- Vacíos en el agregado mineral (VMA)
- Contenido de asfalto

a. Densidad:

Por parte de la densidad, se puede definir como la relación entre el peso y el volumen específico de la mezcla compactada. Este parámetro es de suma importancia dado a que es necesario obtener una mayor densidad dentro del pavimento finalizado, de tal manera se conseguirá un mejor y duradero rendimiento.

Dentro de los ensayos, pruebas y análisis de un diseño de mezcla, la densidad compactada de la mezcla se detalla mayormente como kilogramo por metro cúbico. Este parámetro es hallado al multiplicar la densidad del agua por la gravedad específica total. La densidad patrón es aquella que se obtiene dentro del laboratorio, la cual se usa como un referente para determinar que la densidad del pavimento finalizado sea el adecuado.

b. Vacíos de aire:

En cuanto a los vacíos de aire, estas son espacios minúsculos llenos de aire, o también llamado bolsa de aire, los cuales están presentes entre agregados de la mezcla compactada. Es de suma necesidad que cada una de las mezclas gradualmente densas tengan dentro cierto grado de vacíos de aire, la cual permita una compactación extra durante el tráfico, como también proporcionar vacíos en donde pueda fluir el asfalto cuando exista una compactación extra.

El contenido de vacíos tiene relación con la durabilidad, este factor es función porcentaje de vacíos. Esta relación se expresa, cuanto menor sea el porcentaje de vacíos, menor permeabilidad tendrá la mezcla. Por otro lado, cuanto más elevado sea el valor de vacíos en la mezcla, esto ocasionara pasajes por donde ingresara el agua y aire, causando deterioro. Así mismo, un valor sumamente bajo de porcentaje de vacíos llegaría a producir el fenómeno de exudación en el asfalto, condición en el cual el exceso de asfalto es presionado hacia la superficie fuera de la mezcla.

c. Vacíos en el agregado mineral:

El VMA o vacíos en el agregado mineral, son las zonas existentes entre cada una de las partículas del agregado de un compactado y culminado pavimento, las cuales contiene aire, incluyendo aquellos espacios las cuales están ocupados de asfalto.

El VMA es la parte disponible representante para acoplar un volumen de asfalto, la cual vendría a ser el efectivo, es la parte del total que no fue perdida dentro del agregado, y también para acoplar el adecuado volumen de vacíos dentro de las mezclas. Cuanto mayor tengamos de VMA, existirá mayor espacio disponible para las películas del asfalto. Estos factores están basados en la proporción de que a mayor grosor por parte de la película el cual cubre el agregado, el factor de durabilidad de la mezcla será mayor.

Si se desea obtener un espesor de película del asfalto durable, los valores del VMA deben ser las mínimas. Un ascenso en la graduación

de densidad de los agregados, llegando al punto en el cual se tenga un estimado del valor para VMA y que esta se encuentre bajo el valor mínimo especificado, resultando de películas finas de asfalto, en mezclas de poca durabilidad y de un aspecto seco. Por lo que, llega a ser perjudicial y desfavorable, en cuanto a la calidad de los pavimentos, la disminución del VMA con el fin de economizar la cantidad de asfalto

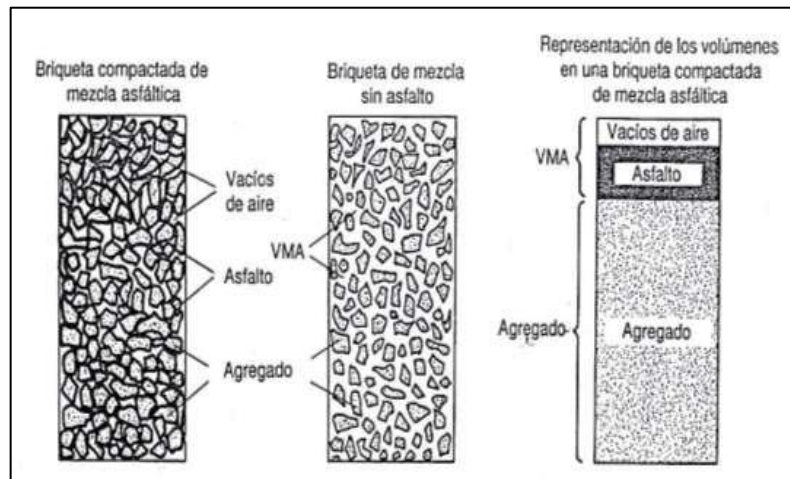


Figura 11: Esquema del VMA

Fuente: Ilustración del VMA en una probeta de mezcla compactada. Adaptado de Instituto del Asfalto (1982).

d. Contenido de asfalto:

El contenido cuantioso de asfalto de una mezcla deriva, en gran parte, de las particularidades del agregado tales como la granulometría y el espacio de impregnación. la granulometría de la combinación está simplemente relacionada con el comprendido opulento del asfalto. entre más delgados me comprima la sucesión de la junta, notable será el área endeble inseparable, y, extraordinario actuará la total de betún intimada para ocultar, semejantemente, sumas los corpúsculos. por otra situación, las ligas crecidamente recias (agregados crecidamente grandes) instan menos revisto debido a que poseen salvo área aparente conjunto

La habilidad de filtración (habilidad para captar asfalto) del combinado manejado en la mezcla es vital para señalar el contenido recomendable de asfalto. esto se compensa a que se tiene que adjuntar idóneo asfalto

a la emulsión para permitir filtración, y para que también se concedan solapar las partículas con una película preparada de asfalto.

El contenido integral de asfalto es la suma de asfalto que corresponde ser adicionada a la conglomerada para cultivar los modos esperados en la liga. el aforo resultante de asfalto es la medida de asfalto no consumido por el agregado; es el importe de asfalto que forma una película ligante valiosa sobre la saliente de los completados. el comedido efectivo de asfalto se coge al sacar la cuantía calada de asfalto del englobado integral de asfalto.

Acorde a lo que demanda el Instituto del Asfalto, año 1982, dentro de las mezclas asfálticas en caliente la trabajabilidad se debe a que estas se diseñan, producen y colocan de una forma en la cual se consigue dar con lo deseado en cuanto a sus propiedades. Se muestran distintas propiedades, las cuales atribuyen un gran valor a la calidad de una mezcla asfáltica en caliente. Dentro de las cuales se comprometen la durabilidad, estabilidad, trabajabilidad, flexibilidad, impermeabilidad, resistencia al deslizamiento y fatiga.

De tal modo, el principal objetivo de dicho diseño de la mezcla es garantizar que la pavimentación final posea una calidad óptima en cuanto a cada propiedad descrita. Por lo que, se es necesario conocer el significado y valor de cada propiedad, su evaluación y desempeño, como también la representación en cuanto al rendimiento del pavimento.

a. Estabilidad

Esta propiedad de la mezcla asfáltica comprende la capacidad que tiene a resistir deformaciones y/o desplazamientos mediante el tránsito de cargas.

Un pavimento final se considera estable al tener la capacidad de conservar su lisura y forma bajo repetidas cargas de tránsito, por su parte si esta es inestable llegaría a desarrollar ahuellamientos, ondulaciones y otras marcas visuales en el pavimento, los cuales indicarían un cambio en la mezcla.

Las condiciones para una adecuada estabilidad se establecerán luego de un arduo análisis completo en cuanto al tránsito, ya que, para un pavimento se toma las especificaciones de estabilidad el cual pende del flujo vehicular que se espera. Dichas especificaciones deberán ser de un alto rango, el suficiente para adecuar cómodamente el tránsito que se espera, pero sin sobre pasar las exigencias de las condiciones de tránsito. Por lo que, valores sumamente altos de la estabilidad llegan a producir una alta rigidez en el pavimento, por lo que nos lleva a ser menos durable de lo esperado.

En la mezcla, los valores de estabilidad dependen de los factores fricción y cohesión interna, donde la fricción interna entre las partículas de los agregados tiene una relación con las características de dicho agregado, están son la textura y forma superficial. Así también, el factor cohesión es una resultante de la disposición en cuanto al ligante asfáltico. Un valor apropiado de cohesión y fricción interna dentro de las mezclas haría que se prevenga un desplazamiento interno entre partículas del agregado causadas por fuerzas que el tránsito ejercen. De manera general, cuanto más angular y áspera sea su textura superficial de las partículas de los agregados dentro de las mezclas, mayor valor tendrá la estabilidad.

La cohesión tendrá un aumento en la fuerza ligante al ser sometido a un incremento de las frecuencias de tráfico, así también, su aumento dependerá del incremento en el valor de la viscosidad del asfalto, o en el descenso del valor de la temperatura en el pavimento. Así mismo, y en cierta medida, el aumento en el valor de la cohesión va de la mano con el aumento del asfalto.

Y cuando se sobrepasa esta cierta medida, se crean películas de asfalto altamente gruesas sobre las partículas de los agregados, el cual produce el descenso en la fricción que hay entre partículas. Por otra parte, existe diversas causas asociadas a la poca estabilidad y los efectos que estas producen en el pavimento.

Tabla 6: Causas y efectos de la inestabilidad del pavimento

BAJA ESTABILIDAD	
CAUSAS	EFECTOS
Demasía del asfalto dentro de la mezcla	Formación de ahuellamiento, ondulación y exudación o afloramiento.
Demasía de la dimensión media de arena en la mezcla	Poca resistencia bajo el compactado y con una prolongación de corto tiempo.
Mayor grado del agregado redondeado sin triturar	Canalización y/o ahuellamiento.

Fuente: Granados Noa, J. L. (2017). Comportamiento Mecánico De La Mezcla Asfáltica En Caliente Modificada Con Caucho Mediante Proceso Por Vía Seca Respecto A La Mezcla Asfáltica Convencional

b. Durabilidad

Esta propiedad del pavimento es la capacidad que tiene para soportar agentes como la desintegración de agregados, oxidación y la segregación de la película del asfalto. Dichos agentes vendrían a ser posiblemente por la acción del tránsito, el clima o la combinación en conjunta de ambos.

En lo general, se llega a mejorar la durabilidad para el pavimento de unas tres maneras, las cuales son, haciendo un mayor uso en lo posible de las cantidades de asfalto, emplear la graduación densa del agregado que resista la separación, por último, desarrollando un diseño y adecuada compactación de la mezcla para lograr una máxima impermeabilidad.

Existe una relación para el aumento de la durabilidad con respecto a la cantidad de asfalto, la cual es tener unas películas de asfalto lo suficientemente gruesas, dado a que estas no llegan a envejecer o endurecen tan rápidos como pasa con las películas delgadas. Por lo que, el asfalto conserva para mayor tiempo sus originales características. Además, el suficiente contenido máximo de asfalto llega a sellar eficientemente la mayor cantidad de vacíos en el pavimento, logrando una difícil penetración por parte del agua y aire. Así mismo, se debe

contemplar un contenido de vacíos adecuados y suficientes, el cual permita a la expansión del asfalto a temperaturas altas del clima.

Al tener una densa graduación de los agregados resistentes a segregación, estas contribuyen de tres formas a la durabilidad, las cuales son, proporcionar el mayor contacto posible entre partículas de los agregados, mejorando un incremento en la impermeabilidad. Así mismo, proporciona una resistencia a la desintegración a causa del flujo de tránsito. Los agregados que resisten a la segregación tienden a tener una mayor resistencia a la acción de tránsito y agua, factores que tienden a la disolución entre partículas de agregado y las películas de asfalto, lo que conduciría a una segregación del pavimento. Por último, el ingreso intrusivo de los factores agua y aire se lograrían minimizar si se desarrolla un diseño de mezcla, como también la compactación debe ser la adecuada, para así conseguir el valor máximo posible de impermeabilidad.

Por otra parte, existe diversas causas asociadas a la poca durabilidad y los efectos que estas producen en el pavimento como se puede apreciar en la siguiente tabla.

Tabla 7: Causas y efectos de la baja durabilidad

MÍNIMA DURABILIDAD	
CAUSAS	EFFECTOS
Poco contenido del asfalto	Un inmediato endurecimiento del asfalto y la desintegración dado a la pérdida de agregado.
Elevado grado de vacíos dado al diseño o poca compactación	Temprana solidez del asfalto, y formación de agrietamiento seguidamente.
Sensibilidad del agregado al agua – Hidrofílicos	La película formada por el asfalto se desprende, dando un pavimento desintegrado.

Fuente: Granados Noa, J. L. (2017). Comportamiento Mecánico De La Mezcla Asfáltica En Caliente Modificada Con Caucho Mediante Proceso Por Vía Seca Respecto A La Mezcla Asfáltica Convencional

c. Impermeabilidad

Esta propiedad viene a ser la resistencia que existe para dar paso a los agentes aire y agua hacia el interior o a través del pavimento. Esta característica del pavimento está sumamente relacionada con el porcentaje de vacíos que contiene un pavimento compactado, y de tal forma la mayor parte de la controversia sobre el grado de vacíos en el diseño de las mezclas tienen relación con la impermeabilidad. No obstante, el valor del contenido de vacíos es un indicador potencial del grado de aire y agua que pasaría a través del pavimento internamente, su cualidad de dichos vacíos resalta mucho más que la cantidad que pueda tener. Esta característica está influenciada por el tamaño de vacíos en el pavimento, dejando de lado que estos vacíos están o no conectados, y también debido al acceso que posee hacia la superficie. Así mismo, aunque se hable de la importancia en cuanto a la impermeabilidad que debe poseer los pavimentos, virtualmente cada mezcla asfáltica que se lleva a fase de construcción tiene un cierto grado de permeabilidad, este valor llega a ser aceptable cuando cumpla con los límites que se especifican.

Por otra parte, existe diversas causas asociadas a la poca impermeabilidad y los efectos que estas producen en el pavimento.

Tabla 8: Causas y efectos de la permeabilidad de la mezcla

DEMASIADO PERMEABILIDAD DE LA MEZCLA	
CAUSAS	EFFECTOS
Poco contenido del asfalto	Una fina película dejaría un envejecimiento prematuro y desintegración del material.
Elevado grado de vacíos dado al diseño	El ingreso del aire y agua sería con mayor facilidad, provocando oxidación y desintegración.
Inapropiada compactación	Dejará elevado grado de vacíos lo que provoca infiltración del agua y poca estabilidad.

Fuente: Granados Noa, J. L. (2017). Comportamiento Mecánico De La Mezcla Asfáltica En Caliente Modificada Con Caucho Mediante Proceso Por Vía Seca Respecto A La Mezcla Asfáltica Convencional.

d. Trabajabilidad

Esta propiedad se describe como la facilidad para colocarse y compactarse de las mezclas asfálticas. Dicha trabajabilidad se puede mejorar al modificar los parámetros de diseño de la mezcla, las características del agregado y/o su granulometría.

Al contener una mezcla un alto grado de agregado grueso, tiene a provocar una segregación durante el manejo de dicha mezcla, por lo que también sería complicado de compactar. Así mismo, una demasía en alto contenido de relleno mineral afectaría la trabajabilidad, ocasionando que la mezcla se torne muy viscosa, ocasionando que la compactación sea complicada.

Es de suma importancia tener una buena trabajabilidad, y esencialmente importante en lugares donde se necesita rastrillar cantidades notables de mezcla, lugares como curvas pronunciadas o alrededor de alcantarillas. No obstante, no se debe llegar a mezclas fácilmente deformables o trabajables, dado a que estas mezclas también llamadas mezclas tiernas, tienden a ser altamente inestables para colocarse y compactarse con propiedad. Estas mezclas tiernas comúnmente son un producto de la falta de relleno mineral, en la demasía en cuanto al agregado de tamaño mediano, partículas redondeadas y lisas, y/o alto grado de humedad dentro de la mezcla.

Tomando en cuanto al asfalto, esta no llega a ser la causa principal para tener una adecuada trabajabilidad, no obstante, si tiene efecto que atribuye a esta propiedad. Se sabe que la temperatura de las mezclas influye en la viscosidad del asfalto, si se tiene un descenso potencial de la temperatura provocara que la mezcla sea mínimamente trabajable, mientras que si asciende exponencialmente la temperatura provocaría que se convierta en una mezcla tierna. Por último, el grado de asfalto afecta igualmente a la trabajabilidad de la mezcla.

Por otra parte, existe diversas causas asociadas a la mala trabajabilidad y los efectos que estas producen en el pavimento

Tabla 9: Causas y efectos en la trabajabilidad de la mezcla

PÉSIMA TRABAJABILIDAD	
CAUSAS	EFFECTOS
TM de las partículas: grandes	Rugosidad en la superficie, lo que dificulta su colocación.
Agregado grueso en demasía	Posibilidad a ser menos compactado dado a la dificultad que ocasiona.
Muy poca temperatura en la mezcla	Falta de revestimiento en el agregado, rugosidad en la superficie, poca durabilidad.
Cuantioso material medio de arena	La mezcla se conserva blanda o tierna, desplazándose bajo la compactadora
Poco relleno mineral	Mezcla asfáltica sumamente permeable y blanda
Elevado relleno mineral	Mezcla altamente viscosa, poco manejable y poca durabilidad

Fuente: Granados Noa, J. L. (2017). Comportamiento Mecánico De La Mezcla Asfáltica En Caliente Modificada Con Caucho Mediante Proceso Por Vía Seca Respecto A La Mezcla Asfáltica Convencional.

e. Flexibilidad

Esta propiedad no es más que la capacidad del pavimento para acoplarse, sin producir grietas, a desplazamientos y/o asentamientos paulatinos de la subrasante. Esta propiedad llega a ser una característica deseable para toda mezcla asfáltica, ya que virtualmente se conoce que la subrasante tiene a asentarse debido a las cargas o a expandirse a causa de la expansión del suelo.

Una mezcla con granulometría abierta y alto contenido de asfalto es en lo general más flexible que otra mezcla con granulometría densa y con un contenido bajo de asfalto. En lo particular sucede que ocasionalmente los requisitos de flexibilidad difieren con lo requerido para los valores de estabilidad, de tal conflicto se debe conseguir un equilibrio para ambas.

f. Resistencia a la fatiga

Esta propiedad viene a ser la resistencia a flexión frecuente debido a las cargas vehiculares. Dado a investigaciones previas se demostró que el

grado de vacíos relacionado al contenido del asfalto y la viscosidad de la misma poseen un impacto notable sobre la resistencia a la fatiga. Cuando el valor de vacíos dentro del pavimento asciende, sea por un diseño o debido a una carencia en la compactación, la resistencia descende. Así también, cuando un pavimento contiene un asfalto endurecido y envejecido notablemente tiende a tener un menor valor a la fatiga.

La resistencia y espesor del pavimento, como también el alcance que posee la subrasante de soportar son características vinculadas con la vida útil del pavimento y su prevención frente al agrietamiento debido a cargas vehiculares. Pavimento con valores de espesor grande puestas sobre subrasantes resistentes tienden a flexionarse poco, a diferencia de los pavimentos con espesor delgado o los que se encuentren encima de una subrasante débil.

Por otra parte, existe diversas causas asociadas a la mala resistencia a la fatiga y los efectos que estas producen en el pavimento.

Tabla 10: Causas y efectos de la pésima resistencia a la fatiga

RESISTENCIA BAJA A LA FATIGA	
CAUSAS	EFFECTOS
Poco contenido del asfalto	Efectos de agrietamiento por poca resistencia a la fatiga
Elevado grado de vacíos dado al diseño	Prematuro envejecimiento del asfalto, y también efectos de agrietamiento
Poca o mínima compactación	Prematuro envejecimiento del asfalto, y también efectos de agrietamiento
Inapropiada dimensión del espesor del pavimento	Flexión bastante alta, seguido por efectos de agrietamiento a causa de la fatiga

Fuente: Granados Noa, J. L. (2017). Comportamiento Mecánico De La Mezcla Asfáltica En Caliente Modificada Con Caucho Mediante Proceso Por Vía Seca Respecto A La Mezcla Asfáltica Convencional.

g. Resistencia al deslizamiento

Esta propiedad tiene que ver con la habilidad que posee la superficie de un pavimento para minimizar o disminuir el factor deslizamiento de las ruedas de vehículos que hacen contacto, especialmente cuando dicha

superficie se encuentre mojada. Para lograr una adecuada resistencia al deslizamiento, la llanta o rueda de los vehículos deben de conservar el contacto con el agregado en vez de girar sobre la película de agua que se formó en la superficie, este fenómeno se llama hidro planeo.

Para conseguir un alto grado de resistencia al deslizamiento se requiere de una superficie rugosa y áspera en el pavimento, así mismo, los agregados deberán de resistir el pulimiento o aislamiento bajo el flujo vehicular. En cuanto a las mezclas poco estables o inestables, estas al llegar a una deformación y exudación, presentarían graves problemas de resistencia.

Por otra parte, existe diversas causas asociadas a la poca resistencia al deslizamiento y los efectos que estas producen en el pavimento

Tabla 11: Causas y efectos de la baja resistencia al deslizamiento

RESISTENCIA BAJA AL DESLIZAMIENTO	
CAUSAS	EFFECTOS
Alto contenido del asfalto	Resistencia baja al deslizamiento y exudación
Mala gradación del agregado o de inadecuada textura	Efecto posible del hidro planeo, debido al pulimentado pavimento
Pulimentado del agregado	Resistencia baja al deslizamiento

Fuente: Granados Noa, J. L. (2017). Comportamiento Mecánico De La Mezcla Asfáltica En Caliente Modificada Con Caucho Mediante Proceso Por Vía Seca Respecto A La Mezcla Asfáltica Convencional.

Para desarrollar un diseño de mezcla asfáltica de pavimentación se debe tener en cuenta, la selección y proporción de materiales para conseguir las propiedades requeridas en el pavimento finalizado. La mira principal del método de diseño está basada en hallar una gradación y combinación económica del agregado, como también tener un adecuado asfalto, considerando que cumplan las especificaciones, las cuales producirán una mezcla con:

- Adecuada proporción de asfalto para obtener y garantizar durabilidad al pavimento.
- Una estabilidad idónea el cual cumpla y satisfaga toda demanda del flujo vehicular sin que se produzca deformaciones.
- Un valor alto adecuado y suficiente de vacíos el cual concederá una adición ligera a la compactación frente las cargas vehiculares si producir el fenómeno de exudación o inestabilidad, como también lo mínimo necesario para bloquear el ingreso del agua y aire el cual produce efectos dañinos.
- Un alto grado de trabajabilidad el cual permita una eficiente colocación sin que se produzca segregación.

Así también, para el ASTM D6927-15, dentro de la parte de terminología se describe:

- La densidad, vacíos con aire, fluencia, estabilidad, vacíos en el agregado mineral o vacíos llenos de asfalto son utilizados para el diseño de una mezcla asfáltica en laboratorio, por su parte la estabilidad y el flujo podrían ser utilizados para el monitorea en el proceso de la planta de producción.
- La estabilidad y el flujo son características de una mezcla asfáltica, determinados mientras son compactadas con geometrías específicas. Los ensayos se pueden realizar con el método tradicional el cual consta de un bastidor de carga con un anillo de carga y un indicador de deformación, como también del método automático el cual hace uso de una grabadora de carga – deformación.
- La estabilidad es la resistencia a una carga máxima que se obtendrá al momento de aplicar una secuencia constante de deformación. Figura 12 (a) se observa un tipo de falla poco definida, a su vez la figura 13 (b) se detalla que el método alternativo la estabilidad se define como la carga que se obtiene cuando la carga descende y la curva tiene una forma horizontal.
- El flujo por su parte es una medida de deformación de la mezcla asfáltica hallado en la prueba de estabilidad. Es la total deformación de

una muestra, desde el punto donde la tangente proyectada de la parte lineal de la curva corta el eje x hasta el punto en el que la curva comienza a ser horizontal, tal como se muestra en la figura 12 y 13. Este punto corresponde generalmente al pico de estabilidad, no obstante, cuando la condición de falla no está definida puede ser seleccionado como el punto sobre la curva que se encuentre seis unidades de flujo (1 unidad de flujo = 0.01 pulgadas) ó 1.5 mm a la derecha de la mejor línea tangente.

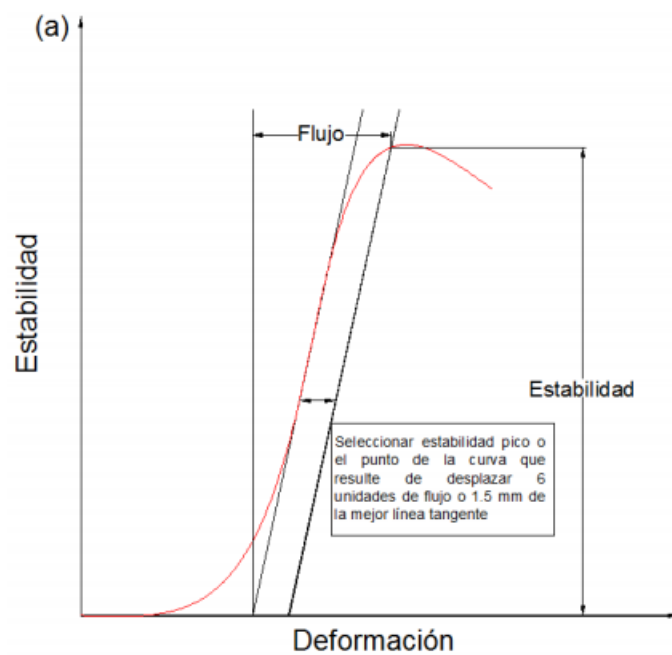


Figura 12: Determinación de flujo para el tipo (a) de falla de la muestra

Fuente: Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures

- Carreteras.
- Campos de fútbol.
- Zonas de juego y gimnasia.
- Pista de atletismo.
- Césped artificial.
- Camas para ganado.
- Calzado.
- Baldosas (losetas)
- Mezclas de caucho.

Así mismo, el poder calorífico alto del neumático oscila en los 7500 Kcal/kg, el cual sobre pasa al carbón, aunque llega a ser menos contaminante, dado a que el neumático tiene un contenido de azufre menor, establecido como buen combustible, la cual se valoriza energéticamente en cementeras, cerámicas, centrales eléctricas, obtención de vapor, fábricas de papel, etc.

En la actualidad la reutilización de este material es aplicado con mayor frecuencia en los campos polideportivos. Por otra parte, las técnicas con un consumo elevado y potencial del NFU son las de valorización energética y las de mezclas asfálticas para pavimentos. De modo que, de ambas, por jerarquía del medioambiente, la de un gran interés es la reutilización para la fabricación de mezclas asfálticas.

2.3.4.1. El polvo de caucho

Dado el Manual de Empleo de Caucho de NFU en Mezclas Bituminosa del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, lanzado el 2007, detalla que mediante la trituración de neumáticos se obtiene el polvo de caucho. Estos neumáticos vienen a ser un elemento elaborado con una estructura bastante complicada de alrededor de unos 200 componentes, si bien sus componentes básicos viene ser el caucho natural y sintético, sílice, antioxidantes, cargas reforzantes, material metálico, textiles y demás ingredientes indispensables para el desarrollo de la vulcanización. Para obtener el polvo de caucho se tritura los neumáticos fuera de uso enteros hasta conseguir el tamaño de partículas deseado, como también separando los tejidos y minerales que tienen

incorporados. Factores como la manera de triturar, granulometría del material y el englobado excedente de contaminante textil y metálico consiguen afectar a las características y propiedades del polvo obtenido de caucho. Así mismo, dentro del uso en mezclas asfálticas se precisa que las partículas del caucho de NFU triturado tengan tamaños finos por debajo de 2 mm o 0.5 mm, dependiendo de su aplicación.

Tabla 12: Composición de llantas según el tipo

Componente	Llanta de carro liviano	Llanta de camión
Caucho natural	14%	27%
Caucho sintético	27%	14%
Negro de humo (carbono)	28%	28%
Acero	14 – 15 %	14 – 15 %
Otros aditivos	16 – 17 %	16 – 17 %
Peso promedio (óxidos, etc.)	8.6 kg	45.4 kg

Fuente: Guía práctica sobre re-uso de llantas usadas para municipalidades

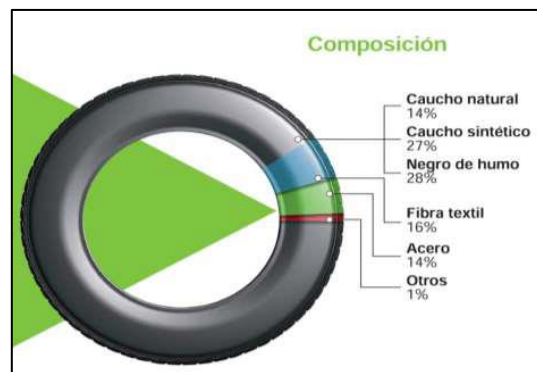


Figura 14: Composición interna de llantas

Fuente: Composición aproximada de los neumáticos. Adaptado de tratamiento de Neumáticos Usados (2016)

2.3.4.2. Consideraciones técnicas

De la misma forma, el Manual de Empleo de Caucho de NFU en Mezclas Bituminosa del Centro de Estudios y Experimentación de

Obras Públicas, lanzado el 2007, señala que el resultado producido al modificar una mezcla con el polvo de caucho NFU, se debe considerar el tipo y naturaleza de cemento asfáltico, la granulometría y del método de obtención de dicho modificador, en el caso de llevar un o varios aditivos se debe verificar su composición química, como también su proporción relativa de los componentes, de la estructura de producción y condición operante como el tiempo o temperatura, y demás.

Por medio del proceso por vía húmeda para la modificación de las mezclas asfálticas, de enlista los beneficios, efectos y ventajas que dicho proceso tiene para las mezclas y el asfalto como tal.

Se detalla dos efectos primordiales que se consigue al adicionar polvo de caucho NFU a una mezcla asfáltica:

- El caucho en polvo tiene el papel de densificar, incrementando la estimación de viscosidad del asfalto. Dentro de las mezclas asfálticas este fenómeno permite enrollar con películas sumamente gruesas de asfalto las partículas de agregado, sin permitir que ocurra exudación o escurrimientos.
- La incorporación de caucho en polvo llega a modificar la reología en los asfaltos base, de tal forma que incrementa la resiliencia y elasticidad a elevadas temperaturas, de esta manera la susceptibilidad térmica del asfalto disminuye.

Así también, al modificar las mezclas asfálticas se produce efectos en conjunto:

- Una mejora en la resistencia a la formación de ahuellamientos, debido a su alta viscosidad, resiliencia y marca de reblandecimiento que tiene la mezcla modificada respecto a la convencional.
- Descenso en la susceptibilidad térmica con respecto a las mezclas desarrolladas con asfaltos convencionales.
- Incremento de la resistencia al agrietamiento a causa de la fatiga o reflexión dentro de las capas inferiores, a comparación de las mezclas que contiene asfalto convencional, a causa de los altos contenidos que acepta este método para el ligante.

- Alto incremento en la resistencia al envejecimiento y oxidación, debido al mayor uso en el incremento de asfalto, como también debido a que el caucho posee antioxidantes como uno de sus componentes.

Así mismo, se deriva del empleo del caucho como modificador otras ventajas, desde el punto de vista de seguridad, dado a que se mantiene por un tiempo prolongado el contraste de las marcas viales. Es conveniente mantener

- Dado a los precios en la actualidad, la modificación de asfalto con caucho consigue elevar la viscosidad de una forma más económica que los existentes polímeros, de modo que se es posible el desarrollo de asfaltos muy viscosos, con lo que hasta ahora no se contaba por razón de precios.

- Al ser empleados dentro de un rango de viscosidades medias, el asfalto con adición de caucho no llega al grado de modificación reológica de dichos ligantes, no obstante, es suficiente dentro de algunas aplicaciones y se disminuye el costo, por lo que logran un amplio uso de dichos asfaltos.

Dentro de la modificación de la mezcla asfáltica con adición de caucho en polvo mediante la vía seca se puede alcanzar similares ventajas, no obstante, son en menor escala a comparación de los mencionados con anterioridad. Así mismo, las mezclas procesadas mediante la vía seca precisan de procedimiento específicos dentro de la fabricación, como también un control en la condición de ejecución, por lo cual amerita de empresas capacitadas con un control riguroso en la calidad. Sus ventajas llegan a ser:

- Se logra una mezcla asfáltica más económica que con los asfaltos modificados.

- Esta tecnología llega a ser accesible a las empresas que fabrican mezclas asfálticas, y no únicamente a las empresas dedicadas a producir asfaltos modificados.

- Mayor facilidad de trabajo directo con el caucho en polvo de una zona o región específica, sin llegar a tener traslados complementarios.

2.3.4.3. Consideraciones medioambientales

De igual forma en el Manual de Empleo de Caucho NFU de Mezclas Asfálticas del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, del año 2007, señala que las primordiales ventajas en cuanto al medio ambiente que se origina del uso de caucho en polvo de llantas como agente modificante en más mezclas asfálticas se da a continuación:

- Se respeta y ejecuta el principio de jerarquía ambiental, rehusando y reciclando todos los remanentes, y por ende se disminuye el volumen de llantas NFU destinados a depósitos de vertederos y recuperación para la parte energética. El uso de estos residuos concede a su vez el ahorro para los recursos inherentes.
- La ocupación dentro de la mezcla asfáltica conlleva a reducir los niveles sonoros de rodadura en el pavimento. Estos niveles sonoros se reducen entre 3 a 4 dB respecto a las mezclas convencionales.

Por otra parte, existe consideraciones que se deben optar en el momento de emplear el caucho de neumáticos en desuso dentro de las mezclas asfálticas:

- Al optar por el método de vía húmeda como incorporación a altas temperaturas podría incrementar las emisiones, como humo o partículas, durante el proceso de elaboración y extensión del material asfáltico. No obstante, estas emisiones que se produjeron al fabricar el asfalto con caucho tienen el mismo grado aproximado que la fabricación del asfalto convencional, así mismo, estas emisiones de partículas o humo como componentes peligrosos se encuentran dentro los rangos autorizados.
- La utilización del caucho no tiende a presentar un riesgo para la salud de los diferentes trabajadores de las centrales de fabricación, extendedoras o compactadoras. Para esto se realizó un seguimiento y estudio de la salud de los operarios en donde se midieron las emisiones de este material, de esta forma se comprobó con precisión que no existe un riesgo o que son despreciables hacia la salud al emplear el caucho, y

también se comprobó que dichas emisiones son similares a la que produce las mezclas convencionales.

- Por último, un factor favorable acerca del uso de caucho en las mezclas es que, al agotar la capacidad de servicio de dichas mezclas, estas pueden ser recicladas.

Para finalizar, el Boletín Técnico N°3 – Mejoras mecánicas de las mezclas asfálticas con gran de caucho reciclado – Instituto del Desarrollo urbano del año 2015, precisa que para producir un metro cúbico de mezclas asfálticas con GCR (grano de caucho reciclado) se es necesario aproximadamente tres neumáticos y medio, y se amerita de unos 250 neumáticos para poder producir una tonelada de GCR. De modo que es una excelente solución frente al impacto negativo del medio ambiente, que se genera por el mal uso de las llantas que están en fuera de uso.

2.3.4.4. Características físicas del caucho en polvo

Las características físicas del caucho en polvo, de acuerdo a la Guía de fabricación de asfaltos con caucho de neumáticos – Sistema de gestión integrado de neumático usado (Gallego y Saiz, 2017) y el Manual del Empleo del Caucho NFU en mezclas asfálticas (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, 2007) estos escritos indican y detallan ciertas propiedades y características físicas que el caucho en polvo debe poseer para ser adicionadas a una mezcla asfáltica en caliente, con la finalidad de conseguir óptimas características.

- Granulometría de las partículas y tamaño máximo del caucho

Estas características son parámetros con gran influencia dentro del comportamiento de la mezcla. La granulometría de las partículas del caucho debe estar contenido dentro de uno de los husos definidos en la siguiente tabla. Siendo la Norma UNE-EN 933-2 de 1996, el determinante granulométrico.

Tabla 13: Huso granulométrico específico para el caucho en polvo

Huso granulométrico para el caucho en polvo			
Tamiz	P - 1	P - 2	P - 3
mm	% pasa	% pasa	% pasa
2.000	100		
1.190	45 – 90	100	
0.600	30 – 80	10 – 80	100
0.300	5 – 50	5 – 70	0 -- 40
0.150	0 – 30	0 – 30	0 -- 25
0.075	0 – 15	0 – 15	0 -- 15

Fuente: Adaptado de Centro de Estudios y Experimentación de Obras Pública (2007).

- Contenido de Humedad

El grado de humedad será comprendida acorde a la norma UNE 103-300-3 de 1993, a menos que la temperatura del horno en calentamiento sea de 105 +/- 5°C y el valor mínimo de la masa de muestra sea de 100 gr. El grado de humedad capaz de producir espuma durante la elaboración, debe llegar a ser menos que 0.75%.

- Contenido de material ferromagnético o acero

El contenido libre de acero que posee las partículas de caucho se logra conoce mediando el uso de un imán, con el cual se extrae el acero acorde a lo que demanda la Norma UNE-CEN/TS 14243:2012 EX del año 2012, en el cual se debe contener 500 gr como mínimo de muestra de caucho triturado el cual se esparce hasta tener un espesor de máximo 2 cm encima de una bandeja. De tal modo, esta norma exige que el contenido de ferromagnéticos dentro del material no debe ser superior a 0.01% en peso del caucho en polvo.

- Contenido de textil

El grado de textil se hallará de acuerdo con la norma UNE - CEN/TS 14243:2012 EX del 2012. Dentro se detalla que el material textil no debe ser superior a 0.5% en su contenido, equivalente al peso del caucho en polvo.

- Impurezas

Acorde a la norma UNE-CEN/TS 14243:2012 EX del 2012 se determinará el contenido de las impurezas dentro del material, en base a una desunión densimétrica del material en donde la mínima muestra de caucho será de 150gr, el cual es vertido en una solución salina de 1.25 gr/cm³ haciendo que se produzca el fenómeno de decantación de las extrañas partículas. El grado de cualquier tipo de impurezas, tales como vidrio, arena, etc., no sobrepasa los 0.25% en peso del caucho en polvo.

2.3.4.5. Métodos de recuperación de material presente en los neumáticos

Acorde a los estudios para conocer las mejoras mecánicas realizados a las mezclas asfálticas modificadas con la adición de caucho realizada en la Universidad los Andes en el año 2002, se realizan distintos métodos para rescatar algunos materiales que se encuentran en las llantas en fuera de uso, como también para deshacer sus componentes peligrosos. Alguno de estos es:

- Trituración mecánica

También llamado método de la granulación a una temperatura ambiente es un desarrollo netamente mecánico, sin contaminación alguna al medio ambiente, es una tecnología que incluye una trituradora la cual reduce las llantas en desuso a muy finas partículas dentro de un ensayo llamado granulometría por cribado. Este método tiene sistemas de clasificación y separación, las cuales remueven los trozos de metal y demás residuos.

- Termólisis

Método que tiene como finalidad descomponer los neumáticos en diferentes componentes usando la tecnología de calentamiento.

- Trituración criogénica

Método en el cual se hace uso del nitrógeno líquido, con la finalidad de congelar pedazos de llantas para cristalizarlos y llegar a romperlos con

mayor facilidad. Este proceso requiere de complicadas y costosas instalaciones que lo convierten en poco rentable.

- Pirolisis

Método que tiene como finalidad obtener los compuestos básicos y originales del neumático aplicando altas temperaturas en un espacio ausente de oxígeno, de manera que destruya todo tipo de enlace químico que tienen los neumáticos.

2.3.5. Volumen de llantas reciclado en el uso de mezclas asfálticas

Acorde a lo descrito en la Asociación de Pavimentos de Caucho (RPA, por sus siglas en inglés) de Phoenix, Estados Unidos. Describe lo siguiente:

Dado a la especificación de un diseño de mezcla, como puede ser el AR Hot Mix con el espesor de 2plg, esta llegara a utilizar cerca de 2000 llantas por milla del carril. Dentro del método de sellado (pulverización), se hace el uso de 500 neumáticos por milla del carril. Así también, se conoce que cerca de los 10 millones de neumáticos son reciclados en la aplicación de pavimentos, esto a su vez dependerá del método usado al momento de su aplicación, el cual oscila entre 500 a 2000 llantas en fuera de uso por cada milla de pavimento. Por lo que, para un tramo de milla de cuatro carriles de sección de carretera, se llegaría a usar entre 2000 y 8000 neumáticos con la finalidad de construir una carretera más optima (segura, duradera y silenciosa). Así mismo, dichos neumáticos están compuestos aproximadamente de un 70% de caucho, respecto al total. Este caucho se compone por 15% de caucho natural, 27% de caucho sintético y 28% de negro de humo. Otros compuestos dentro de los neumáticos comprenden un 15% de acero y 16% de tela. Por lo tanto, nace de esto la formula del cual se conoce el cálculo de uso aproximado de llantas, donde 1000 neumáticos dentro de un carril de una milla, con un espesor de 1plg; se requiere para pavimentar dicha especificación, unas 383 toneladas de mezclas GG. Por otro lado, si el aglutinante llega a ser de un 8% en peso de la mezcla, se necesitará 30.64 toneladas de aglutinante por una pulgada de milla. Y si tenemos un 20% de caucho respecto del aglutinante, se va a requerir de unos 6.12 toneladas de caucho. Estas 6.12ton equivalen a unos

12.56 libras, por lo que si se recuperan 12 libras de cada neumático, al dividirlos (12.56 entre 12) no da un valor de 1021 llantas. (pág. 6)

Un punto importante para detallar es que en el Perú al año 2016, según la información brindada por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones, se llegó a tener un parque automotor de 2'281,000 de vehículos. A demás el departamento de Lima es el que cuenta con mayor cantidad de vehículos (1'752,919 vehículos) como podemos apreciar en la siguiente tabla.

Tabla 14: Parque automotor estimado según departamento

Departamentos	CLASE DE VEHÍCULO									
	TOTAL	Automóvil	Station wagon	Camionetas			Omnibus	Camión	Remolcador	Remolque Semirem.
				Pick-up	Rural	Panel				
TOTAL	2'661.719	1'167.041	403.193	283.479	365.316	43.387	80.119	213.155	43.604	62.425
Lima / Callao	1'752.919	807.529	284.251	163.793	236.502	31.006	50.441	116.601	29.520	33.276
La Libertad	190.073	77.440	21.459	25.037	18.382	1.372	7.105	21.208	4.548	13.522
Arequipa	187.929	89.335	14.236	21.353	27.142	1.989	5.099	16.853	4.804	7.118
Cusco	73.997	29.313	12.253	9.108	11.300	578	2.938	8.160	281	66
Lambayeque	68.261	30.741	5.908	9.192	9.418	1.034	1.348	8.088	572	1.960
Junín	67.049	22.296	12.308	8.749	9.715	295	2.139	9.231	881	1.435
Piura	55.060	23.771	4.922	10.378	7.915	400	1.280	5.503	518	373
Tacna	49.382	18.040	11.476	4.777	5.580	1.556	1.703	4.727	614	909
Puno	47.696	8.711	8.867	4.740	14.029	3.246	2.562	4.887	297	357
Áncash	33.542	14.484	5.472	4.009	5.555	235	940	2.415	199	233
Los demás	135.811	45.381	22.041	22.343	19.778	1.676	4.564	15.482	1.370	3.176

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones

Según el INEI este parque automotor, en el 2016, genero un aproximado de 1'750,000 de neumáticos en desuso anual, esto se traduce en 45.000 toneladas de neumáticos en desuso.

Tabla 15: Parque automotor y neumáticos fuera de uso en el Perú

Descripción	Cantidad
Cantidad de vehículos (2016)	2'281,000
Cantidad de neumáticos en desuso anual (Ton)	45,000
Cantidad de vehículos (2019)	2'600,000

Fuente: Elaboración Propia

$$\text{Cantidad de neumáticos/vehículo al año} = \frac{\text{Cantidad de neumáticos}}{\text{Cantidad de Vehículos}}$$

$$\text{Neumático en desuso/vehículo} = \frac{45.000}{2'281.000} = 0.019 \text{ ton}$$

Del cálculo anterior podemos determinar que se generan 0.019 toneladas de neumáticos en desuso al año por vehículo, con este dato y aplicando una

relación inversa determinaremos la cantidad de neumáticos en desuso en total generada en el año 2019 del cual tenemos la información más reciente.

Neumáticos al año 2019 (ton)

$$= \frac{\text{Neumáticos en desuso}}{\text{vehículo}} * \text{cantidad de vehiculos (2019)}$$

$$\text{Neumáticos al año 2019 (ton)} = 0.019 * 2600000 = 51293 \text{ ton}$$

La cantidad de neumáticos en desuso que se generó en el año 2019 es de aproximadamente 51293 toneladas, lo cual es una cantidad importante sobre todo porque al no tener en el Perú plantas de reciclaje, este material se acumula en botaderos lo cual genera contaminación.

2.3.6. Técnicas de utilización de polvo de caucho en mezclas asfálticas

2.3.6.1. Proceso por vía seca

El Manual del Empleo de Caucho NFU en mezclas asfálticas del Centro de Estudios y Experimentaciones de Obras Públicas, del año 2007, precisan que este método de incorporación consiste en incrustar el caucho en polvo directamente al mezclador del centro de fabricación de las mezclas asfálticas, en conjunto el asfalto y agregados. Dentro de este método se observa que el caucho en polvo llega a jugar el papel de agregado adicional, no obstante, las partículas de un tamaño fino interactúan con el asfalto, llegando a modificar las propiedades, de este modo se consigue un buen comportamiento de las mezclas asfálticas. En resumen, este proceso de modificación tiene como un componente más de las mezclas al caucho en polvo incorporado.



Figura 15: Esquema de fabricación de asfalto modificado con caucho por vía seca

Fuente: Adaptado de Bermejo (2010)

I. Tecnologías

Con respecto al Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con caucho de neumáticos de la Universidad los Andes, las dos tecnologías de mayor uso en Estados Unidos en cuando al uso del GCR por la incorporación de la vía seca son las tecnologías PlusRide y Genérica o sistema TAK, por otra parte, existe otra popular tecnología que hace uso de la granulometría convencional, el cual tiene inicios en España y en la actualidad usado en varios países.

- PlusRide

El PlusRide es una tecnología que originalmente fue desarrollado en Suecia en los años 1960, y posteriormente registrado en Estados Unidos con el nombre PlusRide por la empresa EnviroTire. El GCR es adicionado a las mezclas asfálticas en proporción de 1 a 3% respecto al peso del agregado total. El GCR tiene como partículas unos tamaños que oscilan los 4.2 mm a 2.0 mm. El grado de vacíos con aire en las mezclas debe oscilar entre 2 y 4%, y generalmente se consiguen con un rango de 7.5 a 9% de contenido de asfalto.

- Genérica

El método Genérica fue dado por el Dr. Barry Takallou en el año 1980, en el cual se estipula una producción de mezcla asfáltica con una granulometría densa. Tal método emplea el GCR grueso como también el fino con la finalidad de igualar la granulometría del agregado obtenido de una mezcla mejorada. Con este proceso se ajusta la granulometría del GCR para acoplar la granulometría del agregado. A diferencia de la tecnología PlusRide, en este método se divide la granulometría del GCR en un par de fracciones en donde la parte gruesa se comporta como un componente elástico dentro de las mezclas, y la fina se ocupa de intervenir en el cemento asfáltico. En esta tecnología el grado de GCR no debe superar el 2% del peso de la mezcla total.

- Convencionales

Tecnología concebida en España para el uso del GCR para mejorar las mezclas asfálticas haciendo uso de la granulometría habitual la cual no implica de consumos altos de cemento asfáltico, no obstante, la aportación de caucho es en menor cantidad, cerca de un 2% del peso del agregado total. Estas mezclas tuvieron ensayos de laboratorio, evaluándolos dinámicamente y colocándolos en vías dando excelentes resultados.

II. Aplicaciones

- Mezclas asfálticas en caliente

Al hacer uso de un tipo de mezcla discontinua con GCR, la variedad y discontinuidad del tamaño de partículas del agregado pétreo crea una textura medianamente gruesa que merma grandemente el ahuellamiento y facilita el deslizamiento del flujo vehicular encima del pavimento. Si bien las propiedades con similares al de asfalto-caucho, las mejoras dentro del asfalto suministra características de adhesividad y elasticidad a las mezclas asfálticas, lo que conlleva al incremento de la resistencia a la fisuración inducido por las capas granulares si no son sumamente grandes las deformaciones.

Dentro del GCR, las partículas que son gruesas hacen el papel de agregado adicional en las mezclas asfálticas, el cual lleva a mejorar su desempeño. Así mismo, las partículas del GCR expuestas en la superficie de la carpeta asfáltica llegan a protagonizar una importante función, el cual es dar un mejor agarre a las llantas, impidiendo que estas se deslicen con facilidad, y las partículas que se encuentran en el interior del pavimento refuerzan y apoyan a retardar la fisuración inducido por las capas inferiores al absorber los esfuerzos y obstaculizando la difusión de fisuras.

2.3.6.2. Proceso por vía húmeda

De igual forma, el Manual de Empleo de Caucho NFU en mezclas asfálticas del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, detallan que el mencionado proceso es la mezcla anticipada del caucho en polvo con el asfalto, para luego emplearlo como un ligante en las mezclas asfálticas. Este método de adición del caucho en polvo a la mezcla asfáltica por incorporación previa en el cemento asfáltico se comprende como proceso por vía húmeda. El desarrollo y fabricación consta de añadir polvo de caucho al cemento asfáltico, de manera que esta incorporación se lleva a cabo a altas temperaturas, donde las partículas del polvo de caucho se ablandan, absorbiendo los compuestos más livianos del asfalto, para luego hincharse.

Debido a este hinchamiento disminuye el trecho entre partícula y el asfalto se vuelve más viscoso, lo cual es cotizado para ciertas aplicaciones del asfalto. El hinchamiento es denominado como la parte de maduración o digestión. Por último, este proceso de incorporación es controlado mediante la medición que consigue la viscosidad del asfalto.



Figura 16: Esquema de fabricación de asfalto modificado con caucho por vía húmeda

Fuente: Adaptado de Bermejo (2010)

2.3.7. Método de diseño de mezclas asfálticas convencionales

2.3.7.1. Ensayo Marshall

De acuerdo con lo que demanda la sección del MTC E 504 del Manual de Ensayo de Materiales, este método de diseño consigue determinar mediante el desarrollo y compactado de los especímenes de las mezclas asfálticas, el diseño del mismo y el cálculo de los distintos parámetros del comportamiento. Mientras se desarrolla el diseño, los parámetros estudiados son la Densidad, porcentaje de Vacíos en las mezclas, Fluidez, Vacíos en el agregado mineral y demás. Por consiguiente, los criterios fijados dentro de la evaluación de las mezclas asfálticas diseñados acordes al método Marshall son los requeridos en el Manual de Carreteras – Especificaciones Técnicas Generales para Construcción (EG-2013) del MTC.

El diseño de mezclas asfálticas básicamente consiste en escoger una granulometría y grado de asfalto, de manera que, una vez elaborada, como también la situada en terreno, desempeñen las propiedades para el que fue diseñado. Así mismo, el proceso de dosificación tiene la finalidad de hallar el porcentaje óptimo de asfalto para una composición determinada de los agregados acorde a las propiedades escogidas.

Anterior al diseño, es de suma importancia que todo material que compone la mezcla, asfalto y agregado, sea ensayado y examinado para conocer si son aptos para ser parte del pavimento final.

El método Marshall se aplica a mezclas asfálticas en caliente, las cuales deben contener partículas de agregado de tamaño máximo a 25 mm. Este proceso se lleva a cabo en el laboratorio para el diseño, como para un control en el terreno. Los resultantes del ensayo de flujo y estabilidad para el diseño de la mezcla deben partir de un promedio de tres probetas como mínimo por cada aumento en el contenido de asfalto, donde tal incremento en el contenido debe ser de 0.5%. Por otra parte, por lo general una mezcla densa mostrara un valor pico de estabilidad a cierto contenido del asfalto, dicho pico del contenido se puede promediar con distintos valores tal como el contenido producido por la máxima densidad, el contenido que se da por el grado de vacíos en la mezcla o por el grado de vacíos en el agregado mineral.

Este método tiene estandarizado las probetas, así como su preparación, el cual debe cumplir los procedimientos específicos de calentado, mezclado y compactado. Dependerá del tipo de cemento asfáltico para realizar a cierta temperatura el mezclado y compactado para elaborar las probetas. Por su parte, la compactación de la mezcla dentro de las probetas será realizado mediante el uso del martillo Marshall, el cual es un elemento de acero, midiendo 98.4 mm de diámetro su base circular, pesando 10 lb y fabricado con la finalidad de tener una distancia de caída de 18 pulgadas. Estos moldes son elaborados compactándolos con 75 golpes por capa, o según lo que demanda las especificaciones.

Las dos principales características analizadas del método de diseño son la estabilidad y flujo de los moldes. Por parte de la estabilidad, se conoce el valor máximo para resistir a las deformaciones el cual será una razón continua de 50 mm/min de carga, el valor de estabilidad varía según el tipo y gradación de los agregados, porcentaje de asfalto usado, tanto como su cantidad. Por otro lado, el flujo es determinado mediante el ensayo de la estabilidad y comprende una medida para las

deformaciones de las mezclas asfálticas, normalmente el flujo se produce en unidad de 0.25mm, el cual empieza desde el momento que se aplica las cargas hasta conseguir la carga máxima.

Contemplando los valores conseguidos del método Marshall y complementándolo con ensayos como el Índice de Compactibilidad, Inmersión – Compresión, Gravedad Especifica Máxima Rice y la Prueba de Tracción Indirecta, y teniendo claro los requerimientos de una mezcla asfáltica, se consigue el grado de asfalto optimo y consigo una mezcla de agregados que respalden una adecuada estructura.

2.3.8. Método de diseño de mezclas asfálticas modificadas con caucho

Para el caso de las mezclas modificadas con GCR, el método para el diseño tiene las apreciaciones del Manual de Empleo de Caucho NFU en mezclas asfálticas.

El método de dosificar la mezcla asfáltica tiene como finalidad combinar los distintos elementos de modo que tengan beneficios y optimice las características de las mezclas asfálticas para su diferente aplicación que se pretenda. Por otro lado, dependerá del tipo mezcla, la ubicación de la carpeta asfáltica, clase de pavimento, de la capa inferior en la cual se apoyará, la clase de tránsito vehicular y las condiciones del clima para conseguir los objetivos que se requiera. Dentro de los requerimientos del PG-3 para las mezclas asfálticas del tipo semidenso y denso, la dosificación se obtendrá mediante un análisis al porcentaje de vacíos y el grado que tiene para resistir deformaciones plásticas utilizado en el método Marshall. A continuación, al establecer un valor optimo se comprobará que satisfaga los requerimientos para la resistencia a deformaciones plásticas y a la actividad del agua haciendo uso del ensayo Inmersión – Compresión. Por último, tanto para la vía seca como para la vía húmeda se cumple y desarrolla la dosificación de mezclas con adición de caucho. Seguidamente se hará mención a las modificaciones indicadas del PG-3:

- Requerimientos para mezclas semidensas y densas

Para este tipo de mezclas elaboradas con la adición de caucho en polvo, incorporación por vía seca, naturalmente también se llega a tener contenidos de asfalto más elevados que en las mezclas asfálticas convencionales, incluso valores en un rango de 5.2 al 5.5%

- Elaboración de probetas

El proceso de elaboración de mezcla asfáltica por incorporación de vía seca debe cumplir en primer lugar la mezcla del caucho en polvo y el agregado, luego de eso añadir el asfalto, finalmente la incorporación de polvo mineral. Las mezclas asfálticas dentro del laboratorio se ejecutan por los pasos usuales, mecánicos o manuales.

Durante el mezclado es recomendable extenderlo alrededor de uno 30 segundos luego de haber conseguido el enrollado total por parte de los agregados, de manera que se consiga una mejor repartición de caucho en polvo. No obstante, si esto no sucede dentro de un tiempo comedido, es indicador de defectos dentro del asfalto, poca temperatura de mezclado o de un alto contenido de caucho en polvo. O también el problema puede radicar en el excesivo contenido de finos o un agregado contaminado, si se da el caso de deberá cambiar la granulometría o el agregado usado.

- Comparación

El rango de temperatura habitual para la compactación oscila entre 135 a 160°C. Hasta que la mezcla llegue a conseguir una temperatura ambiente, las probetas deberán estar dentro del molde por lo menos unas cuatro horas. Si se procede a sacar prematuramente la probeta, esto produciría descompactación.

Para el caso de la incorporación por vía seca, es sumamente importante concebir un tiempo de digestión antes de continuar con el compactado. Por tal motivo se llegan a elaborar probetas a distintas temperaturas y con diferentes tiempos, por lo general entre unos 30 a 90 min, escogiendo aquel que conlleve a tener una densidad mayor. Por lo general hay una estabilización de la densidad al llegar a los 45 min, no obstante, para algunos casos se es necesario prologar los tiempos. Por último, el tiempo que fue estimado dentro del laboratorio debe ser verificado en obra.

- Ensayos mecánicos

Las mezclas asfálticas con adición de caucho en polvo, dado a su alto contenido de asfalto pueden desarrollar deformaciones superiores a las mezclas asfálticas convencionales, sin que esto suponga una inclinación a las deformaciones plásticas. Por consiguiente, es apropiado adecuar los requerimientos de la deformación, añadiéndolo en 0.5 mm.

El grado óptimo del asfalto es el máximo contenido que acepta cumplir los requerimientos volumétricos. Para una mezcla asfáltica densa o semidensa elaboradas con asfalto convencional es comúnmente necesario hacer ensayos en pista de laboratorios; pero con la adición del caucho en polvo al asfalto llega a ser imprescindible, dado que esta sería la única forma de hallar la validez de los cuantiosos contenidos del asfalto que se emplean. Por otra parte, para las mezclas asfálticas continuas, densas o semidensas, la resistencia al factor agua se determinará haciendo uso del ensayo Inmersión – Comprensión, demandando pérdidas en la resistencia inferior al 25%.

Para la dosificación de mezclas incorporando caucho por la vía seca se es indispensable constituir el tiempo de digestión, en base al cambio de los ensayos establecidos con anterioridad a periodos progresivos de digestión.

2.3.9. Desempeño de las mezclas Asfálticas

2.3.9.1. Resistencia a la deformación Permanente

Este parámetro de desempeño de las mezclas asfálticas viene a ser la resistencia que existe a las deformaciones plásticas, causantes de la falla por ahuellamiento, falla estructural producida debido al exceso vehicular en el tráfico, como también tiene que ver a causa de las elevadas temperaturas, un inadecuado proceso constructivo y/o el exceso de las cargas.

Factores y características que acentúan la resistencia a las deformaciones por ahuellamiento.

- Correcta granulometría del material pétreo a usar.
- Obtener un contenido de asfalto adecuado.

- Tener un adecuado diseño de mezcla.
- Una adecuada y correcta compactación al momento de su proceso constructivo.

En la actualidad existe el ensayo Wheel Tracking con el cual se obtienen las resistencias de la mezcla a la deformación:

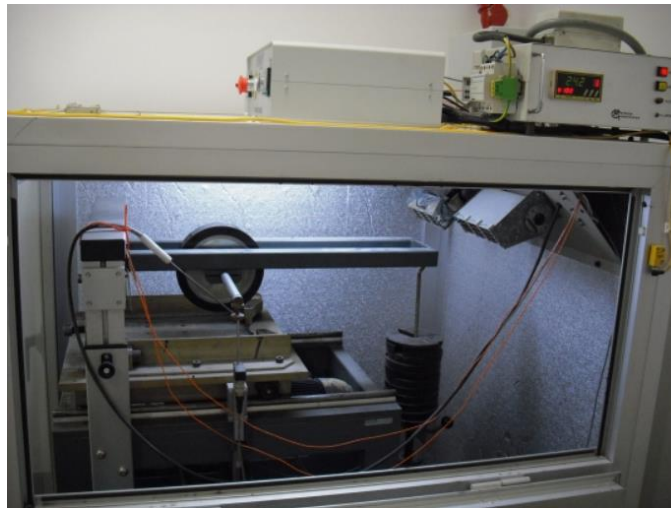


Figura 17: Máquina para ensayo Wheel Tracking

Fuente: Servicios Científicos-Técnicos de la UPC

2.3.9.2. Módulo resiliente a la tensión indirecta

Al aplicar unas repetidas cargas a tensión directa en las mezclas asfálticas el módulo resiliente representa en modulo elástico, en controladas condiciones que se da para las temperaturas. Dado el método de la norma AASHTO TP31 – 1996, se consigue obtener el valor. Y este valor obtenido del módulo resiliente es una dimensión del módulo de elasticidad para la mezcla asfáltica, considerando las características no lineales. Dichos valores del módulo resiliente llegan a usarse para los modelos de un análisis de respuesta estructural, con el cual se llega a obtener las respuestas del pavimento ante las cargaste de tráfico.

El ensayo para mezclas bituminosas, llamado Tensión Indirecta, donde se aplica las cargas repetidas en los núcleos, es transportado por aplicación de cargas por compresión con curvas en forma de haversiana.

Dicha carga es aplicada a lo largo del plano diametral perpendicular de un núcleo en forma cilíndrica, como se muestra a continuación:

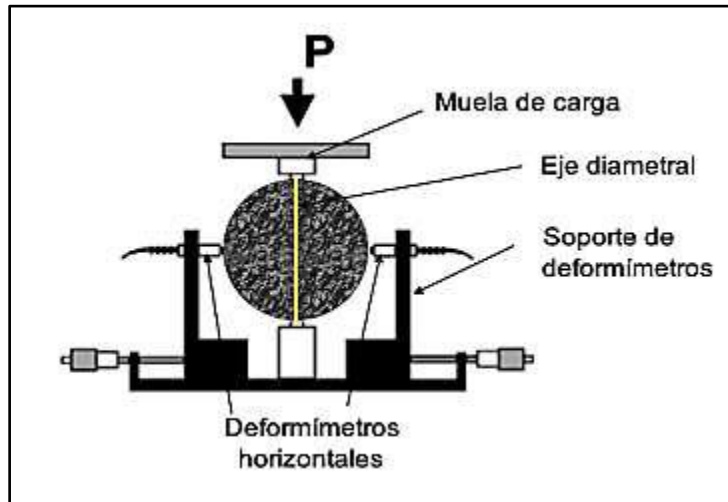


Figura 18: Montaje del Ensayo

Fuente: Adaptado de Norma AASHTO TP31 (1996).

El ensayo consiste en un procedimiento en cual se extrae especímenes moldeados de campo al laboratorio, el cual debe cumplir con características como la altura máxima, el diámetro y con un rango de temperaturas, así también el adecuado acondicionamiento de los especímenes a ensayar. Al tener listo lo mencionado con anterioridad, se coloca dicho espécimen en la máquina para ser ensayado, donde se ajusta los deformímetros horizontales, con los cuales se aplica los ciclos de pre-acondicionamiento, hasta llegar a tener una estabilidad en las deformaciones horizontales y aparenten uniformidad. Por consiguiente, se aplica un valor mínimo de pulsos por carga, con los cuales al tener los ultimo 5 valores, serán los usados para realizar los cálculos. Durante el proceso el espécimen estará sujeto a esfuerzos dinámicos cíclicos, como también de un esfuerzo constante. Con los valores de respuesta a la deformación horizontal instantánea y total de los especímenes ensayados, se procede a realizar los cálculos de los módulos (resiliente, instantáneo M_{ri} y total M_{rt})

Se calcula el módulo resiliente instantáneo (MRI) y módulo resiliente total, usando la siguiente ecuación:

$$M_{RI} = P \frac{\mu_{RI} + 0.27}{t \Delta H_I} \qquad M_{RT} = P \frac{\mu_{RT} + 0.27}{t \Delta H_T}$$

Dónde:

MRI = módulo resiliente instantáneo de elasticidad, MPa (lb/pulg²),

MRT = módulo resiliente total de elasticidad, MPa (lb/pulg²),

μ_{RI} = relación de Poisson resiliente instantánea,

μ_{RT} = relación de Poisson resiliente total,

P = carga repetida, N (lb),

t = espesor de la probeta, mm (pulg),

ΔH_I = deformación horizontal instantánea recuperable mm (pulg)

ΔH_T = deformación total horizontal recuperable; mm (pulg).

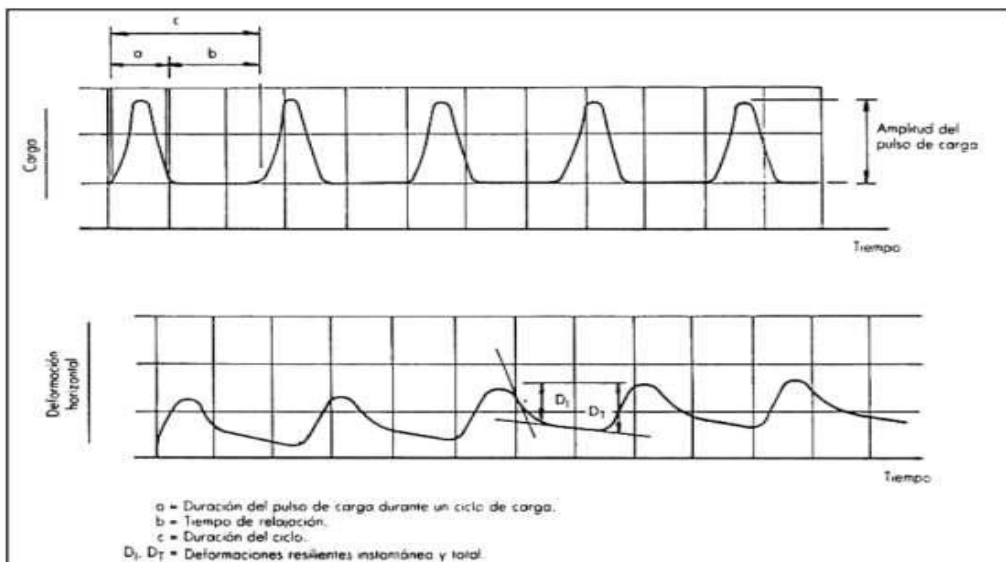


Figura 19: Carga típica y deformación vs Relaciones de tiempo para ensayo de tensión indirecta con carga repetida

Fuente: Adaptado de Norma AASHTO TP31 (1996).

2.3.9.3. Resistencia a la fatiga

Debido a las cargas repetitivas por la acción de carga y descarga que recibe el pavimento dado al flujo vehicular, es que se llega a producir la falla por fatiga. Resultado de esta repetitiva acción al pavimento es que se generan esfuerzos por tracción, lo que conlleva a que se produzcan pequeñas rupturas en el pavimento. Por lo tanto, la resistencia a la fatiga llegaría a ser el grado de resistencia de un pavimento a las repetitivas acciones de la carga y descarga antes de su falla.

Para conocer dicho valor de la resistencia del pavimento frente a estas acciones, se realiza el ensayo de deformación controlado en el cual se aplica periodos de carga donde los valores son constantes, por el cual se determina el cambio del esfuerzo con el tiempo.

En cuanto avanza el curso de la deformación, va disminuyendo la resistencia a dicha deformación, lo que también resulta a una reducción del valor de rigidez, y se llega a concluir que el espécimen fallo cuando el valor del módulo de rigidez llega a la mitad.

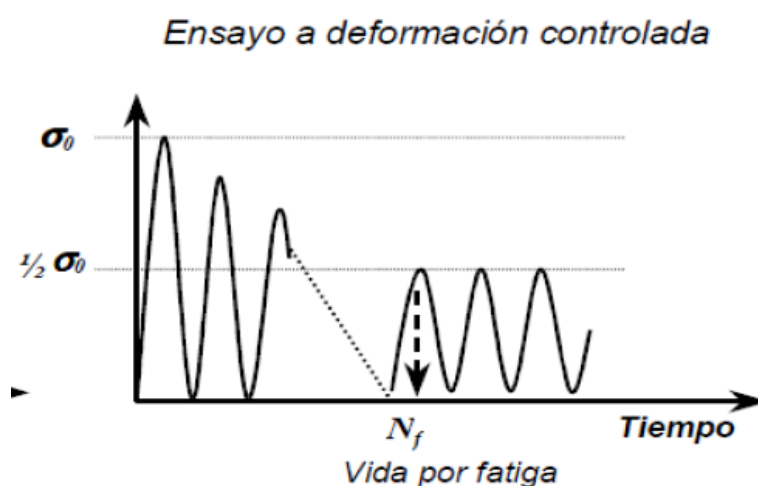


Figura 20: Ensayo de deformación controlada

Fuente: Franco (2012)

2.4. Experiencia de la Implementación de caucho reciclado de llantas como agente modificante en proyectos de pavimentación

2.4.1. Empleo de caucho dentro de Norteamérica

Sección en el cual se muestra y detalla de forma resumida los relevantes casos más cercanos en cuanto al uso y empleo del caucho como modificador que se fueron desarrollando dentro de Norteamérica.

MARC: “Effect of Crumb Rubber on Rheological Properties of Asphalt Binder and Aggregate Packing of Asphalt Mixtures”

Dentro de ese trabajo de investigación se analiza el efecto de dos diferentes tamaños de partículas del caucho, el caso fino de 0.075 mm y el grueso de 0.595 mm. Ambos casos fueron empleados dentro de las propiedades de reología del asfalto. Así mismo, se determinó los efectos del aglutinante color verde, estudiando la reacción a tres contenidos diferentes del caucho, tales como un 10, 15 y 20%, dando como resultados resaltantes que el uso concentrado en mayor porcentaje de caucho mejora los rendimientos del aglutinante. En suma, se encontró que el tamaño de partículas de caucho y el lapso de reacción llegaría a producir efectos significativos dentro de la reología y el contenido de los agregados, y por ende afectando su rendimiento de la mezcla asfáltica mejorada con caucho.

•Proceso de Experimentación

Materiales

El proceso experimental consto en adicionar dos diferentes tipos de partículas, en base a la dimensión de sus partículas, gruesas y finas de los tamices #30 y #200 respectivamente. Así mismo, se adiciono tres diferentes contenidos de caucho como agente modificante, estas fueron 10%, 15% y 20%, analizando los tiempos de reacción que resultara de las diferentes dimensiones de caucho. Por otro lado, al realizar procedimiento del mezclado de asfalto con caucho, se consigue una cadena de interacciones con el cual se aumenta la viscosidad en un lapso de tiempo. Estos lapsos de tiempo son llamados tiempo verde y tiempo reaccionado, la primera sucede cuando la viscosidad está cerca de llegar al pico, la segunda ocurre en la reducción de la viscosidad dado al efecto de ruptura del

asfalto con el caucho, este efecto también es llamado despolimerización, ya que hay una ruptura en la conexión de ambos componentes ya mencionado.

Preparación del ligante asfáltico

La preparación fue realizada haciendo uso del mezclador de cizallamiento alto, con temperatura de $180 \pm 5^\circ\text{C}$. Para tener el asfalto en estado líquido, primero se calentó el asfalto dentro de un horno a una temperatura de 150°C , luego se empleó el manto calefactor con la cual se llegó a la temperatura de $180 \pm 5^\circ\text{C}$ deseada. Por consiguiente, se adiciono de manera progresiva y lenta, las partículas de caucho al asfalto convencional, para luego mezclarlo con una velocidad de 4 mil a 4.5 mil rpm el lapso requerido. Ambos tiempos de reacción fueron puesto a prueba con el uso de un viscosímetro portátil a unos $180 \pm 2^\circ\text{C}$ de temperatura, como se muestra en la figura a continuación.

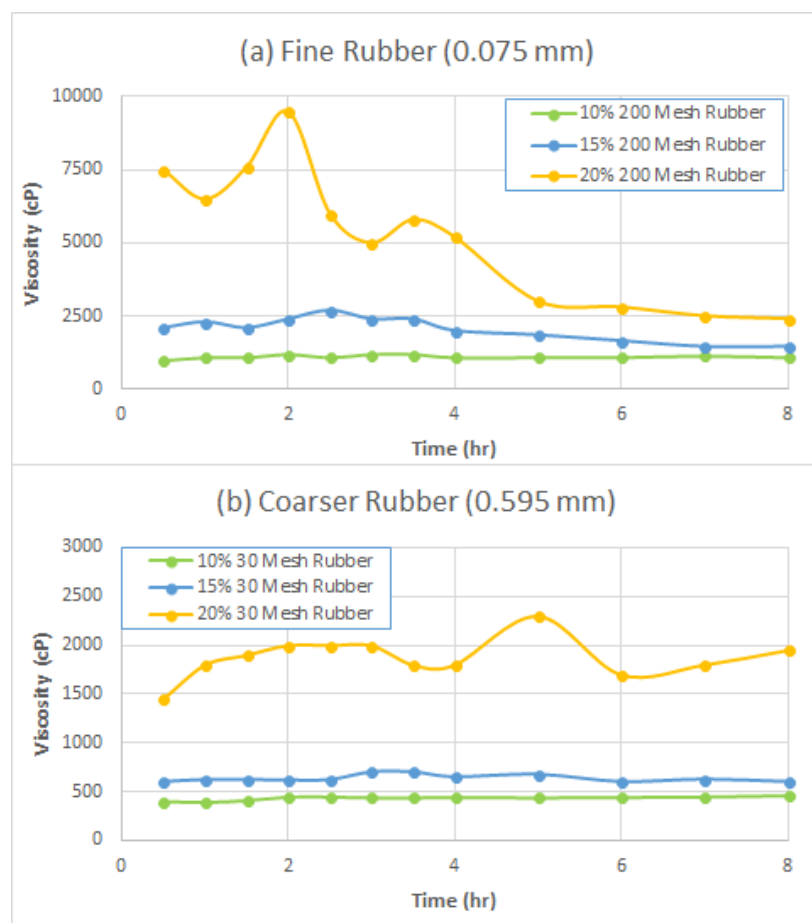


Figura 21: Cambio en la viscosidad sobre el tiempo de mezclado

Fuente: MANDAL T., BAHIA H. 2016. Modified Asphalt Research Center. University of Wisconsin-Madison

Al tener el compuesto de asfalto modificado con caucho, representa una mezcla no homogénea, el cual contiene asfalto líquido y solidas partículas de caucho, donde se estima que la interactuar los componentes, el caucho absorbe un porcentaje del aceite del asfalto, por lo que las partículas de caucho hinchan, y origina el aumento de la viscosidad y la rigidez de la mezcla.

Antes de llegar a tener la óptima condición del ligante debido a la más alta viscosidad, se entiende como un aglutinante verde. Al pasar un lapso de tiempo adicional de mezcla, la rigidez y viscosidad disminuyen su valor, debido a que el aglutinando a causa de la despolimerización parcial del caucho, forma una mezcla homogénea. Por consiguiente, el aglutinante al llegar en la etapa post valor máximo de la viscosidad, se le conocerá como aglutinante reaccionado.

Discusión de resultados

Para poder obtener los resultados de las viscosidades, se usó el sistema Cup and Bob en el DSR. En el cual se observó la tendencia en aumento del valor de viscosidad del aglutinante acorde al incremento del grado de caucho concentrado, y que por el cual desciende al incrementar la velocidad de corte. Para los lapsos de la reacción son más gruesas las viscosidades de caucho, por el contrario, para velocidades de corte más bajas. Todo ello se debería a partículas de caucho con mayor grosor interfiriendo durante la prueba. Para el análisis de comparación, las investigaciones dieron a notar que el incremento de caucho aumenta la viscosidad para las mezclas modificadas con caucho grueso.

Dentro del ensayo se vio el parámetro $G^*/\sin \delta$ en distintas temperaturas utilizando el DSR, con el cual se encontraría el real porcentaje de ligantes, sea envejecido o no, como también RTFO. Para lo mencionado se realizó una diferencia de altura de 2 mm. Como se esperaba, para una concentración mayor de caucho es mas alto el grado, dado a que su rigidez es mayor. Así mismo, se observa un efecto de despolimerización cuando existe un 20% de concentración de caucho más fino, dado a que se muestra un descenso del grado para el ligante reaccionado. Lo mismo se puede observar en cuanto al resultado de las viscosidades.

Conclusiones de la experiencia en base a los resultados

Las dimensiones de partícula del caucho, el concentrado del mismo y el lapso de reacción, son características fundamentales para las propiedades reológicas del ligante modificado.

Los asfaltos que son modificados con partículas gruesas de caucho tienden a tener una mejor propiedad reológica que el de partículas finas de caucho

Cuando existe un mayor concentrado de caucho, cerca del 20%, para modificar el asfalto, esta tendrá resultados más positivos, sea partículas finas o gruesas de caucho, a diferencia de una baja concentración, el cual sería la única cantidad que satisface los criterios que están dentro de la normativa AASHTO TP-70.

Los ligantes verdes, tomando en cuanto cualquier dimensión de partícula de caucho, mostraran propiedades reológicas mejores que las mezclas reaccionados.

Dentro de la experiencia se encontró que las partículas de caucho y el lapso de reacción, son los puntos que afectan de manera sustancial sobre el agregado durante el compactado, y en efecto el rendimiento.

2.4.2. Empleo de caucho dentro de Europa

Las experiencias dentro del continente europeo se fueron desarrollando de manera independiente dentro de cada país. A continuación, se hará mención de un par de países importantes al momento de hablar sobre la modificación de caucho en los asfaltos.

2.4.2.1. Alemania

BUTZ T., MULLER J., RIEBESEHL G. 2012. Innovative method for producing crumbed rubber modified asphalt, (June), 13–15.

Dentro de este país se llevó a cabo el desarrollo de un método nuevo para modificar los ligantes asfálticos con caucho, el cual tiene como objetivo hacer una combinación de ventajas logísticas por parte de la vía seca de incorporación con la controlable calidad de la incorporación por vía húmeda. Este nuevo método fue logrado debido a un tratamiento previo

del caucho con un agente hinchador, bajo una controlada condición, a una elevada temperatura y adicionando a la mezcla un aditivo de cera.

La incorporación del aditivo de cera en la mezcla es específicamente para abordar la preocupación que genera la modificación del asfalto con caucho, dentro de la salud y el medioambiente, las cuales están relacionadas a unas elevadas temperaturas de producción y pavimentación.

La unión de este aditivo y el agente hinchador ambientalmente sólido en el pretratamiento del caucho disminuye considerablemente los valores de viscosidad en el asfalto, haciendo que exista un mejor manipulación y compactación de las mezclas asfálticas, y por ende permite temperaturas más bajas en la producción y pavimentación. El agente de hinchamiento es un aceite mineral aromático más aceites vegetales, que producen un hinchamiento del caucho, de manera previa al proceso de digestión que ocurre con el asfalto.

Mediante este pretratamiento resultara un material que puede ser directamente adicionado a una planta de producción de mezclas asfálticas, de esta manera se evitaría los procesos previos de digestión necesarios en la incorporación por vía húmeda.

Los resultados de pruebas realizados en campo probaron que la directa adición de estos agentes nos da propiedades asfálticas las cuales son comparables al uso habitual del caucho con asfalto mediante la modificación por vía húmeda, todo ello debido al tratamiento previo realizado al caucho el cual influye en la disminución de los riesgos de la interacción insuficiente del asfalto con caucho, como también de la calidad variable del aglutinante.

Así mismo, en cuanto al proceso de modificación por la vía húmeda, estos componentes de caucho tratados previamente nos dan ventajas en cuanto a la ampliación significativa del lapso de tiempo para su almacenamiento y aplicación.

De esta manera, la nueva tecnología combinada para el uso del caucho como modificador de las mezclas asfálticas, llega a superar los actuales

inconvenientes y sus limitaciones, dando de esta manera la posibilidad de ampliarse el uso de este nuevo método beneficiosos para el medioambiente

2.4.2.2. España

Dentro de España, más específicamente Cataluña, lugar en el cual se fueron acumulando muchas experiencias para el aprovechamiento por parte de la incorporación del caucho por vía seca, producto de la Junta de Residuos del Generalitat de Cataluña. Inicialmente las practicas se basaron en expediciones de Norteamérica, acorde a la tecnología genérica de Takellou, optadas por la UPC y el Centro de Investigación ESM de España.

Dentro del uso y practica del material, se vino el empleo de partículas que pasen el tamiz 2.5mm y un 80% a más por parte del tamiz 0.63mm, quedando retenidas una mayor parte en el tamiz 0.32mm, con cerca de un 1% que pasa por el tamiz 0.08mm.

Dentro de la parte inferior de huso centrado S-12 o D-12 se adapta el árido natural a la zona del árido fino, en donde el 2% se compone de caucho. La dosificación del asfalto serán más altas comparado a las mezclas convencionales de asfalto.

Sobre las prácticas habituales de modificación son:

- El tiempo de mezclado a unos 40 seg.
- La temperatura de 174°C para su fabricación.
- La adición de caucho al mezclador directamente.
- El compactado se prolongará hasta llegar a la temperatura de 60°C.
- El compactado se llevará acabo con un compactador de tipo metálico sin vibración.

A lo largo de los años de un principio se fueron construyendo distintos tramos experimentales, donde se usó la mezcla modificada con caucho en las capas de rodadura. Tales vidas como la avenida de Constanti, caminos vecinales como Vacarisses, y los más característicos se muestran a continuación:

Tabla 16: Tramos construidos con el uso del caucho en las mezclas asfálticas

Tramo	Año	Longitud	Trafico	Espesor de capa	% de neumático	% de betún
Vacarisses	1994	2.6 km	T3 (> 50 camiones/día)	4 cm	2%	5.5%
B-140						
Sabdell-mollet	1997	830 m	T0 (> 2000 camiones/día)	5.8 cm	2%	6.2%

Fuente: Llano (2015)

El resultado fue satisfactorio en cuanto a las pruebas hechas sobre especímenes de la mezcla extendida y compactada, en particular los ensayos realizados en pista, con muy bajas velocidades de deformación. Así también, la densidad llega a ser menor que en las mezclas convencionales, entre 2.2 a 2.3, y se llega a elevar en gran manera la resistencia frente al deslizamiento, y hay un incremento en la adherencia a la capa inferior.

Con los resultados y los ensayos realizados se llegaría a confirmar el comportamiento óptimo y adecuado de los tramos hasta la fecha, lo que significa una mayor experiencia a 9 años con tráfico mediano y 6 años con un elevado tráfico. Así mismo, en ningún tramo estudiado se observaron desprendimientos de material fino, fisuras o deformaciones.

Por otra parte, saliendo de la zona de Cataluña, hubo experiencias con un comportamiento dispar en el año 1996, sumándose tramos ejecutados por la incorporación de vía húmeda. Tramos especificados más adelante, en el cuadro. Aquí de igual manera hubo una intervención por parte de la Escuela de Caminos de Madrid y el CIESM. Para este caso se realizó la incorporación de caucho en polvo, pasando un 100% por el tamiz 1.25mm, un 4% por el tamiz de 0.08mm. Para el tramo realizado en Sevilla se adiciono el polvo de caucho a una mezcla F-10, para la mezcla de Madrid fue el tipo D-20 y también en un tipo F-10.

Tabla 17: Tramos construidos con el uso del caucho en las mezclas asfálticas

Tramo	Año	Longitud	Trafico	Espesor de capa	% de neumático	% de betún
C-433 de Sevilla a Cazalla de la sierra	1996	300 m	T2 (> 200 camiones/día)	3 cm	1%	5.7%
M-300 Alcalá-Arganda del Rey	1996	330 m	T2 (> 200 camiones/día)	3 cm 5 cm	1% 1%	6.1% 5.2%

Fuente: Llano (2015)

En lo general fueron muy satisfactorios los resultados que se obtuvieron en los tramos ejecutados en Sevilla, a pesar de una pequeña perdida en la textura producto del exceso de asfalto, los tramos en Madrid estuvieron mal, por la pérdida abundante de material. Una causante de tal fallo posiblemente fue la falta del tiempo de reacción dado que estuvo la planta de producción bastante cerca al tramo en prueba.

Así mismo, debido al alto grado de llantas fuera de uso dentro de España, en suma, su prohibición de desecho y las distintas normas para su reciclaje de este material, influyeron a la realización de varios estudios con la finalidad de conocer los beneficios de adicionar este material a las mezclas asfálticas. Se obtuvo un cuadro informativo en el cual detallada hasta el 2017, la ejecución de más de 1600 km en tramos de vías pavimentadas con mezclas asfálticas modificadas con caucho de llantas recicladas. Dentro de estos tramos se encuentran las primordiales comunidades autónomas en el cual se ejecutaron la mayor construcción, como son Madrid, Castilla y León, Castilla-La Mancha y la Comunidad Valenciana. A continuación, se mostrará la información de los tramos realizados con esta tecnología para las Comunidades autónomas ya mencionadas.

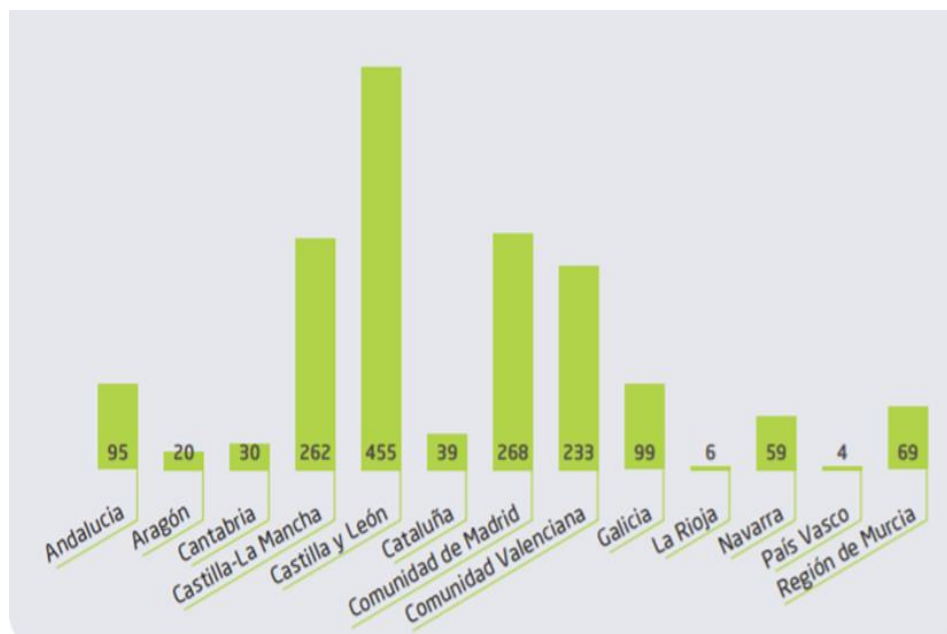


Figura 22: Longitud total en kilómetros de pavimento con caucho por comunidad

Fuente: 20 Años de Mezclas asfálticas con polvo de neumático en las carreteras españolas, 2017

Tabla 18: Obras Españolas realizadas con Asfalto modificado con caucho

año	Obra	Tecnología empleada	Longitud (km)
2017	Acceso Sur Puerto de Gandía	Vía húmeda	1.92
2016	Rehabilitación estructural de firme. Carretera A-68 tramo: Variante de Casetas	Vía Húmeda	8.85
2015	Autovía del Olivar A-316	Vía húmeda	17.2
2011	A-1. Tramo Sto. Tome del Puerto - Burgos	Vía húmeda	71
2010	Carretera CM-3102	Vía Seca	2.7
2010	Vía de Servicio en A-316 Úbeda- Baeza	Vía Seca	1
2008	Carretera CV-550	Vía seca	5.4
2008	PAU 21	Vía Seca	25.96
2008	Autovía del Noroeste	Vía Seca	2
2008	Refuerzo de firme y renovación de pavimento CV-440	Vía Seca	4.96
2007	Sendra de Granada	Vía Seca	8.01
2006	Avenida Miguel Induráin	Vía Seca	6.68

Fuente: 20 Años de Mezclas asfálticas con polvo de neumático en las carreteras españolas, 2017

2.5. Normas técnicas y Manuales del uso del caucho

2.5.1. Manual de Carreteras: Especificaciones técnicas generales RD N° 22-2013-MTC/14, Perú 2013.

Actualmente en el Perú no tenemos una norma que sea específica para el diseño de mezclas asfálticas modificadas con caucho, pero en el manual de carreteras hacen una breve mención sobre las características que debe presentar este cemento asfáltico modificado; en la siguiente tabla podemos observar las características que debe tener este cemento asfáltico modificado.

Tabla 19: Especificaciones del cemento asfáltico modificado con caucho

Especificaciones del cemento asfáltico modificado con caucho

Características	Normas	TIPO 1		TIPO 2		TIPO 3	
		min	máx.	min	máx.	min	máx.
Pruebas sobre el producto original							
Penetración, 25°C. 100g. 5s, dmm	MTC E-304	25	-	25	-	25	-
Penetración, 4°C. 200g. 60s, dmm	MTC E-304	10	-	15	-	25	-
Viscosidad Rotacional Brookfield a 175 °C , Cp (*)	ASTM D 2196	1500	-	1500	-	1500	-
Punto de inflamación. COC. °C	MTC E 303	232	-	232	-	232	-
Punto de ablandamiento (anillo y bola) ; °C	MTC E 307	47	-	47	-	55	-
Recuperación elástica, 25°C; %	ASTM D 6084	40	-	60	-	60	-
Resiliencia , 25°C %	ASTM D 5329	25	-	20	-	10	-
Pruebas en el residuo de película fina y rotatoria (**)							
Penetración retenida, % de original. 4°C. 200g. 60s; dmm	MTC E-304	75	-	75	-	75	-

(*) Para modelos de LV, usar velocidad de 3 at 12 rpm.

(*) Para modelos y series de RV y HA, usar velocidad de 3 at 20 rpm.

(**) Para casos de controversial usar el residuo de película fina rotativa RTFOT (método ASTM D 2872).

Fuente: ASTM D 6114

Fuente: Manual de Carreteras EG-2013

2.5.2. Manual del empleo del caucho NFU en mezclas bituminosas, España 2007.

Dentro de España anualmente se llega a generar cerca de 300.000 toneladas de llantas fuera de uso (NFU). Debido a este gran número de residuos, en conjunto a la norma promulgada por la UE, llevaron al Ministerio del Medio Ambiente crear un Plan Nacional para la utilización de las llantas desechadas. Dicho plan tiene como cita al uso prioritario como obra pública, siempre y cuando se un modo viable en la parte técnica y económica el uso de este material reciclado. Dentro de las obras públicas, una de las aplicaciones posibles con mayor interés son la fabricación de las mezclas asfálticas para vías, dado que el caucho reciclado de las llantas tiende a mejorar el

comportamiento de las mezclas, y tiene un valor económico más bajo que las distintas técnicas de modificación con otros agentes.

Continuando con la directiva del Plan, el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) del Ministerio del Fomento, detallada el uso preferente del caucho dentro de las mezclas asfálticas siempre y cuando estas sean económica y técnicamente posible. El manual en cuestión pretende reunir el conocimiento y la experiencia en cuanto al estado del arte de lo realizado en el país, con el fin de ayudar en la parte técnica y administrativa, siendo responsable de su adecuado uso en las carreteras.

Teniendo el manual como objetivo:

Este manual tiene como objetivo fijar recomendaciones para el uso del caucho como material modificador, material procedente de llantas en fuera de uso que serán trituradas hasta tener partículas finas, para las mezclas asfálticas en caliente. Dentro del manual se detallan las áreas de aplicación que se encuentran avaladas por las experiencias dentro de España, así mismo, sobre las mejoras que se esperan tener al hacer empleo de este material. Entrando a detalle del manual, encontramos criterios y especificaciones para seleccionar y usar el caucho en polvo, como también para su fabricación, dosificación, ejecución en obra y el control de calidad de los resultados correspondientes.

2.5.3. Norma N-CMT-4-05-002-06, México 2006.

Dentro de esta norma se podrá encontrar características de la calidad para los materiales que se usaran en la elaboración de las mezclas asfálticas.

Las mezclas asfálticas modificadas son el resultado de una disolución o adición de polímeros o hule molido de llantas dentro del asfalto, las cuales, con agentes permanentes a cambios de temperatura en el tiempo, las cuales son adicionadas para modificar las propiedades del asfalto, propiedades como su reología o las físicas, para que de esta manera se pueda mejorar la susceptibilidad termina y daños por humedad, como también daños por la oxidación. Estos agentes modificantes ocasionan un incremento en la adherencia entre el material pétreo y el asfalto, debido a su actividad iónica superficial, de manera que se pueda conservar aun con la presencia del agua. Así mismo, producto de estos

modificadores la resistencia a las deformaciones, fatiga y esfuerzos por tensión repetitivos aumentan en gran medida, por lo tanto, aminoran el agrietamiento. Estos modificadores en lo general son adicionados directamente al asfalto, antes de ser mezclados con el material pétreo.

Tabla 20: Requisitos de calidad para cementos asfálticos AC-5 y AC-20 modificados

Características	Tipo de cemento asfáltico (Tipo de modificador)				
	AC-5 (Tipo I ó II)	AC-20 (Tipo I)	AC-20 (Tipo II)	AC-20 (Tipo III)	AC-20 (Hule molido)
Del cemento asfáltico modificado:					
Viscosidad Saybolt-Furol a 135°C; s, máximo	500	1000	1000	1000	--
Viscosidad rotacional Brookfield a 135°C; Pa s, máximo	2	4	3	4	--
Viscosidad rotacional Brookfield (tipo Haake) a 177°C; Pa s, máximo	--	--	--	--	7
Penetración: • A 25°C, 100 g, 5 s; 10 ⁻¹ mm, mínimo • A 4°C, 200 g, 60 s; 10 ⁻¹ mm, mínimo	80 40	40 25	40 25	30 20	30 15
Punto de inflamación Cleveland; °C, mínimo	220	230	230	230	230
Punto de reblandecimiento; °C, mínimo	45	55	55	53	57
Separación, diferencia anillo y esfera; °C, máximo	3	3	3	4	5
Recuperación elástica por torsión a 25°C; %, mínimo	25	35	30	15	40
Resiliencia, a 25°C; %, mínimo	20	20	20	25	30
Del residuo de la prueba de la película delgada, (3,2 mm, 50 g):					
Pérdida por calentamiento a 163°C; %, máximo	1	1	1	1	1
Penetración a 4°C, 200 g, 60 s; 10 ⁻¹ mm, mínimo	--	--	--	--	10
Penetración retenida a 4°C, 200 g, 60 s; %, mínimo	65	65	65	55	75
Recuperación elástica en ductilómetro a 25°C; %, mínimo	50	60	60	30	55
Incremento en temperatura anillo y esfera; °C, máximo	--	--	--	--	10
Módulo reológico de corte dinámico a 76°C (G [*] /sen δ); kPa, mínimo	--	2,2	2,2	2,2	2,2
Módulo reológico de corte dinámico a 64°C (G [*] /sen δ); kPa, mínimo	2,2	--	--	--	--
Angulo fase (δ) [visco - elasticidad], a 76°C; ° (grados), máximo	--	75	70	75	--
Angulo fase (δ) [visco - elasticidad], a 64°C; ° (grados), máximo	75	--	--	--	--

Fuente: Norma N-CMT-4-05-002-06, México 2006.

Tabla 21: Requisitos de granulometría para hule molido

Malla		Tamaño nominal		
Abertura mm	Designación	H 20 % que pasa	H 40 % que pasa	H 80 % que pasa
2	Nº10	100	---	---
1,18	Nº16	75 – 100	---	---
0,85	Nº20	59 – 90	100	---
0,6	Nº30	25 – 60	75 – 100	100
0,425	Nº40	10 – 40	55 – 90	80 – 100
0,3	Nº50	0 – 20	25 – 60	60 – 100
0,15	Nº100	0 – 10	0 – 30	4 – 70
0,075	Nº200	0 – 5	0 – 10	0 – 20
Contenido mínimo de hule en el asfalto en masa; %		17	15	12

Fuente: Norma N-CMT-4-05-002-06, México 2006.

2.5.4. Demás normas y manuales

- ASTM D 8 – 88, Standard Definitions of Terms Relating to Materials for Roads and Pavements, EEUU 1997.
- Instituto Nacional de Normalización, NCh 3258-2012. Mezclas asfálticas. Polvo de caucho proveniente de neumáticos fuera de uso. Requisitos. Santiago de Chile, Chile 2012.
- Asphalt Rubber Usage Guide. California, EEUU 2003.
- Rubber Modified Asphalt Technical Manual. Ontario, Canadá 2013.

2.6. Ventajas y desventajas de la utilización del caucho reciclado

2.6.1. Ventajas de su empleo

A continuación, se detalla de manera sucinta las ventajas de incorporar granos de caucho reciclado a las mezclas asfálticas, dichas ventajas sustraídas de diferentes autores que hicieron uso de este agente dentro de sus investigaciones y detallaron la importancia de su uso.

- Jimenez y Meier (1985). Dentro de su investigación sobre la incorporación de GCR a mezclas asfálticas en caliente, destacó que al incorporar un 5.0% de GCR, en peso de la mezcla total, dentro de una mezcla asfáltica convencional, conlleva a que su vida útil se duplique, en base al fenómeno de fatiga, esto con respecto a una mezcla convencional.
- Sibal, Das, y Pandey (2000). En cuanto a su investigación sobre las mezclas asfálticas modificadas con granos de caucho reciclado (GCR), se enfocó y realizó ensayos con GCR por la incorporación de vía seca,

encontrando que a diferentes temperaturas la resistencia a la fatiga tiende a aumentar, respecto de una mezcla convencional.

- Punith, Suresha, Raju, Bose, y Veeraragavan (2011). Asevera que existe un aumento en cuanto la resistencia al envejecimiento, a la oxidación del cemento asfáltico, a la resistencia contra humedad. Así mismo, incrementa la resistencia al desgaste por efecto de la abrasión.

2.6.2. Desventajas de su empleo

Aun cuando se ve contemplado el gran efecto beneficioso que trae consigo la incorporación de caucho a las mezclas asfálticas, existen puntos de menor ventaja, las cuales tienen que ser analizados a mayor profundidad, debido a que generan reacciones adversas al momento de poner en práctica esta nueva modificación de mezclas asfálticas. Desventajas, tales como:

- Dong y Tan (2011). En cuanto a la planta de fabricación, la modificación de la mezcla asfáltica con el grano de caucho se efectúa a temperaturas que van de los 180°C a 200°C, lo cual origina obtener una mayor energía necesaria para su fabricación.
- Loughheed y Papagiannakis (1996). De su investigación, afirma que se requiere de un equipo especial para la fabricación de las mezclas modificadas con granos de caucho reciclado (mediante el proceso por vía húmeda) y por consiguiente su almacenamiento, lo que genera un incremento en el costo inicial de la mezcla. Esta ampliación en el costo inicial se encontraría oscilando entre unos 40% a 80% respecto de las mezclas convencionales.
- Universidad de los Andes (2005). Del análisis realizado dentro de su investigación enfocado a la parte económica, llegaron a estimar que existe un incremento dentro del precio unitario para las mezclas modificadas con granos de caucho reciclado (mediante el proceso por vía seca), este incremento oscila entre unos 26% a 42% respecto de la mezcla asfáltica convencional.

2.7. Definición de términos básicos

La definición de los términos básicos se ha obtenido del Manual de Empleo del caucho NFU en Mezclas Bituminosas (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Publicas) y del Manual del Asfalto (Instituto del Asfalto).

- **Aditivo:** Es un material que se le añade a una mezcla asfáltica para así poder mejorar determinadas características de esta.
- **Asfalto:** Es un material bituminoso que se puede obtener de manera natural en depósitos geológicos, así como en la destilación del petróleo. Debido a sus características de cohesión y adherencia se le utiliza como ligante para unir los diferentes materiales en su aplicación en pavimentación.
- **Caucho:** Es un material elastómero que se puede extraer de manera natural, se obtiene como una sustancia lechosa conocida como látex y se extrae principalmente del árbol Hevea; también se puede obtener de manera sintética.
- **Densidad:** Es la relación que existe entre la masa de un determinado material y su volumen, de esta manera se puede medir el grado de compactación del material.
- **Ensayo Marshall:** Es un ensayo realizado en laboratorio que nos permite determinar el contenido óptimo de asfalto que se requiere para realizar una determinada mezcla asfáltica.
- **Estabilidad:** Es la máxima carga que puede resistir la briqueta antes de sufrir una deformación.
- **Flujo de la mezcla asfáltica:** Es la deformación que se produce sobre la briqueta al recibir una carga.
- **Ligante:** Es aquel material que permite que los agregados minerales se adhieran para formar una sola estructura, un ejemplo de ligante es el asfalto.
- **Mezclas Asfálticas convencionales:** Es la combinación entre los agregados minerales (grava, arena) y un ligante (asfalto).
- **Mezclas Asfálticas modificadas:** Es la combinación entre los agregados minerales, un ligante y un aditivo el cual puede ser un polímero, caucho.
- **Porcentaje de vacíos de aire:** Es un porcentaje de los vacíos del agregado mineral que solo contienen aire.
- **Porcentaje de vacíos llenos de asfalto:** Es aquel porcentaje de vacíos del agregado mineral que se encuentran llenos de asfalto.

- Vacíos del Agregado Mineral (VMA): Son aquellos vacíos que se encuentran entre los granos de agregado mineral y que pueden contener aire o asfalto.

CAPITULO III: SISTEMA DE HIPÓTESIS

3.1. Hipótesis General

La incorporación de caucho como agente modificante mediante el proceso de vía seca genera una variación de hasta un 50% en al menos uno de los parámetros de diseño de una mezcla asfáltica convencional.

3.2. Hipótesis Específicas

- a) La incorporación de caucho a una dosificación del 5.5% de asfalto mediante el proceso de vía seca genera que la Densidad de la mezcla disminuya hasta un 5%, respecto de las mezclas asfálticas convencionales.
- b) La incorporación de 0.5% de caucho a temperaturas de 150°C, 160°C, 165°C y 170°C, con a una dosificación del 5.5% de asfalto mediante el proceso de vía seca genera un incremento de hasta un 30% en la presencia de Vacíos con aire, respecto de las mezclas asfálticas convencionales.
- c) La incorporación de caucho a una temperatura de 170°C con una dosificación del 5.5% de asfalto mediante el proceso de vía seca generando un incremento de hasta un 20% en la presencia de Vacíos de Agregado Mineral.
- d) La incorporación de caucho a una temperatura de 170°C con una dosificación del 5.5% de asfalto mediante el proceso de vía seca influirá en el incremento del flujo hasta un 25% y de la estabilidad hasta un 50% de la mezcla modificada

3.3. Variables

3.3.1. Definición Conceptual de las Variables

Tabla 22: Definición de las variables

	Hipótesis	Variables	Definición
G E N E R A L	La incorporación de caucho como agente modificante mediante el proceso de vía seca genera una variación de hasta un 50% en al menos uno de los parametros de diseño de una mezcla asfáltica convencional.	VI. Incorporación de Caucho	VI. Polímero elastico obtenido al reciclar neumaticos.
		VD. Parametros de diseño de una mezcla asfaltica	VD. Parametros que debe cumplir una mezcla asfaltica para su correcto comportamiento
E S P E C Í F I C O S	La incorporación de caucho a una dosificación del 5.5% de asfalto mediante el proceso de vía seca genera que la Densidad de la mezcla disminuya hasta un 5%, respecto de las mezclas asfálticas convencionales.	VI. Incorporación de Caucho	VI. Polímero elastico obtenido al reciclar neumaticos.
		VD. Disminución de la Densidad de la mezcla	VD. Peso de un volumen especifico de la mezcla
	La incorporación de 0.5% de caucho a temperaturas de 150°C, 160°C, 165°C y 170°C, con a una dosificación del 5.5% de asfalto mediante el proceso de vía seca genera un incremento de hasta un 30% en la presencia de Vacíos de aire, respecto de las mezclas asfálticas convencionales.	VI. Incorporación de Caucho	VI. Polímero elastico obtenido al reciclar neumaticos.
		VD. Incremento de la Presencia de Vacios de aire	VD. Espacios pequeños de aire ubicados entre los agregados.
	La incorporación de caucho a una temperatura de 170°C con una dosificación del 5.5% de asfalto mediante el proceso de vía seca generando un incremento de hasta un 20% en la presencia de Vacíos de Agregado Mineral.	VI. Incorporación de Caucho	VI. Polímero elastico obtenido al reciclar neumaticos.
		VD. Incremento de la presencia de Vacíos de Agregado Mineral	VD. Espacios pequeños de aire ubicados entre los agregados incluyendo los espacios llenos de asfalto
La incorporación de caucho a una temperatura de 170°C con una dosificación del 5.5% de asfalto mediante el proceso de vía seca influirá en el incremento del flujo hasta un 25% y de la estabilidad hasta un 50%	VI. Incorporación de Caucho	VI. Polímero elastico obtenido al reciclar neumaticos.	
	VD.1 incremento del flujo VD.2 incremento de la estabilidad	VD1. Deformacion del especimen al recibir una carga maxima. VD2. Resistencia a la deformacion de la mezcla asfáltica	

Fuente: Elaboración Propia

3.3.2. Operacionalización de las Variables

Tabla 23: Operacionalización de variables

	VARIABLES	INDICADORES	INDICES	INSTRUMENTOS
G E N E R A L	Caucho (VI); Parametros de diseño de mezcla asfáltica (VD)	- granulometría -Cantidad	-milímetros -%	BASE DE DATOS FORMATOS EXCEL
E S P E C I F I C O S	Caucho (VI); Densidad de la mezcla (VD)	- granulometría -Cantidad -Densidad	milímetros % kg/cm ³	BASE DE DATOS FORMATOS EXCEL
	Caucho (VI); Incremento de la Presencia de vacíos de aire (VD)	- granulometría -Cantidad	milímetros %	BASE DE DATOS FORMATOS EXCEL
	Caucho (VI); Incremento de los Vacíos de Agregado Mineral (VD)	- granulometría -Cantidad	milímetros %	BASE DE DATOS FORMATOS EXCEL
	Caucho (VI); Incremento de Flujo (VD1); Incremento de Estabilidad (VD2)	- granulometría -Cantidad -deformación -Resistencia	milímetros % kg	BASE DE DATOS FORMATOS EXCEL

Fuente: Elaboración Propia

CAPITULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. Tipo y método de investigación

4.1.1. Tipo de investigación

El tipo es Investigación aplicada, “tiene como objetivo crear nueva tecnología a partir de los conocimientos adquiridos a través de la investigación estratégica para determinar si estos pueden ser útilmente aplicados” (Tam Malaga, Vera, & Olivares Ramos, 2008, pág. 147). “Está más interesada en la aplicación inmediata sobre una problemática antes que el desarrollo de un conocimiento de valor universal” (Borja Suarez, 2012, pág. 10)

Esta investigación es de dicho tipo ya que tendrá como propósito recolectar, exponer y analizar resultados de ensayos de otras investigaciones, junto a la recolección de base bibliográfica en torno al tema de la influencia del uso caucho como agente modificante en los parámetros de diseño de una mezcla asfáltica convencional, con lo cual se conseguirá generar un mayor entendimiento sobre el uso de dicho modificador dado a la base de datos sistematizado y ordenado que se generará.

4.1.2. Método de investigación

La investigación es de enfoque cuantitativo, “usa la recolección de datos para probar hipótesis, con base en la medición numérica y el análisis estadístico, para establecer patrones de comportamiento y probar teorías” (Hernandez Sampieri, Fernandez Collado, & Baptista Lucio, 2014, pág. 04). “Plantea que una forma confiable para conocer la realidad es a través de la recolección y análisis de datos, con lo que se podría contestar las preguntas de la investigación y probar las hipótesis. Este tipo de investigación confía en la medición numérica, el conteo y frecuentemente en el uso de la estadística para establecer con exactitud patrones de comportamiento en una población” (Borja Suarez, 2012, pág. 11)

Esta dicha investigación tiene el enfoque cuantitativo dado a que se obtendrán una base de datos patrón de los resultados de los parámetros de diseño Marshall de otras investigaciones, los cuales serán considerados como datos para realizar cuadros comparativos e informativos que serán el sustento para el análisis estadístico de las hipótesis planteadas.

4.1.3. Diseño de investigación

La investigación tiene un diseño de investigación no experimental – transeccional – correlacional, “en este método, existe un grupo de sujetos a los cuales se realiza una prueba – O – de medición de la variable dependiente, pero los tratamientos de la variable independiente – (X) – no fueron manipulados o controlados por el investigador. También se denomina investigación ex-post-facto” (Tam Malaga, Vera, & Olivares Ramos, 2008, pág. 149).

Dicho diseño de investigación transeccional tiene como propósito la recolección de datos, la descripción de variables y el análisis de su incidencia o interrelación en un solo momento o tiempo único.

Así mismo, la parte correlacional del diseño de investigación, “su finalidad es conocer la relación o grado de asociación que exista entre dos o más conceptos, categorías o variables en un contexto en particular” (Hernandez Sampieri, Fernandez Collado, & Baptista Lucio, 2014, pág. 85) “Si bien es cierto con la investigación correlacional se explica la relación entre dos variables, no necesariamente significa que una sea la causa de otra, es decir investiga asociaciones entre dos variables, pero no relaciones causales. (Causa – Efecto)” (Borja Suarez, 2012, pág. 13).

Dicho lo anterior, la presentación estructural de diseño de esta investigación no experimental y correlacional, dado a que se tiene el caucho como un agente incorporado a las mezclas asfálticas convencionales, tiene el siguiente procedimiento explicado de manera general:

Paso 1: Se realiza una búsqueda bibliográfica a nivel nacional e internacional sobre la incorporación de caucho dentro de una mezcla asfáltica en caliente, dicha incorporación mediante el proceso de vía seca preferiblemente.

Paso 2: Se organiza la base de datos bibliográfica que fueron sustraídas, de manera que se tenga separadas especialmente las investigaciones que usaron dentro de sus ensayos el cemento asfáltico cap-pen 60/70 para efecto de las investigaciones nacionales y del mismo modo para las investigaciones internacionales acorde a sus simbologías pero que tengan la misma penetración en cuanto el cemento asfáltico.

Paso 3: Se lleva a cabo el estudio bibliográfico de cada una de las investigaciones de manera más específica, realizando de este modo un primer filtro, no obstante, este filtro es únicamente de manera visual, separando una de otras en base a que se tenga las variables que conllevan a realizar una mezcla modificada con caucho, como también que cumplan con tener dentro de las mezclas evaluadas un valor similar en cuanto a la granulometría de sus agregados y por último que tengan todos los resultados en cuanto a los parámetros de diseño Marshall.

Paso 4: Se realiza un análisis específico de cada variable que interviene en una mezcla asfáltica modificada con caucho como un segundo filtro, este análisis realizado a las investigaciones que pasaron el primer filtro. Por consiguiente, se tendrán únicamente los resultados de cada parámetro Marshall que pasen los filtros, y de ellos se formará nuestra base de datos unificada.

Paso 5: De esta base de datos unificada, dado a que todos los resultados se presentarán dentro de una única tabla por cada parámetro, se realizarán los análisis correlacionales con la finalidad de estudiar, observar y concluir sobre la influencia de la incorporación de caucho dentro de una mezcla asfáltica.

Paso 6: Con la ayuda de estas tablas unificadas por parámetro, se realizará la contrastación de hipótesis y las conclusiones debidamente realizadas sobre el objetivo general de esta investigación.

4.1.4. Nivel de investigación

La investigación es de alcance correlacional, “la utilidad principal de los estudios correlacionales es saber cómo se puede comportar un concepto o una variable al conocer el comportamiento de otras variables vinculadas. Es decir, intentar predecir el valor aproximado que tendrá un grupo de individuos o casos en una variable, a partir del valor que poseen en la o las variables relacionadas” (Hernandez Sampieri, Fernandez Collado, & Baptista Lucio, 2014, pág. 82).

Dicho lo anterior, el alcance de la investigación comprende una correlación entre la variable caucho como agente modificante y las variables de parámetros de diseño, tales como la densidad, estabilidad, flujo, porcentaje de vacíos, VMA y VFA, teniendo como propósito el conocer su relación e influencia en base a un patrón sistemático entre sí.

4.2. Población de estudio

“La población de estudio es un conjunto de casos, definido, limitado y accesible, que formará el referente para la elección de la muestra que cumple con una serie de criterios predeterminados” (Arias Gomez, Villasis Keever, & Miranda Novales, 2016, pág. 201). Por lo cual, la población es el conjunto donde cada elemento concuerda en una serie establecida de especificaciones y normas técnicas.

En el presente proyecto de investigación, la población viene a ser los resultados en cuanto a los parámetros Marshall de las mezclas asfálticas en caliente modificado con distintos porcentajes de caucho mediante el proceso seco y las mezclas asfálticas convencionales, así mismo estas mezclas deben contener un cemento asfáltico cap-pen 60/70. Estos resultados que serán recopilados de diferentes investigaciones nacionales e internacionales, las cuales formarán una base de datos patrón.

Parámetros Marshall: Porcentaje de vacíos, densidad de la mezcla, contenido de vacíos de agregado mineral, estabilidad y flujo de la mezcla.

4.3. Diseño muestral

“Para el proceso cuantitativo la muestra es un subgrupo de la población de interés sobre el cual se recolectarán datos, y que tiene que definirse o delimitarse de antemano con precisión, éste deberá ser representativo de dicha población” (Hernandez Sampieri, Fernandez Collado, & Baptista Lucio, 2014, pág. 173). Por lo tanto, la muestra consta de una base de datos resultante de 7 investigaciones en cuanto a sus ensayos y resultados de cada parámetro de diseño Marshall, todo ello según la incorporación de porcentajes de caucho a la mezcla asfáltica convencional mediante el proceso de vía seca, con un cemento asfáltico cap-pen 60/70. Por consiguiente, esto se traduce a un contenido de 97 resultados por cada parámetro de diseño Marshall, las cuales servirán para el análisis de la investigación.

4.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La técnica para emplear como punto de partida dentro de nuestra investigación será la de observación y estudio de las variables que interviene dentro una mezcla asfáltica modificada, como también de los resultados en cuanto a los parámetros Marshall, esto llevado acabado para cada investigación nacional o interaccionado del cual haremos uso.

Con respecto al tipo de instrumentos a usar, será la realización de hojas de Excel para poder recolectar los datos de la información obtenida y de esta manera poder realizar una base de datos con dicha información.

4.5. Procedimientos para la recolección de datos

Para el procedimiento de recolección de datos haremos una base de datos el cual cuenta con información sobre los distintos parámetros de las mezclas asfálticas como: densidad de la mezcla, porcentaje de vacíos, contenido de vacíos de agregado mineral, estabilidad y flujo.

Paso 1: Recolección bibliográfica.

Paso 2: Revisión bibliográfica.

Paso 3: Recolección de la información necesaria de las investigaciones.

Paso 4: Elaboración de tablas de contenido para la base de datos.

Paso 5: Elaboración de cuadros y gráficos comparativos.

Paso 6: Análisis de las tablas, cuadros y gráficos comparativos

Paso 7: Contrastar las hipótesis planteadas, haciendo uso de la estadística.

4.6. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

Para poder realizar el procesamiento de datos se realizarán tablas acordes a la información y se usarán cuadros comparativos, todo ello realizados en Excel, los cuales nos permitirán analizar la diferencia entre los resultados de los parámetros analizados de las mezclas modificadas con diferentes porcentajes de caucho, respecto de una mezcla convencional, con el fin de cumplir el objetivo del presente estudio.

CAPITULO V: DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS CON POLVO DE NEUMÁTICOS

Tabla 24: Investigaciones analizadas en el presente estudio

Código	Nombre de Tesis	Autor	Universidad/ Revista	Año
URP MAESTRIA 2017	Comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica en caliente modificada con caucho mediante proceso por vía seca respecto a la mezcla asfáltica convencional	Granados Noa, José Luis	URP	2017
UCV LIMA 2018-I	Alternativa de diseño de mezcla asfáltica en caliente con polvo de caucho de NFU para la ciudad de Lima 2018	Cabezas Dulanto, Victor Mendoza Aguirre, Catalina Fiorela	UCV	2018-I
UCV CHIMBOTE 2019	Comportamiento de las mezclas asfálticas adicionandole caucho por a tecnica via seca	Salazar Saldaña, Giancarlo Keinth	UCV	2019
UCV TARAPOTO 2019	Diseño de pavimento flexible con la utilización de polvo de caucho reciclado para minimizar la generación de fisuras del Jr. Jorge Chavez cdra. 01-09 Ciudad de Tarapoto San Martin	Ubidia Pinedo, Lucía Esther	UCV	2019
URP MAESTRIA 2019	Caucho reciclado de llantas en la mezcla de asfalto a compresion para mejorar las propiedades mecánicas	Maguiña Salazar, Walther Teófilo	URP	2019
UPAO TRUJILLO 2017	Influencia de la incorporación de particulas de caucho reciclado como agregados en el diseño de mezcla asfáltica	Alvarez Briceño, Luis Alberto Carrera Sanchez, Ever Tony	UPAO	2017
UCV LIMA 2018	Comportamiento de la mezcla asfáltica agregando caucho reciclado en pavimentos flexibles, Ate, Lima-Perú, 2018	Robles Romero, Agustín Nicolás	UCV	2018
UCV LIMA 2017-I	Aplicación de caucho reciclado en un diseño de mezcla asfáltica para el tránsito vehicular	Villagaray Medina, Edwin Jesús	UCV	2017-I
USMP 2014	Efecto de la incorporación por vía seca, del polvo de neumático reciclado, como agregado fino en mezclas asfálticas	Fajardo Cachay, Luis Enrique Vergaray Huaman, Douglas Alfonso	USMP	2014
PAPER ECUADOR	Obtención de asfalto modificado con polvo de caucho proveniente del Reciclaje de neumaticos de automotores	Campaña O.; Galeas S.; Guerrero V.	Escuela Politecnica Nacional, Ecuador	2015
PAPER COLOMBIA	Trece años de continuo desarrollo con mezclas asfálticas modificadas con grano de caucho reciclado en Bogotá: Logrando sostenibilidad en pavimentos	G. Martinez; B. Caicedo; D. Gonzales; L. Celis	Revista Ingeniería de Construcción	2018
TESIS CHILE 2006	Estudio de la utilización de caucho de neumáticos en mezclas asfálticas en caliente mediante proceso seco	Ramirez Plma, Náyade Irene	Universidad de Chile	2006
TESIS ECUADOR 2016	Análissi del comportamiento a compresión de asfalto conformado por caucho reciclado de llantas como material constitutivo del pavimento asfáltico	Vega Zurita, Danilo Sebastián	Universidad Tecnica de Ambato	2016

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 24 se observa el resultado del filtro inicial, de donde se rescató que cumplan con tener cada variable que interviene en las mezclas asfálticas modificadas con caucho,

como también cada resultado por parámetros para nuestro correspondiente análisis, a su vez, para hacer un mejor proceso se le coloco códigos a cada investigación. Por consiguiente, de la tabla 24 se llevará a cabo el análisis de cada variable que interviene en las mezclas asfálticas modificadas con caucho, y se verificara que cumplan con tener los resultados de cada parámetro de diseño Marshall, todo ello como un filtro final.

Tabla 25: Base de datos detallado de las investigaciones analizadas para el proceso de incorporación de caucho por vía seca

TESIS/AÑO	Ø caucho (mm)	Temp (°C) Digestion	Porcentaje de Caucho (%)						
URP MAESTRIA 2017	Pasa N° 4 (4.75mm)	150	0.50	1.00	1.50	2.00			
		160	0.50						
		170	0.50	1.00	1.50	2.00			
		180	0.50						
UCV LIMA 2018-I	Pasa N° 4 (4.75mm)	165	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00		
UCV CHIMBOTE 2019	Pasa N° 4 (4.75mm)	140	0.50	1.20	1.80				
UCV TARAPOTO 2019	Pasa N° 4 (4.75mm)	150	0.25	0.50	0.75	1.00			
		160	0.25	0.50	0.75	1.00			
		170	0.25	0.50	0.75	1.00			
URP MAESTRIA 2019	Pasa N° 30 (0.63mm)	170	1.00	2.00	3.00				
UPAO TRUJILLO 2017	Pasa N°10 (2.00mm)	140	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	
UCV LIMA 2018	Pasa N° 4 (4.75mm)	160	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50		
UCV LIMA 2017-I	Pasa N° 20 (0.84mm)	150	0.50	1.00					
USMP LIMA 2014	Pasa N°10 (2.00mm)	170	1.00						
Paper ECUADOR	Pasa N° 8 (2.36mm)	175	1.00	2.00	3.00				
Paper COLOMBIA	Pasa N° 30 (0.63mm)	160	1.00	2.00					
Tesis CHILE 2006	Pasa N° 30 (0.63mm)	170	0.50	1.00	1.50				
Tesis ECUADOR 2016	Pasa N°10 (2.00mm)	160	1.00	2.00	3.00				

Fuente: Elaboración Propia

Dentro de este capítulo y presentando la tabla 25, se observó y estudio de manera detallada, desglosada y cuantificativa cada parámetro que interviene en el proceso de incorporación del caucho dentro de una mezcla asfáltica en caliente, dichos parámetros son obtenidos de la base de datos que se armó en base a diferentes investigaciones previas, en donde hubo un principal filtro para incorporarlas a la base de dato, la primera consta en cumplir con ser una mezcla asfáltica en caliente y su proceso de incorporación del caucho tendría que ser en seco, así mismo, un segundo filtro fue de cumplir con el cemento asfáltico pen 60/70 dentro de las mezclas asfálticas a ser ensayadas y por último

fue verificar que cada investigación que nos serviría para la base de datos cumplan con tener los resultados en cuanto a los parámetros Marshall y los ensayos por desempeño, no obstante para este último se hizo una excepción dado a que no todos los ensayos que cumplían con tener resultados Marshall cumplían con tener los ensayos por desempeño.

En suma, a cada parámetro que interviene y los resultados que obtienen dentro de las investigaciones en la base de datos, se le reafirma y asevera acorde a otras especificaciones e investigaciones concluyentes.

5.1. Tamaño y forma de las partículas de caucho reciclado

Tabla 26: Detalle del tamaño de caucho utilizado en distintas investigaciones analizadas

TESIS/AÑO	Tamaño caucho (mm)	Consideraciones	% Caucho
URP MAESTRIA 2017	Pasa N°4 (4.75 mm)	Se determinó la distribución de la granulometría en base a la norma UNE-EN 933-2.	de 0.5% a 2%
UCV LIMA 2018-I	Pasa N°4 (4.75 mm)	Se determinó la distribución de la granulometría en base a la norma ASTM D422	de 6% a 8%
UCV CHIMBOTE 2019	Pasa N°4 (4.75 mm)		de 0.5% a 1.8%
UCV TARAPOTO 2019	Pasa N°4 (4.75 mm)	Se determinó la distribución de la granulometría en base a la norma NTP 339.128 y ASTM D422	de 0.25% a 1%
URP MAESTRIA 2019	Pasa N°30 (0.63 mm)	Se determinó la distribución de la granulometría en base a la norma NTP 339.128 y ASTM D422	de 1% a 3%
UPAO TRUJILLO 2017	Pasa N°10 (2.00 mm)		de 1.5% a 4%
UCV LIMA 2018	Pasa N°4 (4.75 mm)	Se determinó la distribución de la granulometría en base a la norma NTP 339.128 y ASTM D422	de 0.5% a 1%
UCV LIMA 2017-I	Pasa N°20 (0.84 mm)	Se determinó la distribución de la granulometría en base a la norma NTP 339.128 y ASTM D422	de 0.5% a 1%
USMP LIMA 2014	Pasa N°10 (2.00 mm)		1%
Paper ECUADOR	Pasa N°8 (2.36 mm)	Se determinó la distribución de la granulometría en base a la norma NTE INEN 2680:2013	de 1% a 3%
Paper COLOMBIA	Pasa N°30 (0.63 mm)		de 1% a 2%
Tesis CHILE 2006	Pasa N°30 (0.63 mm)	Se determinó la distribución de la granulometría en base al manual de carreteras Vol.5	de 0.5% a 1.5%
Tesis ECUADOR 2016	Pasa N°10 (2.00 mm)	Se determinó la distribución de la granulometría en base a la norma INEN 2680	de 1% a 3%

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 26 se observa detalladamente los distintos tamaños de cauchos usados en los ensayos de mezclas asfálticas dentro de las diferentes investigaciones,

tanto nacionales como internacionales, así también, las normas con las cuales se basaron para hacer la granulometría correspondiente en cada caso. Por otra parte, dentro del cuadro se observa los porcentajes de caucho mínimos y máximos usados correspondientemente, esto para poder ubicar la técnica usada en cuanto al tamaño en conjunto a sus porcentajes de caucho, citando de la norma española como referencia en cuanto a estas técnicas de aplicación, así también, de lo que aseveran otras investigaciones sobre el tamaño de caucho a utilizar.

Tabla 27: Tamaño de partículas usadas con mayor frecuencia por las investigaciones analizadas.

Tamaño caucho (mm)	Número de veces
Pasa N°4 (4.75 mm)	5
Pasa N°8 (2.36 mm)	1
Pasa N°10 (2.00 mm)	3
Pasa N°20 (0.84 mm)	1
Pasa N°30 (0.63 mm)	3
Total	13

Fuente: Elaboración Propia

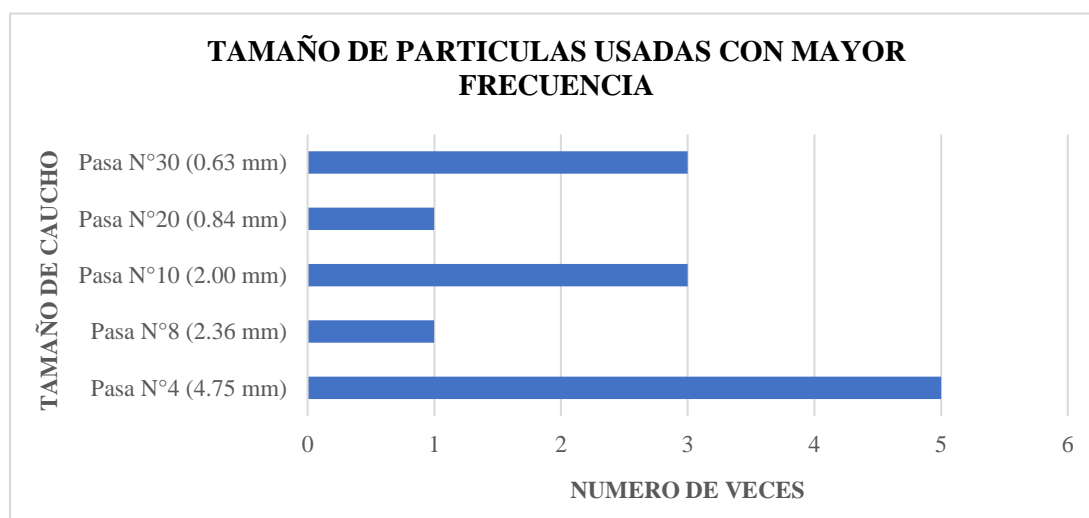


Figura 23: Detalle del tamaño de caucho utilizado en distintas investigaciones analizadas

Fuente: Elaboración Propia

Como se observa en la tabla 27, se encontró dentro de la base de datos que el uso frecuente de partículas de caucho utilizadas vendría a ser la que pasa el tamiz N°4 (4.75mm), en segundo lugar, estarían las partículas que pasan el tamiz N°10 (2.00mm) y el tamiz N°30 (0.63mm), esto sin tomar en consideración sus resultados, solo enfocado al mayor uso dentro de la base de datos.

Por consiguiente, se tiene una evaluación teórica para estos tamaños de partículas que fueron usados con mayor frecuencia y su efecto dentro de las mezclas asfálticas, tanto en su parte interna como su desempeño.

La norma española nos detalla que dentro del proceso de incorporación por vía seca nos encontramos que existe dos técnicas en cuanto al tamaño de las partículas de caucho. Donde la primera de estas nos habla sobre el empleo de tamaños inferior a 2mm, siendo este tamaño su máximo valor a incorporar. Por lo que, el polvo de caucho trabaja como un sistema de 2 elementos, en donde las partículas de caucho más finas, en lo primordial las que pasan el tamiz de 0.5mm, interactúan con el cemento asfáltico a una elevada temperatura, de manera que modifica la parte reológica a través de un proceso similar al del proceso de incorporación por vía húmeda. Por otra parte, las partículas que se encontrarían entre el superior al tamaño de 0.5mm e inferior a 2mm, las cuales se comportarían como un agregado elastómero al interior del esqueleto mineral de la mezcla asfáltica, no obstante, también reacciona de manera superficial con el cemento asfáltico, dando de esta manera interacción asfalto/caucho cohesionando los dos agentes. Así mismo, la norma española detalla que esta técnica se realizó dentro de España con un empleo de 2% de caucho en polvo, porcentaje que está en base al peso total de la mezcla.

En cuanto a la segunda técnica descrita por la norma española, esta hace empleo de partículas de caucho pasantes del tamiz de tamaño 0.5mm, dejando de lado la parte gruesa que interviene en la técnica descrita anteriormente, así mismo esta técnica emplea un porcentaje menor de caucho, y del mismo modo que en la primera técnica este polvo de caucho fino interactúa directamente con el cemento asfáltico como agente modificador al momento de introducirlo al mezclador. Por lo tanto, esta técnica se describe como un sistema que se encuentra en el punto medio entre la incorporación por vía seca y vía húmeda debido al corto tiempo de mezclado para su etapa de digestión, en el cual no se van a producir reacciones importantes entre el caucho y cemento asfáltico las cuales resultan en el proceso de incorporación por vía húmeda, no obstante, si se encuentra una adecuada temperatura y tiempo de digestión, los resultados tienden a ser semejantes al proceso por vía húmeda.

Dejando claro la interacción del polvo de caucho en diferentes tamaños de su partícula con el cemento asfáltico y la mezcla asfáltica en global, y conociendo que

la digestión que ocurre dentro de esta incorporación es un proceso que se extiende desde la parte superficial de la partícula de caucho llegando hasta la parte interna (ver figura 21), se puede detallar que cuanto más fina y en menor proporción sea empleado la partícula de caucho menor será el tiempo de digestión, no obstante la temperatura debe ser más elevada en comparación a una mezcla convencional.

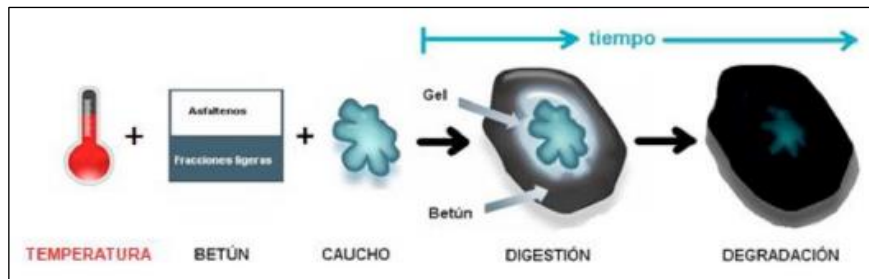


Figura 24: Proceso de digestión del caucho
Fuente: Medina, 2012

Para tener un enfoque más detallado sobre la intervención de las partículas de caucho dentro del resultado de las mezclas asfálticas, presentamos lo siguiente:

Xiao y Amirkhanian (2009). Dentro de su investigación realizó ensayos con mezclas asfálticas modificadas con caucho, variando los tamaños de las partículas, de esa forma encontró que el mejoramiento en cuanto a su comportamiento frente al fenómeno de ahuellamiento se desarrolla al tener tamaños de 0.6mm de caucho tal como se muestra en la figura 22, en donde se tiene un ahuellamiento aproximado de 0.5mm para dicho tamaño de partícula.

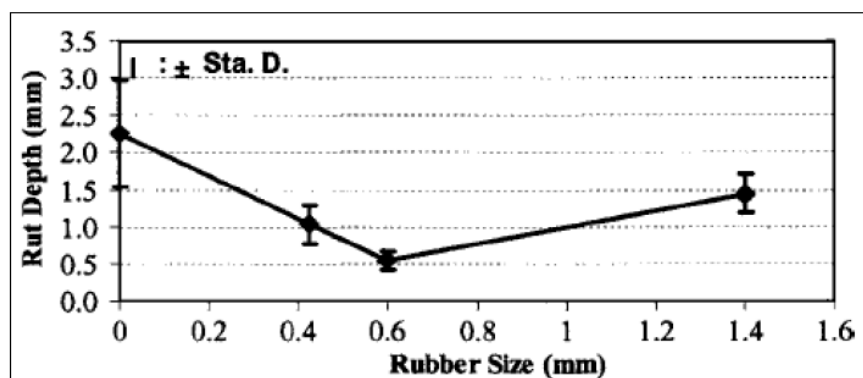


Figura 25: Profundidad de la huella vs tamaño de caucho
Fuente: Xiao, 2007

Murat, Volkan y Arzu (2015). Dentro de su investigación asevera que la forma y tamaño de las partículas de caucho tiene una influencia sobre la resistencia a la tensión de las mezclas asfálticas. Para llegar a tal conclusión estudio 4 tipos de

mezclas asfálticas, donde la variable era el caucho en su forma y tamaño. La primera la llamo de control por ser la mezcla asfáltica convencional, la segunda llamada tipo I donde la partícula de caucho era en grano y de tamaño superior al tamiz 40, la tercera la nombro tipo III la cual se diferencia del tipo I por ser de tamaño equivalente al tamiz 40 y una cuarta que la llamo tipo II la cual era caucho en forma de tiras. Del comportamiento mostrado en la figura 23, se percibe una mayor resistencia a la tensión para todas las mezclas modificadas con caucho en comparación al convencional, no obstante, el tipo III tiene a tener un mejor comportamiento frente a las otras mezclas modificadas. Así mismo, en la figura 24 se observa una vez más que las mezclas modificadas tienen una mayor resistencia a la tensión al aplicarse cargas repetitivas, sin embargo, el tipo III tiende a tener una mejor resistencia a un mayor número de cargas.

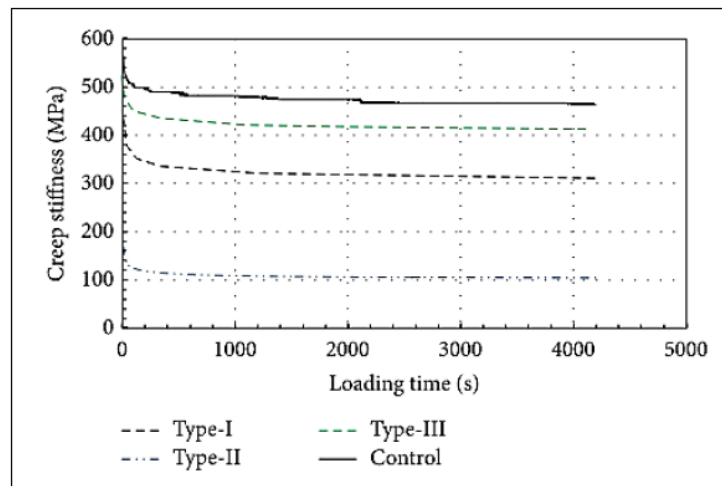


Figura 26: resistencia a la tensión vs tiempo de aplicación de carga
Fuente: Murat, 2015

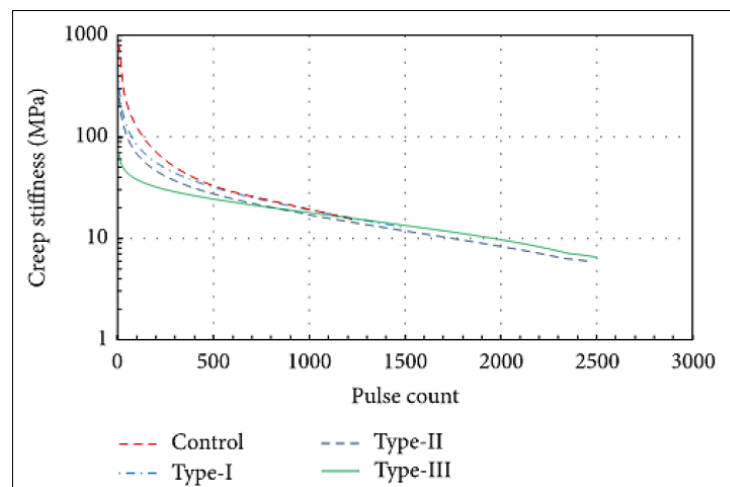


Figura 27: resistencia a la tensión vs ciclos de carga
Fuente: Murat, 2015

De tal manera, se observa con todo lo afirmado mediante la norma española y las citas de investigaciones específicas sobre el tamaño de las partículas, que el uso más adecuado del caucho vendría a ser en tamaños de partículas finas, estas serían correspondientes a una Tecnología Convencional si hablamos de forma teórica, en donde el uso es generalmente de granulometría fina (granos de caucho no mayores a 5.0mm), sin embargo, no hay que dejar de lado el aspecto económico para la obtención del polvo de caucho, se conoce que a medida que disminuye las partículas de caucho se tendrán que optar por procesos y maquinarias más especializadas. En cuanto a nuestra base de datos, estas corresponderían a una Tecnología Genérica para su uso, en donde la granulometría del caucho se divide en parte fina y gruesa.

5.2. Grado de temperatura de la mezcla asfáltica modificada con caucho

Tabla 28: base de datos de las diferentes temperaturas empleadas en las Investigaciones analizadas

TESIS/AÑO	TEMPERATURA (°C)					
URP MAESTRIA 2017		150	160		170	180
UCV LIMA 2018-I				165		
UCV CHIMBOTE 2019				165		
UCV TARAPOTO 2019		150	160		170	
URP MAESTRIA 2019					170	
UPAO TRUJILLO 2017	140					
UCV LIMA 2018			160			
UCV LIMA 2017-I		150				
USMP LIMA 2014					170	
Paper ECUADOR						175
Paper COLOMBIA			160			
Tesis CHILE 2006					170	
Tesis ECUADOR 2016			160			

Fuente: Elaboración Propia

Dentro de la tabla 28 se logra observar los diferentes grados de temperatura con las cuales se realizó los ensayos de modificación de las mezclas asfálticas con caucho, de detalla una variación de la temperatura entre 140°C a 180°C, siendo de este modo una menor frecuencia este mínimo y máximo valor para la temperatura dentro de las investigaciones nacionales e internacionales. Así mismo, se puede observar un mayor uso frecuente para las temperaturas que oscilan entre 160°C a

170°C, dentro de las cuales se detalla esto sin tomar en consideración sus resultados, solo enfocado al mayor uso dentro de la base de datos.

A continuación, nos encontramos de manera detallada la tabla 29 y la figura 25, correspondiente al uso frecuente de temperaturas dentro de la base de datos estudiadas. Aquí se puede entender que existe un uso basado en estudios previos correspondientemente de cada investigación, para que el uso con mayor frecuencia este en un rango de 150°C a 170°C, donde a primera instancia se detallaría que nuestro valor a optar al momento de desarrollar una digestión dentro de las mezclas asfálticas modificadas con caucho se encontraría dentro de estos valores.

Tabla 29: Frecuencia de temperaturas empleadas en las diferentes investigaciones analizadas.

TESIS	TEMPERATURA °C							Total
	140	150	160	165	170	175	180	
USMP LIMA 2014					1			1
URP MAESTRIA 2019					3			3
URP MAESTRIA 2017		4	1		4		1	10
UPAO TRUJILLO 2017	6							6
UCV TARAPOTO 2019		4	4		4			12
UCV LIMA 2018-I				5				5
UCV LIMA 2018			5					5
UCV LIMA 2017-I		2						2
UCV CHIMBOTE 2019				3				3
Tesis Ecuador 2016			3					3
Tesis Chile 2006					3			3
Paper Ecuador						3		3
Paper Colombia			2					2
Total	6	10	15	8	15	3	1	58

Fuente: Elaboración Propia

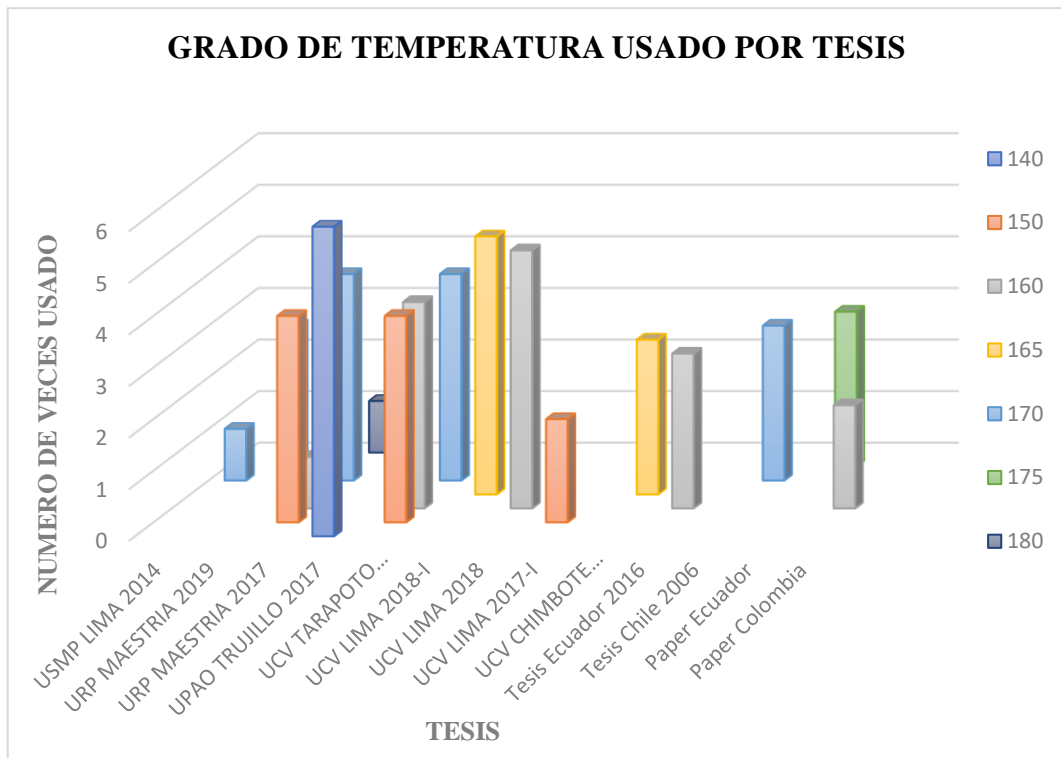


Figura 28: Frecuencia de temperaturas empleadas en las investigaciones analizadas

Fuente: Elaboración Propia

Ahora bien, una vez detallado lo anterior, nos encontramos con la forma en la cual se obtiene la temperatura con la que se debe realizar la mezcla asfáltica modificada con caucho, dicho valor que siendo cercano al óptimo o el adecuado de manera específica daría un gran aporte en cuanto a la digestión que se produce al hacer uso de partículas de caucho de tamaño inferior al 0.5mm directamente con el cemento asfáltico, proceso detallado dentro del capítulo 5.1. Este valor de temperatura y tiempo de digestión vendrán a ser encontrados mediante los ensayos de inmersión – compresión, dichos ensayos haciendo uso de intervalos de temperatura las cuales son superior a los ensayos dentro de mezclas asfálticas convencionales.

Por consiguiente, tenemos lo siguiente:

Rodríguez (2016). Dentro de su estudio del uso de caucho dentro de los pavimentos asfálticos, resalta para la tecnología en seco, que la temperatura a usarse, independiente de la técnica de incorporación del caucho, debe estar a una temperatura mayor al convencional, tal rango comprende valores entre 160°C a 180°C.

Feiteira Dias, Picado-Santos y Captao (2014). Dentro de su investigación realizada acorde al rendimiento de las mezclas modificadas con caucho mediante el proceso

seco, destaca como una de las ventajas para esta tecnología de incorporación, que la resistencia al ahuellamiento y la fatiga se incrementa cuando la interacción entre el agente modificador (caucho) y la mezcla asfáltica no supera la temperatura de 175°C.

Ramírez (2006). Detalla en cuanto al rango de temperatura dentro del laboratorio para llevar a cabo la digestión, la cual debe comprender un rango de 150°C a 170°C con un intervalo de una a dos horas en el tiempo dentro del horno, todo esto previo a su debida compactación de la probeta.

Granados (2017). Dentro de su investigación muestra lo que viene a ser el ensayo de inmersión-compresión, como proceso para obtener un valor de temperatura y tiempo de digestión para seguidamente realizar las mezclas modificadas con caucho.

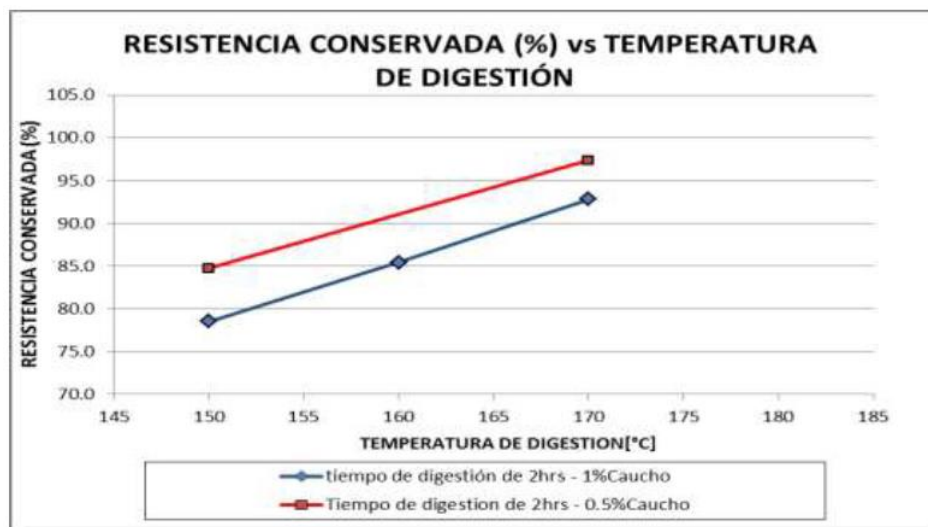


Figura 29: Tendencia de los resultados de las mezclas con 0.5% y 1.0% de caucho y tiempo de digestión de 2 horas.

Fuente: José Granados, 2017

Como se muestra en la figura 26, Granados en primera instancia encontró una tendencia y la posible relación directamente proporcional entre la resistencia conservada y la temperatura de digestión a 2 horas, detallando de esta manera una primera posibilidad, que, a mayor temperatura de digestión, el proceso de incorporación del caucho a las mezclas mejora.

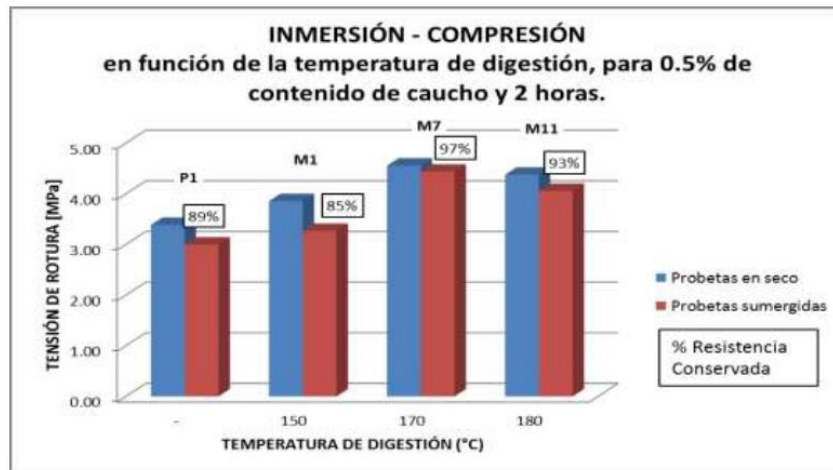


Figura 30: Resultados de las mezclas P1, M1, M7 y M11.

Fuente: José Granados, 2017

Debido a los resultados obtenidos en la figura 27, Granados (2017) añade un valor a sus pruebas para poder comprobar esa posible relación directa que se produjo, este valor es el M11, una mezcla a temperatura de 180°C con 0.5% de caucho, tal como se muestra en la figura, al observar estos resultados, se encontró que la afirmación sobre la relación directamente proporcional que encontró en un principio no es válida, aseverando que el aumento de la temperatura no trae consigo una mejora en la digestión a mayor grado que el de 170.

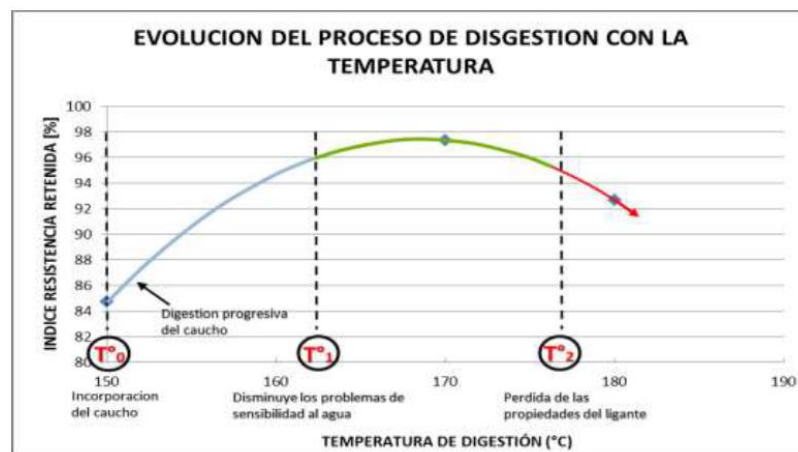


Figura 31: Perdida de propiedades de las mezclas modificadas por aumento de temperatura.

Fuente: José Granados, 2017

Por último, dentro de esta etapa Granados (2017) muestra mediante un gráfico, la cual se detalla en la figura 28, la evolución del proceso de digestión acorde a temperaturas y el índice de resistencia retenida, del cual describe que el adecuado valor de la temperatura con un tiempo optimo, y la combinación apropiada de ambas,

consolida una integración de las partículas de caucho con el asfalto, de esa forma asegura una mejora en las propiedades, así mismo, detalla que al tener un exceso en cuanto a la temperatura, desciende la mejora encontrada a causa de una volatilización que ocurre internamente en el asfalto, reduciendo las propiedades de adhesividad y aglomerantes.

De tal forma, se reafirma con todo lo detallado mediante las citas de investigaciones específicas sobre la temperatura, que el uso cercano al adecuado en cuanto a la temperatura para una reacción del caucho con el asfalto se encuentra en el rango de 160 a 170°C, esto en efecto a que también tiene influencia en su relación con el tiempo para la digestión, no obstante, según las experiencias tomadas con anterioridad, para este tiempo de digestión nos especifican valores que oscilan las 2 horas. Para finalizar, no se debe dejar de lado el concepto sobre el envejecimiento del asfalto a causa de altas temperaturas.

5.3. Porcentaje de incorporación de caucho reciclado en la mezcla asfáltica

Tabla 30: Porcentajes de caucho empleados en las investigaciones analizadas

TESIS/AÑO	Temp (°C) Digestion	Porcentaje de Caucho (%)					
URP MAESTRIA 2017	150	0.50	1.00	1.50	2.00		
	160	0.50					
	170	0.50	1.00	1.50	2.00		
	180	0.50					
UCV LIMA 2018-I	165	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	
UCV CHIMBOTE 2019	165	0.50	1.20	1.80			
UCV TARAPOTO 2019	150	0.25	0.50	0.75	1.00		
	160	0.25	0.50	0.75	1.00		
	170	0.25	0.50	0.75	1.00		
URP MAESTRIA 2019	170	1.00	2.00	3.00			
UPAO TRUJILLO 2017	140	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00
UCV LIMA 2018	160	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	
UCV LIMA 2017-I	150	0.50	1.00				
USMP LIMA 2014	170	1.00					
Paper ECUADOR	175	1.00	2.00	3.00			
Paper COLOMBIA	160	1.00	2.00				
Tesis CHILE 2006	170	0.50	1.00	1.50			
Tesis ECUADOR 2016	160	1.00	2.00	3.00			

Fuente: Elaboración Propia

Dentro de la tabla 30, se llega a observar a detalle los porcentajes de caucho empleados dentro de sus respectivas investigaciones, estos porcentajes que solo en un caso especial dentro de nuestra base de datos, de la Tesis de la UCV Lima 2017-

I, representa el grado mayor al que algunas bases teóricas indican que se debe emplear este agente dentro de las mezclas, no obstante ya se vio con anterioridad y se volverá a detallar que tanto el tamaño como el porcentaje de caucho están íntimamente relacionados con la digestión realizada dentro de la mezcla modificada a un tiempo y grado de temperatura. Por lo cual, también se ostenta de una gran cantidad de investigaciones dentro de nuestra base de datos donde hacen empleo de bajos porcentajes de caucho dentro de sus ensayos. Una vez más dentro de las cuales se detalla esto sin tomar en consideración sus resultados, solo enfocado al mayor uso dentro de la base de datos.

Tabla 31: Frecuencia en el uso de porcentajes de caucho según sus temperaturas empleados en las Investigaciones analizadas

Porcentaje de Caucho (%)	Temperatura °C							Total
	140	150	160	165	170	175	180	
0.25		1	1		1			3
0.50		3	3	1	3		1	11
0.75		1	1		1			3
1.00		3	4		5	1		13
1.20				1				1
1.50	1	1	1		2			5
1.80				1				1
2.00	1	1	3		2	1		8
2.50	1		1					2
3.00	1		1		1	1		4
3.50	1							1
4.00	1							1
6.00				1				1
6.50				1				1
7.00				1				1
7.50				1				1
8.00				1				1
Total	9	10	15	5	15	3	1	58

Fuente: Elaboración Propia

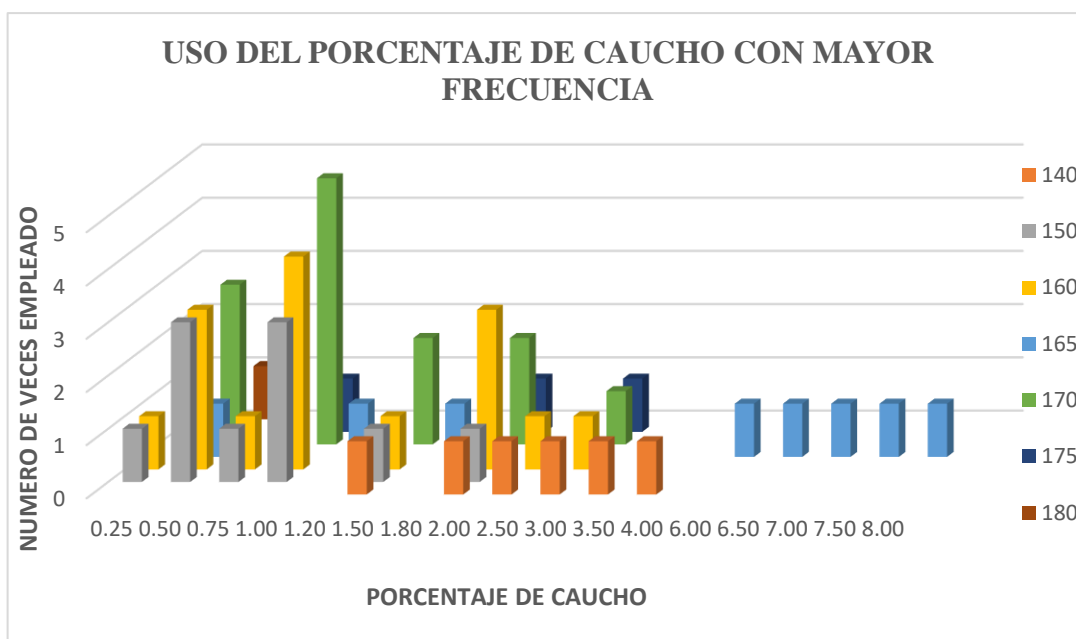


Figura 32: Frecuencia en el uso de porcentajes de caucho según sus temperaturas empleados en las investigaciones analizadas

Fuente: Elaboración Propia

En cuanto a la tabla 31, del cual se detalla a primera vista la frecuencia en el uso del porcentaje de caucho frente a las temperaturas empleadas en las misma, destacando de este modo para el rango observado en la parte 5.2 del capítulo V, que compete al rango de temperaturas empleadas para la digestión de las mezclas asfálticas con caucho, de 150°C a 170°C resaltados en la tabla. Dando de este modo el rango de 0.5% a 2% de caucho empleados con frecuencia en la base de datos para las mezclas asfálticas modificadas, del mismo modo en la figura 29 se tiene un alto índice de uso para los porcentajes bajos de caucho en las mezclas, esto a primera instancia se entiende como el porcentaje cercano al adecuado que se debería emplear para la tecnología en seco, no obstante, en suma a esto se tendrá las afirmaciones y conclusiones de otros autores acerca del porcentaje de caucho, como también lo se tiene dentro de la norma española para este punto específico.

Tabla 32: Porcentajes de caucho empleado con mayor frecuencia dentro de las investigaciones analizadas

Porcentaje de Caucho (%)	Uso
0.25	3
0.50	8
0.75	3
1.00	14
1.20	1
1.50	6
1.80	1
2.00	9
2.50	2
3.00	4
3.50	1
4.00	1
6.00	1
6.50	1
7.00	1
7.50	1
8.00	1
Total	58

Fuente: Elaboración Propia

Para un detallado más profundo, antes de comenzar con las citas acorde al porcentaje de caucho por parte de diferentes autores, se observa tanto en la tabla 32 y en la figura 30, que el empleo mayor dentro de la base de datos es del 1% de caucho para las modificaciones de asfalto, así mismo, también se encuentra que hay un gran uso para el 2% y 0.5% de caucho, las cuales presenten mayor frecuencia después del 1%, no obstante a continuación se resaltara y reafirmara valores que son necesarios y aceptables para el porcentaje de caucho.

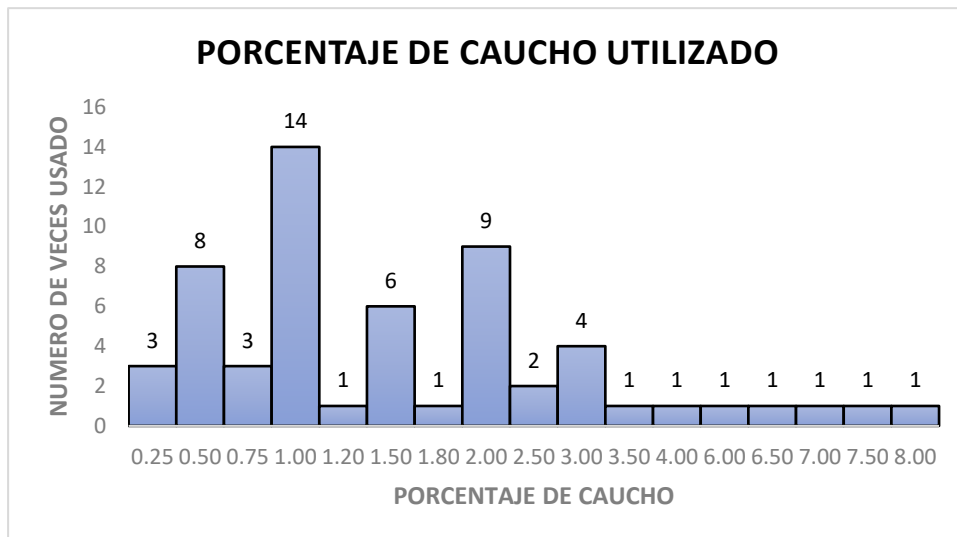


Figura 33: Porcentajes de caucho empleado con mayor frecuencia dentro de las investigaciones analizadas

Fuente: Elaboración Propia

Por consiguiente, se tiene una evaluación teórica para estos porcentajes de caucho que fueron usados con mayor frecuencia y su efecto dentro de las mezclas asfálticas, tanto en su parte interna como su desempeño. Por lo cual, la norma española se enfoca en el uso de 2% de caucho en polvo por peso de la mezcla, esto a su vez también se encuentra especificado dentro del parte 5.1 del capítulo V. Así mismo, la norma española detalla la experiencia del uso del caucho en un 1% con tamaños inferiores a 0.5mm dentro de una mezcla de tipo semidensa modificada, dejando buenos resultados. No obstante, el máximo valor del porcentaje de caucho descrito por esta norma en base a la experiencia que se realizó dentro de España fue de 2% de caucho en polvo para la tecnología en seco.

Así mismo para comprender estos valores de porcentajes, se tiene que hacer un hincapié a la técnica de incorporación del caucho, del cual se observa y describe en base a la teoría que la técnica PlusRide agrega a la mezcla porcentajes de 1 a 3% de caucho en polvo acorde al peso total de agregados, la técnica Genérica por el contrario precisa que el empleo del caucho no debe superar el 2% del peso total de la mezcla, a su vez la técnica Convencional detalla que su empleo del caucho necesario es del 2% o aproximado a ese valor en general para las mezclas asfálticas modificadas con caucho.

Ahora bien, en cuanto al uso del porcentaje respecto a otras investigaciones concluyentes y que aseveran tener un valor adecuado para esta parte, vendría a ser lo siguiente:

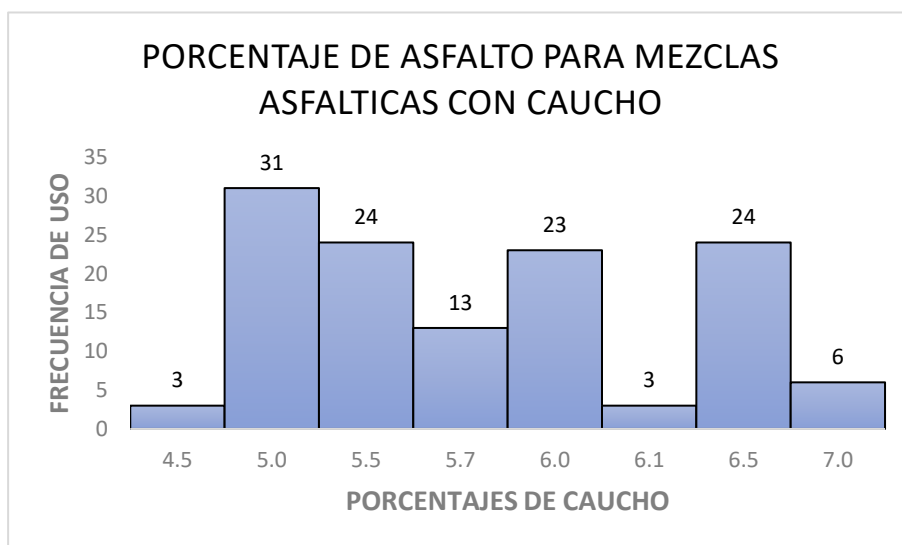
Ramírez (2006). Dentro de su investigación del uso del caucho para las mezclas asfálticas, muestra que el contenido óptimo porcentaje de caucho que llegó a tener para valores satisfactorios de tracción indirecta, fatiga y módulos es de alrededor de 0.5%, así mismo, dentro de los parámetros Marshall evaluados, específicamente para el ensayo de inmersión-comprensión los resultados fueron mejores para la resistencia conservada cuando el empleo de caucho fue de hasta 1%.

5.4. Contenido de asfalto dentro de la mezcla modificada con caucho

Tabla 33: Contenido de asfalto empleado con mayor frecuencia dentro de las investigaciones analizadas

Porcentaje de asfalto	Uso
4.5	3
5.0	31
5.5	24
5.7	13
6.0	23
6.1	3
6.5	24
7.0	6
Total	127

Fuente: Elaboración Propia



Fuente: Elaboración Propia

Figura 34: Contenido de asfalto empleado con mayor frecuencia dentro de las investigaciones analizadas

Dentro de la tabla 33 y del mismo modo de la figura 31, el cual representa de una mejor forma el uso frecuente de ciertos contenidos de asfalto en las mezclas asfálticas modificadas, en el marco de la base de datos que obtuvimos acorde a otras investigaciones. En donde se puede observar que el 5% de asfalto es el valor con mayor frecuencia de uso en las mezclas que se evaluaron respectivamente dentro de todas las investigaciones estudiadas, así mismo, se puede detallar que existiría un rango de uso en cuanto a estos porcentajes de asfalto utilizados, el cual comprende de un 5% a 6.5%, el cual contiene un mayor grado de uso, no obstante, dentro de este rango de descarta el grado de 6.1 y 6.7, esto debido a que su uso está por debajo del resto dentro del rango, como también que estos datos usando se encuentran únicamente dentro de una investigación, y que los valores que mayor se opta son proporcionales a 5.

Para continuar, se muestra una evaluación teórica acorde a lo que especifica la norma española y la parte bibliográfica del tema. Dentro de las cuales se detalla esto sin tomar en consideración sus resultados, solo enfocado al mayor uso dentro de la base de datos.

Dentro de la norma española, basado en su experiencia para el efecto en conjunto de las mezclas asfálticas con el caucho, describe que se encuentra una mayor resistencia al fenómeno del agrietamiento, tanto por flexión como por fatiga de las capas, dado al incremento por parte del contenido de asfalto dentro de las mezclas modificadas, así mismo, el potencial de este alto contenido del asfalto aumenta la resistencia al envejecimiento y la oxidación, en conjunto a la presencia de antioxidantes del caucho de neumáticos. Por último, el caucho incrementa el volumen del asfalto, dando así un mayor beneficio contra los problemas de exudación que se puedan producir, dado a que el incremento en cuanto al volumen del asfalto permite envolver con películas más gruesas a los agregados.

En cuanto a la tecnología sobre la incorporación de caucho, la PlusRide especifica que para obtener un porcentaje de vacíos de entre 2 a 4% dentro de la mezcla modificada, por lo general se debe hacer empleo de un alto contenido de asfalto, la cual está en un rango de 7.5 a 9%.

Por otra parte, dentro de estos valores de contenido de asfalto se encuentra el óptimo contenido de asfalto para las mezclas modificadas, la cual se determina mediante el

ensayo de inmersión-compresión, como también de un análisis de cada uno de los parámetros Marshall. No obstante, esto se verifica, haciendo uso de los ensayos Módulo Resiliente, Tracción Directa y Resistencia a la fatiga.

Por último, observamos que el contenido de asfalto dentro de una mezcla se incrementa a medida que el porcentaje de caucho insertado aumenta, esto tendría que ver con la absorción que produce el asfalto.

5.5. Contenido de vacíos de aire dentro de la mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho

Tabla 34: Porcentaje de Vacíos obtenidos acorde al empleo de temperatura, porcentaje de caucho y contenido de asfalto dentro de las mezclas asfálticas de las Investigaciones analizadas

Tesis	Temperatura (°C)	Porcentaje de Caucho	Contenido de asfalto	Porcentaje vacíos de la mezcla
URP MAESTRIA 2017	150	0.50	5.0	6.600
			5.5	5.400
			6.0	4.300
			6.5	2.500
		1.00	5.0	7.900
			5.5	6.900
			6.0	4.700
			6.5	3.000
		1.50	5.0	8.300
			5.5	7.500
			6.0	5.700
			6.5	5.900
	2.00	5.0	9.400	
		5.5	7.900	
		6.0	6.600	
		6.5	5.000	
	160	0.50	5.0	6.600
			5.5	5.000
			6.0	3.400
			6.5	2.000
		0.50	5.0	6.700
			5.5	4.500
			6.0	3.300
			6.5	1.500
1.00			5.0	7.000
			5.5	5.100
			6.0	3.500
			6.5	2.000
1.50	5.0	5.700		
	5.5	4.700		

			6.0	4.200
			6.5	2.900
			5.0	6.300
		2.00	5.5	4.600
			6.0	4.200
			6.5	4.400
			5.0	5.500
	180	0.50	5.5	5.200
			6.0	4.500
			6.5	3.900
UCV LIMA 2018-I	165	6.00	5.0	6.500
		6.50	5.0	5.600
		7.00	5.0	4.700
		7.50	5.0	2.600
		8.00	5.0	2.500
			5.0	8.440
		0.50	5.5	5.900
			6.0	4.050
			6.5	2.210
UCV CHIMBOTE 2019	165		5.0	4.870
		1.20	5.5	4.550
			6.0	1.900
			6.5	0.350
			5.0	2.330
		1.80	5.5	1.730
			6.0	0.830
			6.5	0.650
UCV TARAPOTO 2019	150	0.25	5.7	8.200
		0.50	5.7	8.100
		0.75	5.7	6.600
		1.00	5.7	5.900
	160	0.25	5.7	8.500
		0.50	5.7	8.400
		0.75	5.7	6.900
		1.00	5.7	6.900
	170	0.25	5.7	8.300
		0.50	5.7	8.200
		0.75	5.7	7.300
		1.00	5.7	6.300
			5.5	11.477
URP MAESTRIA 2019	170	1.00	6.0	7.910
			6.5	4.270
			7.0	4.390
			5.5	8.177
		2.00	6.0	10.180
			6.5	8.280
			7.0	8.780
			5.5	8.857
		3.00	6.0	6.417

			6.5	4.360	
			7.0	3.557	
UCV LIMA 2018	160	0.50	4.5	8.240	
		1.00	5.0	7.030	
		1.50	5.5	5.220	
		2.00	6.0	3.930	
		2.50	6.5	2.510	
UCV LIMA 2017-I	150	0.50	4.5	4.800	
			5.0	5.700	
			5.5	4.100	
			6.0	2.800	
			6.5	2.700	
		1.00	4.5	6.400	
			5.0	6.300	
			5.5	2.400	
			6.0	-	
			6.5	1.700	
USMP	170	1.00	5.0	6.900	
			5.5	4.400	
			6.0	3.200	
			6.5	1.500	
Tesis Chile 2006	170	0.50		5.400	
		1.00	5.5	4.700	
		1.50		3.600	
Tesis Ecuador 2016	160	1.00	5.0	6.798	
			5.5	6.855	
			6.0	4.663	
			6.5	4.378	
			7.0	4.229	
			5.0	5.325	
			5.5	3.331	
		2.00	6.0	0.407	
			6.5	0.457	
			7.0	0.004	
			3.00	5.0	4.674
				5.5	0.051
				6.0	2.158
				6.5	3.492
7.0	0.549				

Fuente: Elaboración propia

Dentro de la tabla 34 se encuentra la base de datos en cuanto al porcentaje de vacíos dentro de las mezclas asfálticas de las investigaciones estudiadas previamente, en donde podemos detallar que se encuentran resultados superiores a lo que demanda Marshall, como también valores considerablemente inferiores. Tanto para las temperaturas y porcentajes de caucho ya detalladas con anterioridad. Así mismo, de estos valores y de manera filtrada estarán optándose para su análisis en conjunto, el

cual se podrá desarrollar un análisis más profundo. La manera a filtrar este conjunto de resultados de la tabla 33 será verificando que se encuentre en un rango de temperatura de 150°C a 170°C, con porcentajes de asfalto dentro del rango de 5.0 a 7.0% y con valores que no superen el 3% en la incorporación de caucho, como también que las partículas de caucho no estén por encima de los 4.75mm. Por último, estos valores a tomar para su respectivo análisis no deben estar desfasados o superados de manera considerable uno con respecto al otro.

5.6. Grado de VMA dentro de las mezclas asfálticas modificadas con caucho

Tabla 35: Porcentaje de VMA obtenidos acorde al empleo de temperatura, porcentaje de caucho y contenido de asfalto dentro de las mezclas asfálticas de las Investigaciones analizadas

Tesis	Temperatura (°C)	Porcentaje de Caucho	Contenido de asfalto	Porcentaje de VMA de la mezcla
URP MAESTRIA 2017	150	0.50	5.0	17.100
			5.5	16.700
			6.0	16.000
			6.5	16.400
		1.00	5.0	18.000
			5.5	18.800
			6.0	17.500
			6.5	17.200
		1.50	5.0	19.400
			5.5	19.400
			6.0	18.600
			6.5	20.000
	2.00	5.0	20.400	
		5.5	20.200	
		6.0	20.100	
		6.5	19.700	
	160	0.50	5.0	17.100
			5.5	17.100
			6.0	16.500
			6.5	16.500
		0.50	5.0	17.300
			5.5	16.200
			6.0	16.400
			6.5	16.000
1.00		5.0	17.800	
		5.5	16.900	
		6.0	16.700	
		6.5	16.700	
1.50	5.0	17.100		
	5.5	17.400		
	6.0	17.500		
	6.0	17.500		

			6.5	17.600	
			5.0	18.100	
		2.00	5.5	17.600	
			6.0	18.000	
			6.5	19.000	
	180	0.50	5.0	16.200	
			5.5	16.900	
			6.0	17.400	
			6.5	18.000	
UCV LIMA 2018-I	165		6.00	5.0	17.000
			6.50	5.0	16.600
			7.00	5.0	15.900
			7.50	5.0	15.500
			8.00	5.0	15.700
UCV CHIMBOTE 2019	165	0.50		5.0	27.200
				5.5	25.100
				6.0	25.500
				6.5	24.400
		1.20		5.0	24.400
				5.5	24.000
				6.0	23.800
		1.80		6.5	23.000
				5.0	22.400
				5.5	21.800
UCV TARAPOTO 2019	150		6.0	23.000	
			5.0	22.400	
			5.5	21.800	
			6.0	23.000	
	160		6.5	23.200	
			0.25	5.7	19.700
			0.50	5.7	19.500
			0.75	5.7	18.900
	170		1.00	5.7	18.200
			0.25	5.7	19.900
			0.50	5.7	19.800
			0.75	5.7	19.200
		1.00	5.7	19.100	
		0.25	5.7	19.700	
		0.50	5.7	19.600	
		0.75	5.7	19.600	
		1.00	5.7	18.600	
URP MAESTRIA 2019	170	1.00		5.5	19.883
				6.0	18.763
				6.5	18.397
				7.0	19.853
		2.00		5.5	19.833
				6.0	18.867
				6.5	18.633
		3.00		7.0	22.733
				5.5	19.960
				6.0	18.753
		6.5	18.393		
		7.0	19.837		

UCV LIMA 2018	160	0.50	4.5	15.510
		1.00	5.0	15.160
		1.50	5.5	14.770
		2.00	6.0	14.860
		2.50	6.5	14.930
UCV LIMA 2017-I	150	0.50	4.5	16.100
			5.0	16.600
			5.5	17.700
			6.0	17.900
			6.5	18.700
		1.00	4.5	17.900
			5.0	17.900
			5.5	17.800
			6.0	-
			6.5	19.400
USMP	170	1.00	5.0	17.200
			5.5	16.200
			6.0	16.100
			6.5	16.000
Tesis Chile 2006	170	0.50		17.200
		1.00	5.5	16.500
		1.50		15.500
Tesis Ecuador 2016	160	1.00	5.0	13.604
			5.5	14.000
			6.0	14.043
			6.5	14.358
			7.0	14.797
		2.00	5.0	12.239
			5.5	11.290
			6.0	10.882
			6.5	12.074
			7.0	12.740
		3.00	5.0	12.940
			5.5	15.036
			6.0	12.997
		6.5	14.716	
		7.0	13.412	

Fuente: Elaboración Propia

Dentro de la tabla 35 se encuentra la base de datos en cuanto a los vacíos en el agregado mineral (VMA) dentro de las mezclas asfálticas de las investigaciones estudiadas previamente, en donde podemos detallar que se encuentran resultados superiores al mínimo que demanda el diseño Marshall, como también valores inferiores. Tanto para las temperaturas, contenido de asfalto y porcentajes de caucho ya detalladas con anterioridad. Del mismo modo que en la parte de porcentaje de vacíos dentro de las mezclas asfálticas (5.5), se realizara el filtrado de resultados para su análisis.

5.7. Densidad obtenida dentro de las mezclas asfálticas modificadas con caucho

Tabla 36: Densidad obtenidos acorde al empleo de temperatura, porcentaje de caucho y contenido de asfalto de las mezclas asfálticas de las Investigaciones analizadas

Tesis	Temperatura (°C)	Porcentaje de Caucho	Contenido de asfalto	Densidad de la mezcla
URP MAESTRIA 2017	150	0.50	5.0	2.322
			5.5	2.345
			6.0	2.354
			6.5	2.378
		1.00	5.0	2.276
			5.5	2.285
			6.0	2.337
			6.5	2.357
		1.50	5.0	2.258
			5.5	2.268
			6.0	2.304
			6.5	2.276
	2.00	5.0	2.228	
		5.5	2.246	
		6.0	2.262	
		6.5	2.284	
	160	0.50	5.0	2.323
			5.5	2.335
			6.0	2.363
		0.50	6.5	2.377
			5.0	2.317
			5.5	2.360
	170	0.50	6.0	2.366
			6.5	2.390
			5.0	2.302
			5.5	2.341
		1.00	6.0	2.357
			6.5	2.371
			5.0	2.323
			5.5	2.327
		1.50	6.0	2.334
			6.5	2.346
			5.0	2.293
			5.5	2.319
	2.00	6.0	2.320	
		6.5	2.305	
5.0		2.347		
5.5		2.340		
180	0.50	6.0	2.337	
		6.5	2.333	
		6.0	2.401	
UCV LIMA 2018-I	165	6.50	5.0	2.411

		7.00	5.0	2.433
		7.50	5.0	2.444
		8.00	5.0	2.436
			5.0	2.178
		0.50	5.5	2.254
			6.0	2.255
			6.5	2.297
			5.0	2.263
UCV CHIMBOTE 2019	165	1.20	5.5	2.286
			6.0	2.305
			6.5	2.341
			5.0	2.324
		1.80	5.5	2.354
			6.0	2.331
			6.5	2.334
		0.25	5.7	2.250
	150	0.50	5.7	2.254
		0.75	5.7	2.271
		1.00	5.7	2.290
UCV TARAPOTO 2019		0.25	5.7	2.244
	160	0.50	5.7	2.246
		0.75	5.7	2.263
		1.00	5.7	2.266
		0.25	5.7	2.248
	170	0.50	5.7	2.251
		0.75	5.7	2.253
		1.00	5.7	2.280
			5.5	2.212
		1.00	6.0	2.270
			6.5	2.347
			7.0	2.295
URP MAESTRIA 2019			5.5	2.287
	170	2.00	6.0	2.223
			6.5	2.219
			7.0	2.215
			5.5	2.267
		3.00	6.0	2.314
			6.5	2.337
			7.0	2.317
UCV LIMA 2018		0.50	4.5	2.420
	160	1.00	5.0	2.444
		1.50	5.5	2.468
		2.00	6.0	2.479
		2.50	6.5	2.490
			4.5	2.456
UCV LIMA 2017-I			5.0	2.452
	150	0.50	5.5	2.435
			6.0	2.441
			6.5	2.431
		1.00	4.5	2.415

			5.0	2.426
			5.5	2.440
			6.0	-
			6.5	2.431
USMP	170	1.00	5.0	2.343
			5.5	2.384
			6.0	2.401
			6.5	2.416
Tesis Chile 2006	170	0.50		2.290
		1.00	5.5	2.293
		1.50		2.307
Tesis Ecuador 2016	160	1.00	5.0	2.138
			5.5	2.140
			6.0	2.150
			6.5	2.153
			7.0	2.154
			5.0	2.172
		2.00	5.5	2.195
			6.0	2.181
			6.5	2.211
		3.00	7.0	2.206
			5.0	2.153
			5.5	2.114
			6.0	2.176
			6.5	2.144
			7.0	2.189

Fuente: Elaboración Propia

Dentro de la tabla 36 se encuentra la base de datos en cuanto a los resultados de la densidad dentro de las mezclas asfálticas de las investigaciones estudiadas previamente, en donde podemos detallar que se encuentran resultados mayores al 2.100 e inferiores al 2.500. Tanto para las temperaturas, contenido de asfalto y porcentajes de caucho ya detalladas con anterioridad. Del mismo modo que en la parte de porcentaje de vacíos dentro de las mezclas asfálticas (5.5), se realizara el filtrado de resultados para su análisis.

5.8. Valor de la Estabilidad dentro de las mezclas modificadas con caucho

Tabla 37: Resultados de la estabilidad acorde al empleo de temperatura, porcentaje de caucho y contenido de asfalto de las mezclas asfálticas de las Investigaciones analizadas.

Tesis	Temperatura (°C)	Porcentaje de Caucho	Contenido de asfalto	Estabilidad de la mezcla
URP MAESTRIA 2017	150	0.50	5.0	1604.00
			5.5	1776.00
			6.0	1676.00
			6.5	1556.00
		1.00	5.0	1383.00
			5.5	1495.00
			6.0	1609.00
			6.5	1645.00
		1.50	5.0	1337.00
			5.5	1407.00
			6.0	1644.00
			6.5	1695.00
	2.00	5.0	1208.00	
		5.5	1242.00	
		6.0	1280.00	
		6.5	1249.00	
	160	0.50	5.0	1868.00
			5.5	1927.00
			6.0	2039.00
			6.5	1854.00
		0.50	5.0	2065.00
			5.5	2178.00
			6.0	2164.00
			6.5	2044.00
1.00		5.0	1768.00	
		5.5	1889.00	
		6.0	1927.00	
		6.5	1898.00	
1.50	5.0	1634.00		
	5.5	1806.00		
	6.0	1794.00		
	6.5	1618.00		
2.00	5.0	1406.00		
	5.5	1443.00		
	6.0	1461.00		
	6.5	1449.00		
170	0.50	5.0	2189.00	
		5.5	2144.00	
		6.0	2120.00	
		6.5	2056.00	
165	6.00	5.0	1245.70	
	6.50	5.0	1268.90	
UCV LIMA 2018-I				

		7.00	5.0	1267.80
		7.50	5.0	1257.20
		8.00	5.0	1249.20
			5.0	1665.00
		0.50	5.5	1669.00
			6.0	1298.00
			6.5	1319.00
			5.0	1827.00
UCV CHIMBOTE 2019	165	1.20	5.5	1596.00
			6.0	1570.00
			6.5	1554.00
			5.0	1851.00
		1.80	5.5	2085.00
			6.0	2004.00
			6.5	1676.00
		0.25	5.7	2031.00
	150	0.50	5.7	2198.00
		0.75	5.7	2010.00
		1.00	5.7	2030.00
UCV TARAPOTO 2019		0.25	5.7	2134.00
	160	0.50	5.7	2180.00
		0.75	5.7	2130.00
		1.00	5.7	2099.00
		0.25	5.7	2196.00
	170	0.50	5.7	2211.00
		0.75	5.7	2190.00
		1.00	5.7	2073.00
			5.5	691.53
		1.00	6.0	901.20
			6.5	1043.33
			7.0	875.10
URP MAESTRIA 2019			5.5	696.73
	170	2.00	6.0	912.76
			6.5	1044.67
			7.0	894.43
			5.5	701.30
		3.00	6.0	910.27
			6.5	1043.00
			7.0	897.43
		0.50	4.5	2076.30
UCV LIMA 2018	160	1.00	5.0	1990.00
		1.50	5.5	1937.30
		2.00	6.0	1916.00
		2.50	6.5	2109.00
			4.5	1461.00
UCV LIMA 2017-I	150	0.50	5.0	1550.00
			5.5	1331.00
			6.0	1343.00
			6.5	1060.00
		1.00	4.5	1290.00

			5.0	1355.00
			5.5	985.00
			6.0	-
			6.5	1060.00
			5.0	2240.00
USMP	170	1.00	5.5	2183.00
			6.0	2040.00
			6.5	1920.00
		0.50		16459.00
Tesis Chile 2006	170	1.00	5.5	8751.00
		1.50		8948.00
			5.0	1981.05
			5.5	2054.70
		1.00	6.0	2179.58
			6.5	2094.3
			7.0	2238.34
			5.0	1154.16
Tesis Ecuador 2016	160	2.00	5.5	1402.30
			6.0	939.80
			6.5	1445.159
			7.0	1682.51
			5.0	917.41
			5.5	1210.94
		3.00	6.0	908.71
			6.5	987.93
			7.0	1365.99

Fuente: Elaboración Propia

Dentro de la tabla 37 se encuentra la base de datos en cuanto a los resultados de la estabilidad de las mezclas asfálticas de las investigaciones estudiadas previamente, en donde podemos detallar que se encuentran resultados que sobrepasan en gran medida lo especificado dentro del diseño Marshall, así también valores inferiores al mínimo establecido. Tanto para las temperaturas, contenido de asfalto y porcentajes de caucho ya detalladas con anterioridad y que también están puestas en la tabla para su mayor comprensión. Del mismo modo que en la parte de porcentaje de vacíos dentro de las mezclas asfálticas (5.5), se realizara el filtrado de resultados para su análisis.

5.9. Valor del Flujo dentro de las mezclas modificadas con caucho

Tabla 38: Resultados del parámetro Flujo acorde al empleo de temperatura, porcentaje de caucho y contenido de asfalto de las mezclas asfálticas de las Investigaciones analizadas.

Tesis	Temperatura (°C)	Porcentaje de Caucho	Contenido de asfalto	Flujo de la mezcla
URP MAESTRIA 2017	150	0.50	5.0	3.886
			5.5	4.140
			6.0	4.318
			6.5	4.750
		1.00	5.0	4.064
			5.5	4.496
			6.0	4.572
			6.5	4.902
		1.50	5.0	4.242
			5.5	4.394
			6.0	5.004
			6.5	5.080
	2.00	5.0	4.572	
		5.5	4.394	
		6.0	4.394	
		6.5	5.258	
	160	0.50	5.0	2.718
			5.5	3.302
			6.0	3.480
		0.50	6.5	4.242
			5.0	3.302
			5.5	3.480
	170	1.00	6.0	3.988
			6.5	4.496
5.0			3.632	
1.50		5.5	3.810	
		6.0	4.140	
		6.5	4.648	
180	1.50	5.0	4.648	
		5.5	3.734	
		6.0	4.140	
	2.00	6.5	4.826	
		5.0	4.064	
		5.5	4.496	
165	0.50	6.0	4.826	
		6.5	5.004	
		5.0	5.004	
		5.5	5.512	
UCV LIMA 2018-I	165	6.0	5.766	
		6.5	5.842	
UCV LIMA 2018-I	165	6.00	5.0	2.860
		6.50	5.0	3.110

		7.00	5.0	3.560
		7.50	5.0	2.620
		8.00	5.0	2.570
			5.0	6.900
		0.50	5.5	6.400
			6.0	7.130
			6.5	6.870
			5.0	5.330
UCV CHIMBOTE 2019	165	1.20	5.5	5.830
			6.0	6.600
			6.5	8.000
			5.0	5.470
		1.80	5.5	6.670
			6.0	8.000
			6.5	6.500
		0.25	5.7	7.700
	150	0.50	5.7	7.800
		0.75	5.7	9.000
		1.00	5.7	10.000
UCV TARAPOTO 2019		0.25	5.7	8.400
	160	0.50	5.7	8.600
		0.75	5.7	10.000
		1.00	5.7	12.000
		0.25	5.7	8.500
	170	0.50	5.7	8.700
		0.75	5.7	11.200
		1.00	5.7	13.000
			5.5	2.207
		1.00	6.0	3.170
			6.5	3.727
			7.0	4.240
URP MAESTRIA 2019			5.5	2.197
	170	2.00	6.0	2.843
			6.5	3.700
			7.0	4.220
			5.5	2.193
		3.00	6.0	3.163
			6.5	3.730
			7.0	4.243
UCV LIMA 2018		0.50	4.5	3.030
	160	1.00	5.0	3.430
		1.50	5.5	5.070
		2.00	6.0	5.700
		2.50	6.5	6.170
			4.5	2.100
UCV LIMA 2017-I			5.0	2.800
	150	0.50	5.5	3.400
			6.0	3.700
			6.5	3.800
		1.00	4.5	2.700

			5.0	2.900
			5.5	3.200
			6.0	-
			6.5	3.500
			5.0	3.400
USMP	170	1.00	5.5	4.100
			6.0	4.300
			6.5	4.900
		0.50		3.048
Tesis Chile 2006	170	1.00	5.5	3.810
		1.50		3.380
			5.0	1.595
			5.5	1.755
		1.00	6.0	2.035
			6.5	2.532
			7.0	2.695
			5.0	2.113
Tesis Ecuador 2016	160	2.00	5.5	2.494
			6.0	2.865
			6.5	4.503
			7.0	4.183
			5.0	0.287
			5.5	4.343
		3.00	6.0	3.221
			6.5	3.790
			7.0	4.082

Fuente: Elaboración Propia

Dentro de la tabla 38 se encuentra la base de datos en cuanto a los resultados del flujo de las mezclas asfálticas de las investigaciones estudiadas previamente, en donde podemos detallar que se encuentran resultados que están dentro de lo especificado en el diseño Marshall, siendo 13 pulgadas el de mayor valor, así también, dentro de esta base de datos se encontró resultados que son considerablemente bajos respecto a lo que demanda Marshall, no obstante, este conjunto de datos inferiores vienen siendo de una sola investigación, por lo cual los resultados de esta investigación se descarta para el análisis en conjunto de la base de datos. Tanto para las temperaturas, contenido de asfalto, y porcentajes de caucho ya detalladas con anterioridad. Del mismo modo que en la parte de porcentaje de vacíos dentro de las mezclas asfálticas (5.5), se realizara el filtrado de resultados para su análisis.

5.10. Resultado de las pruebas de ensayo de Desempeño de las mezclas asfálticas convencionales y mezclas asfálticas modificadas con caucho.

Para un mayor enfoque en cuanto a nuestro objetivo al cual se pretende alcanzar, a continuación, se presenta 3 ensayos por desempeño para las mezclas asfálticas modificadas con respecto a las mezclas convencionales, encontrando de tal manera la influencia que tiene el agente modificador dentro de las mezclas asfáltica. Dichos resultados que es tan comprendidos correspondiente de diferentes investigaciones, del cual se añadirá una descripción en base a sus resultados y en base a la bibliografía que se tiene por parte de estos ensayos.

5.10.1. Resistencia a la Fatiga de las mezclas asfálticas modificadas frente a las convencionales

Tabla 39: Resultados de ensayos de fatiga para mezclas asfálticas con 0%, 0.5%, 1.0% y 1.5% de caucho

Carga (kPa)	Resistencia a la fatiga			
	N			
	0	0.5	1	1.5
150	3852	31703	33749	24446
180	1700	24055	7632	14143
200	1085	12446	8966	14820
230	730	8063	8038	4588
250	484	7851	3940	2220
300	141	5930	3665	2610

Fuente: Ramírez, 2006

Dentro de esta investigación, como se observa en tabla 39, las variables a tener en cuenta para conocer la resistencia a la fatiga fueron el porcentaje de caucho y el número de repeticiones de carga (Kpa), hasta llegar al punto de fractura, esto debido a que el contenido de caucho y la temperatura de digestión no fueron variados dentro del ensayo, y el porcentaje máximo de caucho optado por este estudio fue de 1.5%. Por lo habitual se describir que a mayor porcentaje de caucho mayor será el beneficio en cuanto a la mezcla asfáltica, no obstante, este ensayo de fatiga nos demuestra que esto no siempre es así, ya que teniendo una temperatura de 170°C para una digestión que contiene 5.5% de cemento asfáltico, el mayor valor se tiene cuando se incluye 0.5% de caucho, de tal forma se puede aseverar que las mezclas modificadas con caucho tienden a tener un

mejor comportamiento a la fatiga, pero la mezcla con 0.5% de caucho acepta mayor número de repeticiones por carga antes de fracturarse, demostrando una menor sensibilidad a los cambios en el número de ciclos por aumento de carga.

Tabla 40: Resultados de ensayo de Rueda de Hamburgo para mezclas asfálticas con 0% y 0.5% de caucho

Ensayo Rueda de Hamburgo (Disgregación)				
Tipo de mezcla asfáltica	SIP	Ah (SIP)	CS	SS
	N° pasadas	mm	mm/100 pasadas	mm/100 pasadas
0.0% caucho	10700	2.23	0.09	0.08
0.5% caucho	16900	1.89	0.04	0.04

Fuente: Granados, 2017

Tabla 41: Resultados de ensayo Rueda de Hamburgo para mezclas asfálticas con 0% y 0.5% de caucho

Ensayo Rueda de Hamburgo (Ahuellamiento)			
Tipo de mezcla	NF	Ah máximo	
	N° pasadas	mm	%
0.0% caucho	20000	2.86	0
0.5% caucho	20000	1.95	-32%

Fuente: Granados, 2017

Por otra parte, tenemos esta siguiente investigación en el cual una vez más se demuestra el beneficio al emplear caucho, tal como se detalla en la tabla 37 y 38, ambas realizadas con una misma mezcla a una temperatura de 170°C para su digestión y con un contenido de vacíos de 7.0 +- 1%, en el cual se sumó la mezcla asfáltica con la variación por parte del caucho en un 0.5%. En un primer lugar se detalla el ensayo de pérdida de desgaste (tabla 40) por medio de la Rueda de Hamburgo para poder valorar la resistencia a la disgregación causados por el tráfico, en donde se encontró que la mezcla modificada con caucho muestra un incremento en la resistencia a la disgregación (SIP), por ende se deduce que la incorporación de caucho mejora la adherencia asfalto-agregado, y consigo trae un bajo despegue de las partículas de agregado frente al factor agua.

Como segundo punto tenemos detallado en la tabla 41 el ensayo de ahuellamiento por medio de la Rueda de Hamburgo. Del cual se puede observar la profundidad de ahuellamiento acorde a un número de pasadas

de rueda, en donde se encuentra que la profundidad es menor para la mezcla asfáltica modificada frente a la mezcla asfáltica convencional al llegar a las 20000 pasadas. Por lo tanto, al modificar la mezcla asfáltica con un 0.5% de caucho, se obtiene una mayor cohesión, el cual influye a que las mezclas incrementen su resistencia al ahuellamiento.

5.10.2. Resultados del ensayo de modulo resiliente de las mezclas asfálticas modificadas frente a las convencionales

Tabla 42: Resultados de ensayo Módulo Resiliente para mezclas asfálticas con 0%, 0.5%, 1% y 1.5% de caucho a 25°C y 40°C de temperatura de ensayo

Modulo resiliente					
Temperatura de ensayo	Frecuencia	Modulo Resiliente (Mpa)			
		0	0.5	1	1.5
25	1	2175	5149	5141	4080
	0.5	2087	5060	5113	4033
	0.33	2071	6039	5099	3931
40	1	420	1720	2395	2096
	0.5	301	1668	2321	1998
	0.33	246	1643	2251	1922

Fuente: Ramírez, 2006

Dentro de esta investigación, correspondiente al ensayo de modulo resiliente, se realizó conforme una mezcla con diferentes contenidos de caucho y evaluadas a dos diferentes temperaturas, una media que llego a ser de 25°C y otra con un valor alto de 40°C, ambas aplicadas a tres frecuencias de 0.33, 0.5 y 1.0 Hz y con una amplitud cercano al 10% de la resistencia a tracción indirecta para el pulso de carga. Como se observa en la tabla 39, a una temperatura de 25°C no existe mucho cambio en cuanto al módulo resiliente respecto a las frecuencias por cada porcentaje incorporado de caucho. Por el contrario, para las mezclas ensayadas a 40°C el Módulo Resiliente es menos susceptibles a la aplicación de las frecuencias de carga, así mismo, se logra observar que, al incremente la frecuencia en esta temperatura, en las mezclas convencionales, se presenta un mayor aumento en el Módulo Resiliente a comparación al resto mezclas modificadas con caucho. Por último, se resalta de la tabla que, los valores máximos del incremento en cuanto al Modulo Resiliente se da en aproximadamente dentro del rango de 0.5% a 1% de contenido de caucho,

pasado este valor comienza el decrecimiento, posiblemente a que una parte del caucho no consigue la interacción con el asfalto, teniendo un comportamiento de partícula blanda.

Tabla 43: Resultados de ensayo de Modulo resiliente y sensibilidad a la temperatura de mezcla asfáltica con 0% y 0.5% de caucho

Modulo resiliente y sensibilidad a la temperatura					
Tipo de Mezcla asfáltica	MR (Mpa)		Variación MR (%)		Variación con temperatura (%)
	20 °C	25°C	20°C	25°C	
0.0% caucho	4831	3266	0	0	32%
0.5% caucho	6990	4891	45%	50%	30%

Fuente: Granados, 2017

Por otro lado, tenemos la investigación nacional realizada en el 2017 para el mismo ensayo de Modulo Resiliente y sumado a eso la sensibilidad a la temperatura, tal cual como se observa en la tabla 43 este ensayo fue realizado para una mezcla convencional y una modificadas con 0.5% de caucho, incorporado a 170°C de temperatura por un tiempo de 2hrs, ambas mezclas fueron evaluadas a temperaturas de 20°C y 25°C. Como se puede observar en la tabla, hay un incremento considerable de hasta un 45% en los valores del módulo resiente evaluadas a 20°C para las mezclas modificadas y un incremento de hasta 50% para los valores de modulo resiliente evaluadas a 25°C. Lo que nos traduce a que el incremento del módulo elástico por parte de las mezclas modificadas es de mayor importancia a mayores temperaturas, lo cual es un buen indicador para evitar el fenómeno de ahuellamiento o deformación plástica del pavimento, el cual ocurre con mayor frecuencia en climas cálidos a causa del descenso de la viscosidad causado por el calor.

Por parte de la variación de temperatura mostrada en la misma tabla, las mezclas que fueron modificadas con caucho presentar un 30% en la variación del módulo resiente, menor al 32% que obtuvo la mezcla convencional. Esto nos traduce a que las mezclas modificadas con caucho tienen una baja sensibilidad a la temperatura, lo cual es esencial al momento de ejecutar un pavimento en zonas con climas extremos.

5.10.3. Resistencia a la compresión diametral de las mezclas asfálticas modificadas frente a las convencionales.

Tabla 44: Resultados de ensayo de Resistencia a la Compresión Diametral de una mezcla asfáltica con 0%, 0.5%, 1% y 1.5% de caucho

Resistencia a la compresión diametral		
porcentaje de caucho	Carga de rotura (kN)	R _τ (MPa)
0 %	11	1.1
0.5 %	12.4	1.24
1.0 %	11.4	1.14
1.5 %	12.1	1.19

Fuente: Ramírez, 2006

En cuanto a tercer ensayo por desempeño, nos encontramos la investigación internacional del 2006, la cual trata sobre la compresión diametral de las mezclas asfáltica, tal como se observa en la tabla 44, se realizó este ensayo para una mezcla asfáltica convencional y unas tres mezclas modificadas con 0.5%, 1.0% y 1.5% de caucho a una temperatura de 170°C y un tiempo de 2hrs para su digestión, tanto la mezcla convencional como las modificadas contiene un 5.5% de asfalto. Así mismo, las probetas con cada una de estas mezclas se acondicionan a unos 25°C para ser ensayadas. Por lo que, los resultados mostrados en la tabla nos detallan que la incorporación de caucho incrementa la resistencia a la compresión diametral, así mismo el mayor valor en cuanto a esta resistencia se encuentra en la incorporación de 0.5% de caucho, luego de este valor la resistencia tiende a tener un descenso.

Tabla 45: Resultados de ensayo de Resistencia a la Compresión Diametral de una mezcla asfáltica con 0% y 0.5% de caucho

Resistencia a la compresión diametral						
Mezcla	T° digestión (°C)	Tiempo digestión (hr)	Porcentaje de caucho	Resistencia a la compresión diametral		
				Mpa	kgf/cm ³	Variación
P1	0	0	0	0.79	7.92	0
M1	170	2	0.5	1.79	12.13	53%

Fuente: Granados, 2017

Por otro lado, para este mismo tipo de ensayo por desempeño, se tiene la investigación nacional realizada el 2017, en donde se elabora una mezcla convencional y una mezcla modificada con 0.5% de caucho a una temperatura de 170°C durante un tiempo de 2hrs para su digestión. Así mismo, las probetas con cada una de estas mezclas se acondicionan a unos 25°C para ser ensayadas. Dándonos los resultados que se muestran en la tabla 45, el cual detalla que la mezcla modificada con caucho presenta un valor mayor en cuanto a la resistencia a la compresión diametral comparada con la mezcla convencional. La razón de este comportamiento vendría a darse por el factor de cohesión, el cual se presenta un mayor valor en la mezcla modificadas.

Tabla 46: Resultados de ensayo de Resistencia a la Compresión Diametral de una mezcla asfáltica con 0.25%, 0.5%, 0.75% y 1% de caucho

Mezcla	T° digestión (°C)	Porcentaje de caucho	Resistencia a la compresión diametral		
			Área (cm ²)	Carga (kg)	Resistencia (kg/cm ²)
P1	150	0.25	83.32	3320	39.8
	160	0.25	83.32	4050	48.6
	170	0.25	83.32	4820	57.8
P2	150	0.5	83.32	3401	40.8
	160	0.5	83.32	4204	50.5
	170	0.5	83.32	4975	59.7
P3	150	0.75	83.32	3290	39.5
	160	0.75	83.32	4020	48.2
	170	0.75	83.32	4840	58.10
P4	150	1	83.32	3105	37.3
	160	1	83.32	3770	45.2
	170	1	83.32	4740	56.9

Fuente: Ubidia, 2019

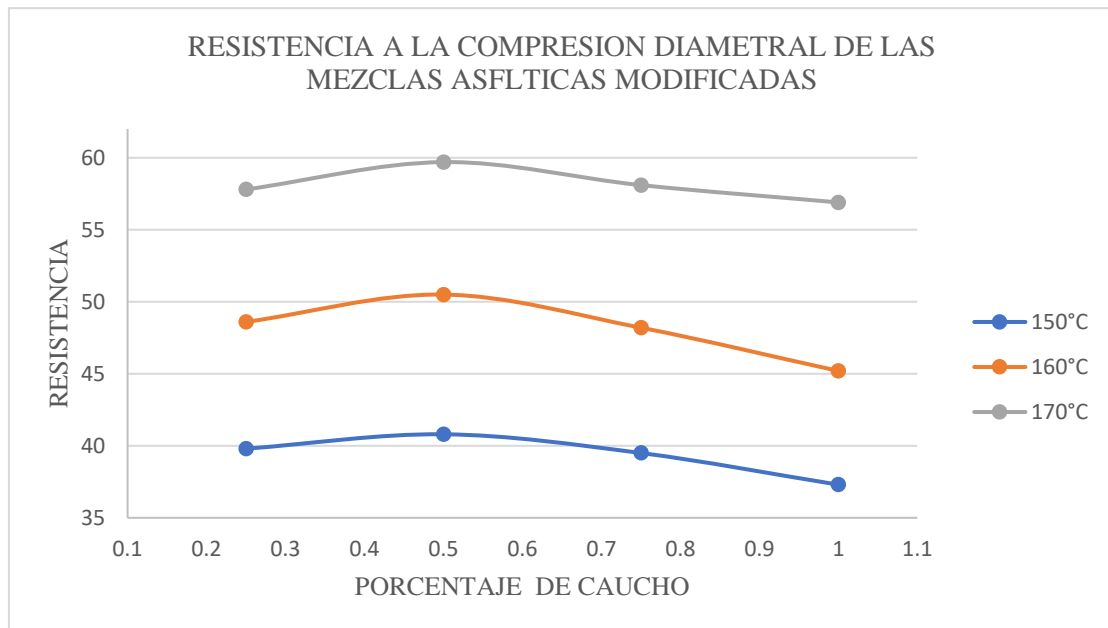


Figura 35: Resistencia a la compresión diametral de las mezclas asfálticas modificadas con caucho a temperaturas de 150, 160 y 170°C.

Fuente: Ubidia, 2019

Otro caso similar para el ensayo de compresión diametral se encontró en la investigación nacional de 2019, del cual se observa dentro de la tabla 46 los resultados que esta comprende de diferentes mezclas asfálticas modificadas con 0.25, 0.5, 0.75 y 1% de caucho a temperaturas de 150, 160 y 170°C para su digestión. Del cual se detalla de una mejor manera en la figura #, de donde podemos resaltar a primera vista que el de mayor temperatura de digestión en la mezcla (170°C) fue el que obtuvo mayores resultados en cuanto a su resistencia a compresión diametral para todas sus incorporaciones de caucho en comparación a las otras mezclas con menor temperatura. No obstante, dentro de esta mayor temperatura para las mezclas modificadas, se resalta que para la incorporación de 0.5% de caucho fue donde se encontró un mayor valor de la resistencia, pasando este valor los resultados de resistencia descende. Por último, este mismo efecto sucede para las de menor temperatura, en donde su mayor valor en los resultados recae para la mezcla modificada con 0.5% de caucho.

CAPITULO VI: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

6.1. Análisis correlacional de la recopilación filtrada de la base de datos, resultados en cuanto a los ensayos Marshall de mezclas asfálticas modificadas con caucho.

Dentro de este capítulo se llevará a cabo el análisis correlacional de los resultados de cada parámetro de diseño Marshall que tiene las investigaciones empleadas, estos resultados de manera en conjunta como una base datos única, debido a que cumplieron con el ultimo filtro realizado en el capítulo anterior.

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.		

(1) A la fecha se tienen tramos efectuados en el Perú que tienen el rango 2% a 4% (es deseable que tienda al menor 2%) con resultados satisfactorios en climas fríos por encima de 3.000 m.s.n.m. que se recomienda en estos casos.

(2) Relación entre el porcentaje en peso del agregado más fino que el tamiz 0,075 mm y el contenido de asfalto efectivo, en porcentaje en peso del total de la mezcla.

(3) Para zonas de clima frío es deseable que la relación Est. /flujo sea de la menor magnitud posible.

(4) El Índice de Compactabilidad mínimo será 5.
El Índice de Compactabilidad se define como:
$$\frac{1}{\text{GEB } 50 - \text{GEB } 5}$$

Siendo GEB50 y GEB5, las gravedades específicas bulk de las briquetas a 50 y 5 golpes.

Figura 36: Requisitos para mezclas de concreto bituminoso - Parámetros de diseño Marshall
Fuente Tabla 423-06 – MTC EG2013

Método Marshall	Tráfico ligero		Tráfico medio		Tráfico pesado	
	Carpeta y base		carpeta y base		carpeta y base	
Criterio de mezcla	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
Compactación, número de golpes en cada uno de los especímenes	35		50		75	
Estabilidad, (N) (lb)	3336		5338		8006	
	750	-----	1200	-----	1800	-----
Flujo, (0.25 mm) (0.01 in)	8	18	8	16	8	14
Porcentaje de vacíos	3	5	3	5	3	5
Porcentaje de vacíos en los agregados minerales	Ver Tabla 2.2					
Porcentaje de vacíos rellenos de asfalto	70	80	65	78	65	75

Figura 37: Tabla de criterios de diseño Marshall según el tráfico inducido
Fuente: Extraído de Publicación Técnica No 246 Sanfandila, Qro, 2004

6.1.1. Análisis correlacional del grado de temperatura, el porcentaje de caucho y contenido de asfalto con respecto al porcentaje de Vacíos dentro de las mezclas modificadas.

Tabla 47: Porcentaje de vacíos resultante de la modificación de las mezclas asfálticas con caucho obtenidos de las Investigaciones UCV TARAPOTO 2019, UCV CHIMBOTE 2019, URP MAESTRIA 2019, TESIS ECUADOR 2016, URP MAESTRIA 2017, UCV LIMA 2018 I y UCV LIMA 2018.

Mezcla	Porcentaje de Asfalto (%)					
	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	
Patrón 0%	P1	5.800	4.100	2.800	2.100	-
	P2	7.190	5.700	4.030	2.830	2.29
	P3	4.865	3.948	2.894	1.514	-
150°C						
0.25%	-	-	-	-	-	
0.50%	6.60	5.40	4.30	2.50	-	
0.75%	-	-	-	-	-	
1.00%	7.90	6.90	4.70	3.00	-	
1.50%	8.30	7.50	5.70	5.90	-	
2.00%	9.40	7.90	6.60	5.00	-	
160°C						
0.25%	-	-	-	-	-	
0.50%	6.60	5.00	3.40	2.00	-	
0.75%	-	-	-	-	-	
1.00%	6.80	6.86	4.66	4.38	4.23	
2.00%	5.33	3.33	4.13	4.57	4.00	
3.00%	4.67	3.06	2.16	3.49	5.49	
165°C						
0.50%	8.44	5.90	4.05	2.21	-	
1.20%	4.87	4.55	1.90	0.35	-	
1.80%	2.33	1.73	0.83	0.65	-	
170°C						
0.25%	-	-	-	-	-	
0.50%	6.70	4.50	3.30	1.50	-	
0.75%	-	-	-	-	-	
1.00%	7.00	5.10	3.50	2.00	4.39	
1.50%	5.70	4.70	4.20	2.90	-	
2.00%	6.30	4.60	4.20	4.40	8.78	
3.00%	-	-	-	-	3.56	

Fuente: Elaboración Propia

En base a los parámetros de diseño Marshall mostradas anteriormente, del cual se observa el rango para el porcentaje de vacíos, se observa de la Tabla 47 que los resultados inferiores al máximo y superiores al mínimo establecido son las que tiene una dosificación de 0.5% de caucho, de este

valor tanto para las temperaturas que van de los 150°C a los 170°C, no obstante estos valores se muestran en el intervalo de 5.5% a 6.0% de asfalto, dado a que la dosificación de asfalto muestra una relación inversamente proporcional al porcentaje de vacíos. Así también, por parte de la incorporación de caucho, esta tiene una relación inversamente proporcional al porcentaje de vacíos resultante.

Por otro lado, es importante resaltar que hay resultados fuera de lo mencionado anteriormente que se encuentran dentro de lo establecido por Marshall, pero no son tomados en cuenta debido a su diferente comportamiento al variar las temperaturas, y a su vez por la dispersión que esta muestra, tal como se observa en las Figuras 35 y 36 en la cual se tiene las líneas de tendencia considerablemente alejadas entre sí a diferencia de la Figura 37 donde los valores son muy cercanos. Esto probablemente se deba a que no hubo una adecuada interacción o digestión del caucho con el asfalto, debido a su dosificación y posiblemente a temperaturas no adecuadas, como se da en el caso de la temperatura de 150°C del cual se resalta el valor más alto para el porcentaje de vacíos dentro de todos los resultados.

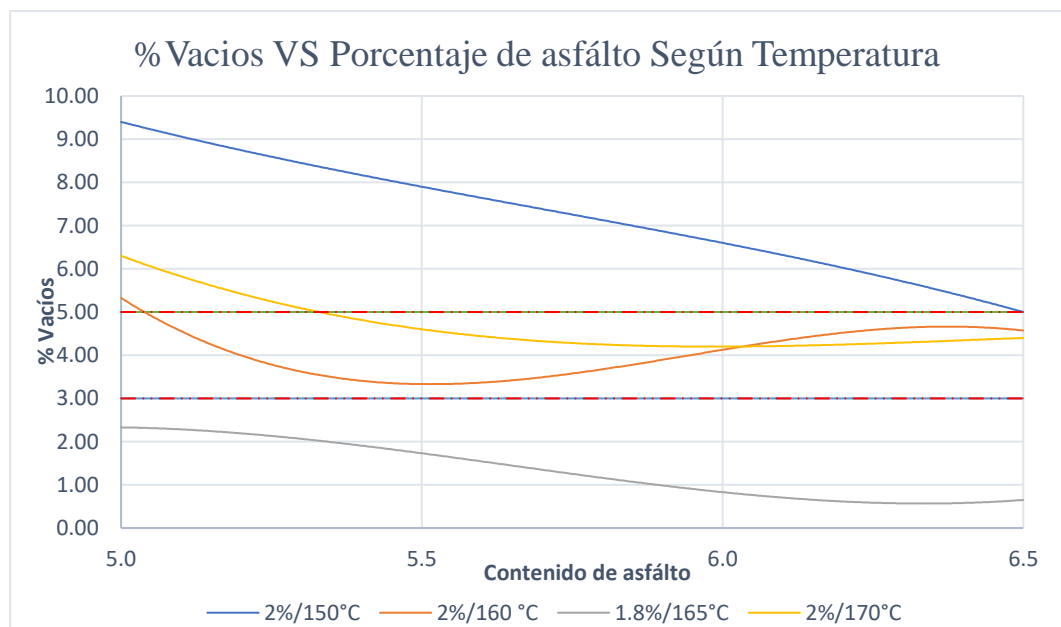


Figura 38: Porcentaje de vacíos vs Porcentaje de asfalto según temperatura con 2% de caucho
Fuente: Elaboración Propia

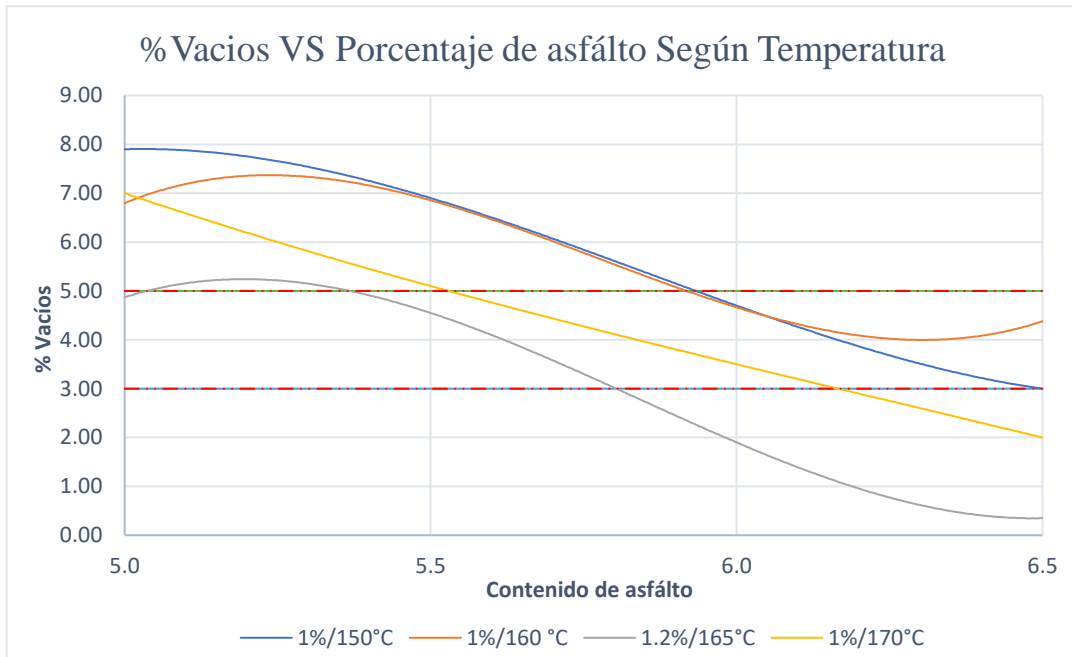
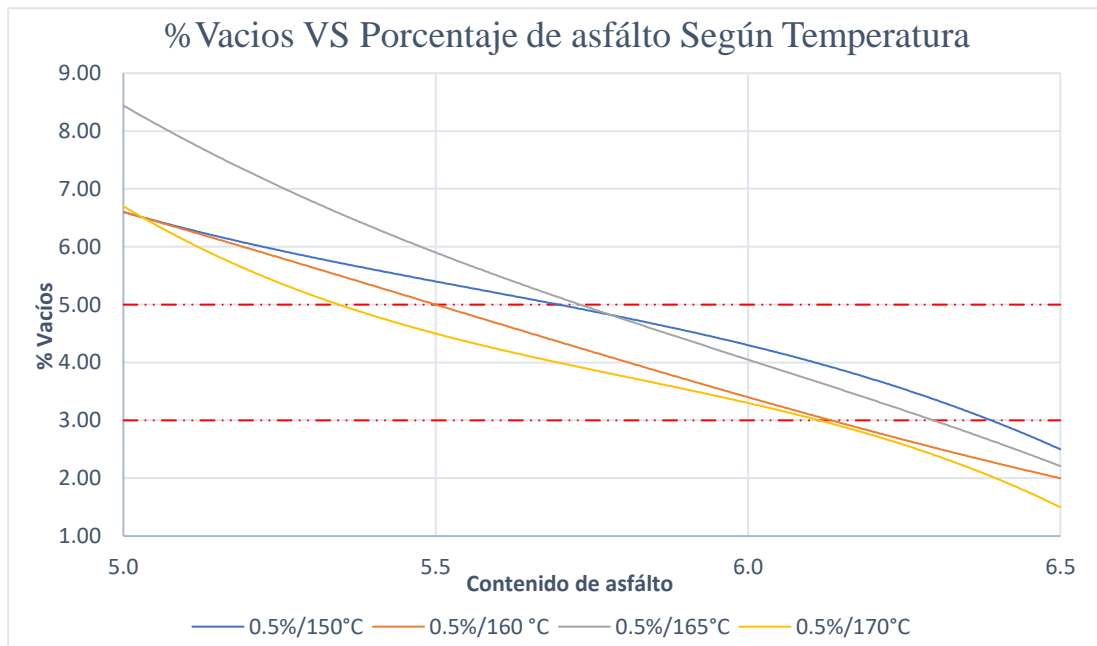


Figura 39: Porcentaje de vacíos vs Porcentaje de asfalto según temperatura con 1% de caucho
Fuente: Elaboración Propia



Fuente: Elaboración Propia
Figura 40: Porcentaje de vacíos vs Porcentaje de asfalto según temperatura con 0.5% de caucho

Por lo tanto, teniendo la afirmación anterior y debido a que si se encuentra un alto valor del porcentaje de vacíos daría efecto a una mayor permeabilidad, y por ende una baja durabilidad a la mezcla modificada, se destacaría la figura 37, en el cual se muestra un cambio de temperatura para la dosificación de 0.5% de caucho, del cual se resalta que hay un

mejor resultado para una temperatura de 170°C en un tiempo de 2hrs de digestión y un rango de 5.5% a 6.0% de asfalto, dado a que no es muy favorable tener una dosificación muy alta de asfalto, ni tampoco tener valores considerablemente bajos. Así mismo, solo para una temperatura de 170°C se encuentran resultados de porcentaje de vacíos por debajo de una dosificación de 5.5% de asfalto.

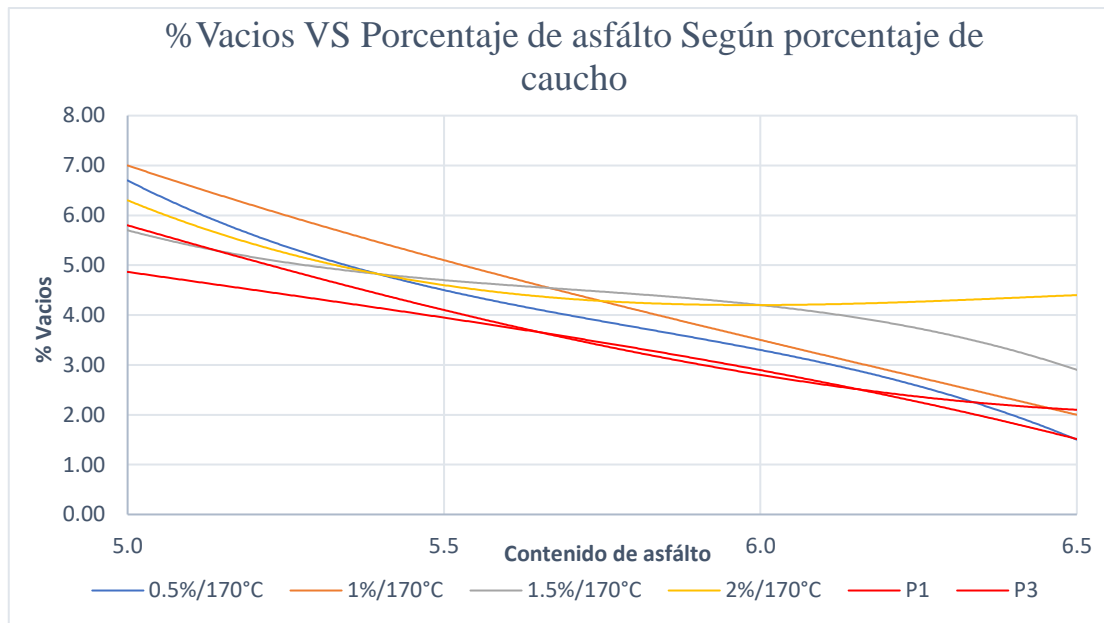


Figura 41: Porcentaje de vacíos vs Porcentaje de asfalto según porcentaje de caucho a 170°C

Fuente: Elaboración Propia

En suma, de la figura 38 se puede añadir que los resultados para una dosificación de 0.5% de caucho y una temperatura de digestión de 170°C muestran valores que son superiores al de las mezclas patrón (convencionales 0.0% caucho) sin estar considerablemente elevados, como se da el caso del resto de incorporación de caucho. Por lo que esto indicaría que los valores favorables para tener un resultado óptimo de vacíos se encuentran dentro de un 0.5% de caucho a una temperatura de 170°C en un tiempo de 2hrs para su digestión, no obstante, esta dosificación solo se podría incrementar cerca de un 2% debido a que también muestra valores favorables, pero contando con la misma temperatura de digestión, y de ser el caso, se daría únicamente al considerar los beneficios que esto causa dentro de otros parámetros Marshall, ya que con un 0.5% caucho ya se obtiene resultados óptimos.

6.1.2. Análisis correlacional del grado de temperatura, el porcentaje de caucho y contenido de asfalto con respecto a la Densidad de las mezclas modificadas.

Tabla 48: Densidad resultante de la modificación de las mezclas asfálticas con caucho obtenidos de las Investigaciones UCV TARAPOTO 2019, UCV CHIMBOTE 2019, URP MAESTRIA 2019, TESIS ECUADOR 2016, URP MAESTRIA 2017, UCV LIMA 2018 I y UCV LIMA 2018.

Mezcla	Porcentaje de Asfalto (%)					
	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	
Patrón 0%	P1	2.355	2.391	2.387	2.384	
	P2	2.392	2.410	2.435	2.446	2.441
	P3	2.443	2.451	2.462	2.475	-
150°C						
0.25%	-	-	-	-	-	
0.50%	2.322	2.345	2.354	2.378	-	
0.75%	-	-	-	-	-	
1.00%	2.276	2.285	2.337	2.357	-	
1.50%	2.258	2.268	2.304	2.276	-	
2.00%	2.228	2.246	2.262	2.284	-	
160°C						
0.25%	-	-	-	-	-	
0.50%	2.323	2.335	2.363	2.377	-	
0.75%	-	-	-	-	-	
1.00%	2.138	2.140	2.150	2.153	2.154	
2.00%	2.172	2.195	2.181	2.211	2.206	
3.00%	2.153	2.114	2.176	2.144	2.189	
165°C						
0.50%	2.236	2.312	2.313	2.355	-	
1.20%	2.263	2.286	2.305	2.341	-	
1.80%	2.324	2.354	2.331	2.334	-	
170°C						
0.25%	-	-	-	-	-	
0.50%	2.317	2.360	2.366	2.390	-	
0.75%	-	-	-	-	-	
1.00%	2.302	2.341	2.357	2.371	2.295	
1.50%	2.323	2.327	2.334	2.346	-	
2.00%	2.293	2.319	2.320	2.305	2.215	
3.00%	-	-	-	-	2.317	

Fuente: Elaboración Propia

El parámetro de densidad ensayada en un laboratorio para las mezclas asfálticas es sumamente importante, dado a que es esencial optar por un valor alto, que luego se convertirá en la densidad patrón, y será usada como referencia para conocer si es adecuada la densidad del pavimento

terminado. Por lo cual dentro de los resultados de la Tabla 48 para la densidad de las mezclas asfálticas se tiene un valor resaltante de 2.390 kg/m³, la cual corresponde para la temperatura de 170°C con un tiempo de 2hrs de digestión y una incorporación de 0.5% de caucho, del mismo se observa que al añadir mayor porcentaje por parte de caucho el valor para la densidad disminuye, probablemente esto se deba a que el volumen total de la mezcla aumenta al incorporar mayor porcentaje de caucho.

Así mismo, para las temperaturas de 150°C a 160°C el mayor valor encontrado para la densidad se encuentra en una dosificación de 0.5% por parte del caucho, para mayor detalle se muestra la figura 39 y 40 donde a su vez se observa una comparación con las mezclas asfálticas patrón (convencionales 0% caucho) del cual se resalta que no hay una diferencia considerable, no obstante la más cercana a los resultados de la mezcla patrón son las que poseen 0.5% de incorporación de caucho independiente de la temperatura de digestión a la cual fue sometido, partiendo de estas afirmaciones se procede a obtener el valor óptimo de temperatura.

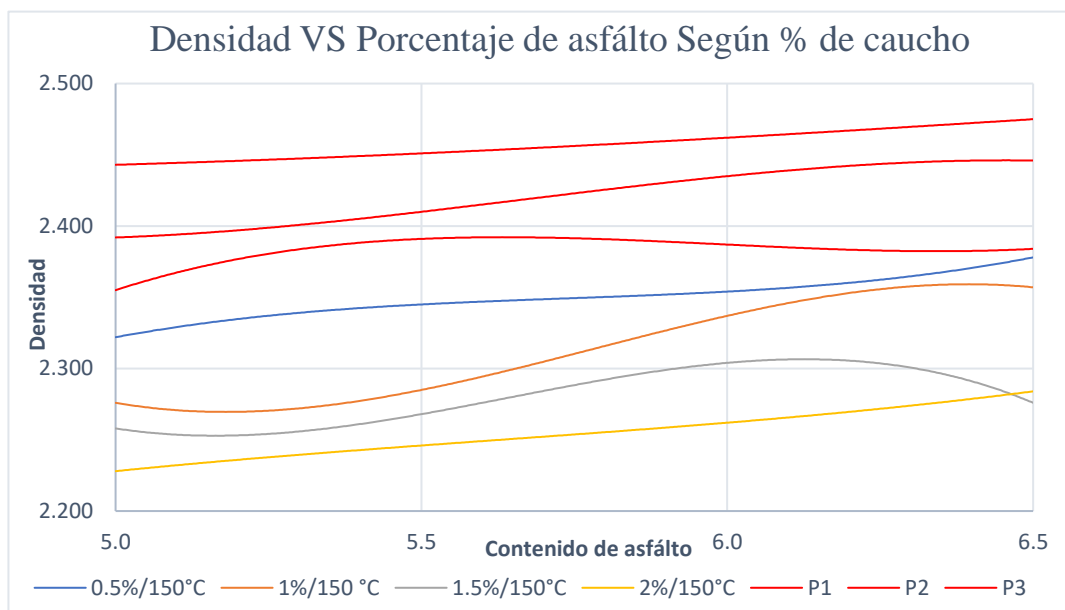


Figura 42: Densidad vs Porcentaje de asfalto según porcentaje de caucho a 150

Fuente: Elaboración Propia

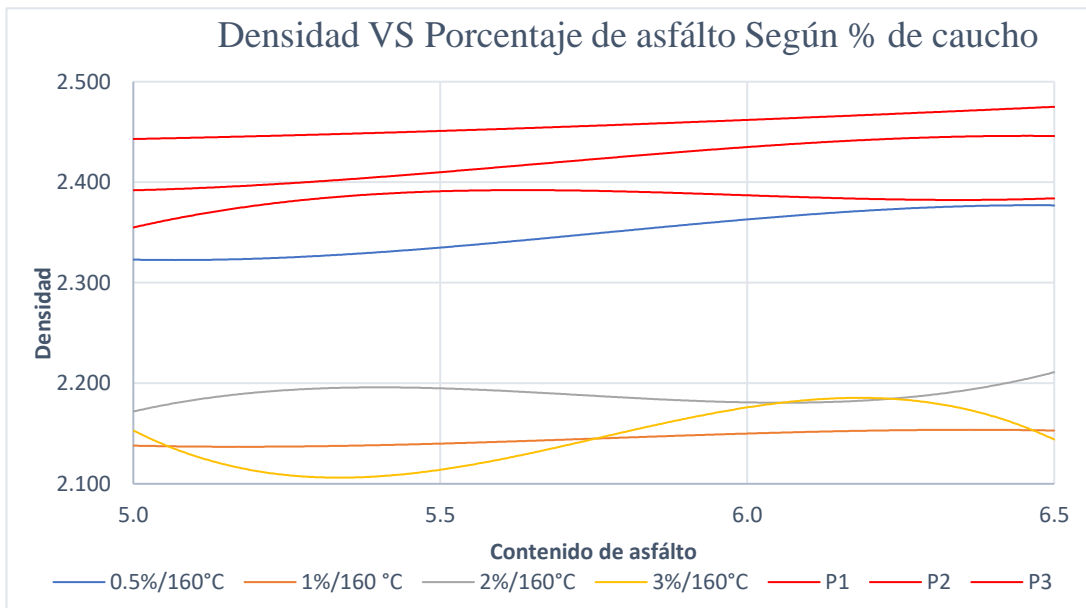


Figura 43: Densidad vs Porcentaje de asfalto según porcentaje de caucho a 160 °C

Fuente: Elaboración Propia

De la figura 41 se observa que para un porcentaje de 0.5% de caucho se tiene un mayor valor para la densidad en el rango de 5.0% a 6.5% de asfalto y con una temperatura de 170°C, reafirmando lo descrito anteriormente, así mismo, los resultados no tienen una relación directamente proporcional a la temperatura dado a que sucede en el rango de 5.5% a 6.0% de asfalto, esto probablemente se deba a una inadecuada digestión.

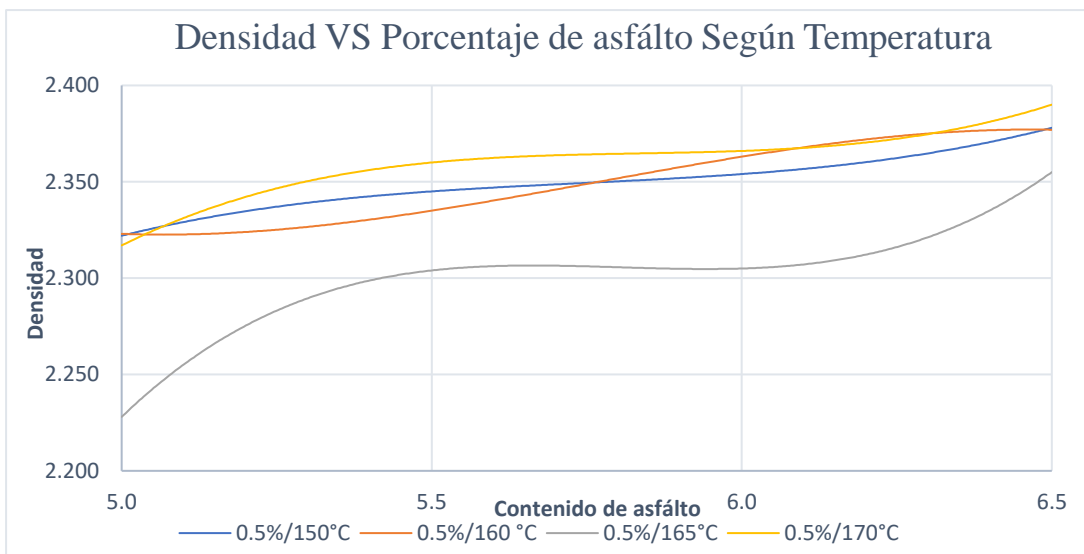


Figura 44: Densidad vs Porcentaje de asfalto según temperatura con 0.5% de caucho

Fuente: Elaboración Propia

Por último, de la figura 42 y 43 se visualiza los resultados de la densidad para las mezclas asfálticas con caucho a una temperatura de 170°C en un tiempo de 2hrs para su digestión respecto de las mezclas asfálticas patrón (convencionales 0.0% caucho). Se observa que no existe una diferencia significativa en el rango de 5.5% a 6.0% de asfalto para cada dosificación de caucho. Lo que conlleva a que el óptimo contenido de asfalto se encuentra en este rango.

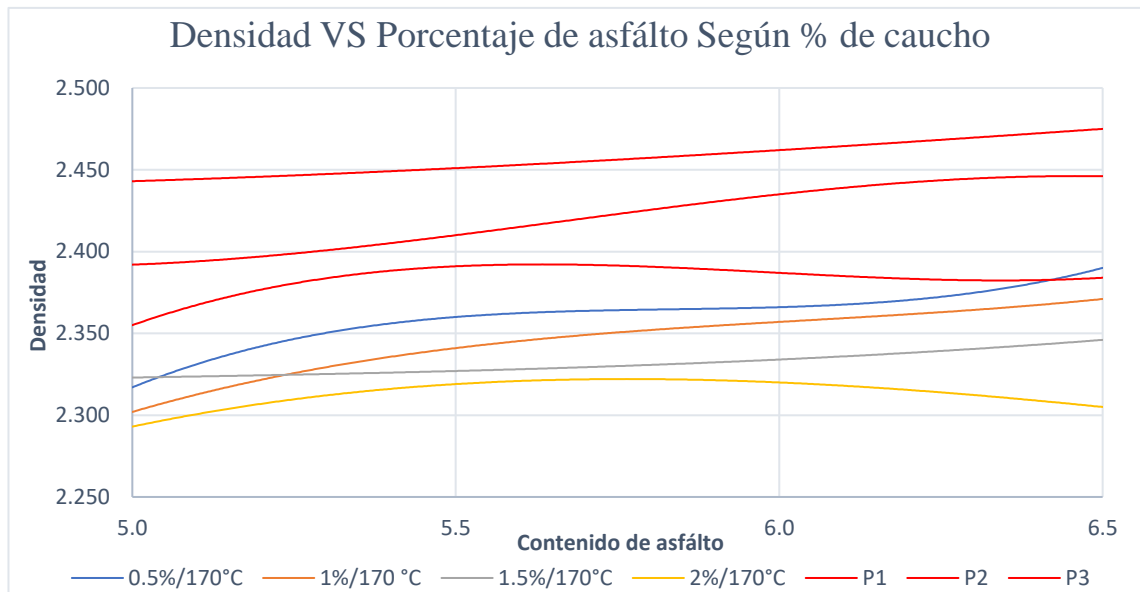


Figura 45: Densidad vs Porcentaje de asfalto según porcentaje de caucho a 170 °C

Fuente: Elaboración Propia

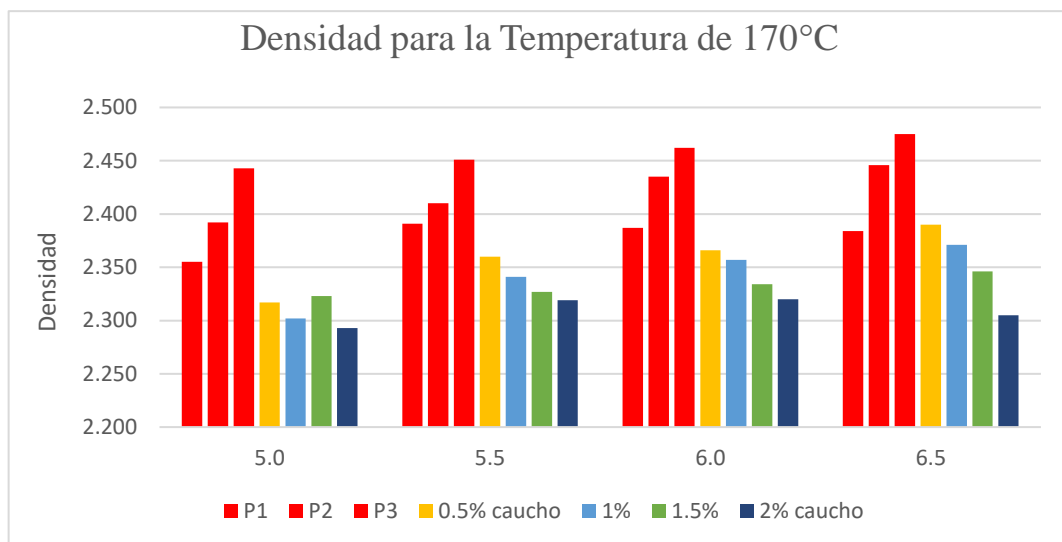


Figura 46: Densidad vs Porcentaje de asfalto según porcentaje de caucho a 170 °C

Fuente: Elaboración Propia

6.1.3. Análisis correlacional del grado de temperatura, el porcentaje de caucho y contenido de asfalto con respecto a los VMA de las mezclas modificadas.

Tabla 49: Porcentaje de VMA resultante de la modificación de las mezclas asfálticas con caucho obtenidos de las Investigaciones UCV TARAPOTO 2019, UCV CHIMBOTE 2019, URP MAESTRIA 2019, TESIS ECUADOR 2016, URP MAESTRIA 2017, UCV LIMA 2018 I y UCV LIMA 2018.

Mezcla	Porcentaje de Asfalto (%)					
	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	
Patrón 0%	P1	15.90	15.10	15.70	16.20	19.85
	P2	17.30	17.10	16.70	16.75	17.40
	P3	16.68	16.87	17.04	17.09	-
150°C						
0.25%	-	-	-	-	-	
0.50%	17.10	16.70	16.00	16.40	-	
0.75%	-	-	-	-	-	
1.00%	18.00	18.80	17.50	17.20	-	
1.50%	19.40	19.40	18.60	20.00	-	
2.00%	20.40	20.20	20.10	19.70	-	
160°C						
0.25%	-	-	-	-	-	
0.50%	17.10	17.10	16.50	16.50	-	
0.75%	-	-	-	-	-	
1.00%	13.60	14.00	14.04	14.36	14.80	
2.00%	12.24	11.29	10.88	12.07	12.74	
3.00%	12.94	15.04	13.00	14.72	13.41	
165°C						
0.50%	27.20	25.10	25.50	24.40	-	
1.20%	24.40	24.00	23.80	23.00	-	
1.80%	22.40	21.80	23.00	23.20	-	
170°C						
0.25%	-	-	-	-	-	
0.50%	17.30	16.20	16.40	16.00	-	
0.75%	-	-	-	-	-	
1.00%	17.80	16.90	16.70	16.70	19.85	
1.50%	17.10	17.40	17.50	17.60	-	
2.00%	18.10	17.60	18.00	19.00	22.73	
3.00%	-	-	-	-	19.84	

Fuente: Elaboración Propia

Considerando que el parámetro vacío de agregado mineral depende de la forma y granulometría de agregados, como también del contenido de asfalto. Y que dentro del diseño Marshall especifica que el resultado mínimo para este parámetro debe ser de 14%. Por lo tanto, partiendo de

esto, en la Tabla 49 a primera instancia se descarta la parte que este enmarcada en azul, dado que estas no cumplen con la especificación de diseño Marshall. Así mismo, el resto de los valores de VMA superan el mínimo e incluso hay resultados que lo superan de manera exorbitante, no obstante, estos valores altos también de descartan dado que afectarían al desempeño de la mezcla. Por lo cual, únicamente se consideran los valores a una temperatura de 150°C con dosificaciones de 0.5% a 1.5% de caucho, a una temperatura de 160°C con dosificaciones de 0.5% a 1% de caucho y a una temperatura de 170°C con dosificaciones de 0.5% a 2% de caucho, para presentar la figura 44, 45 y 46.

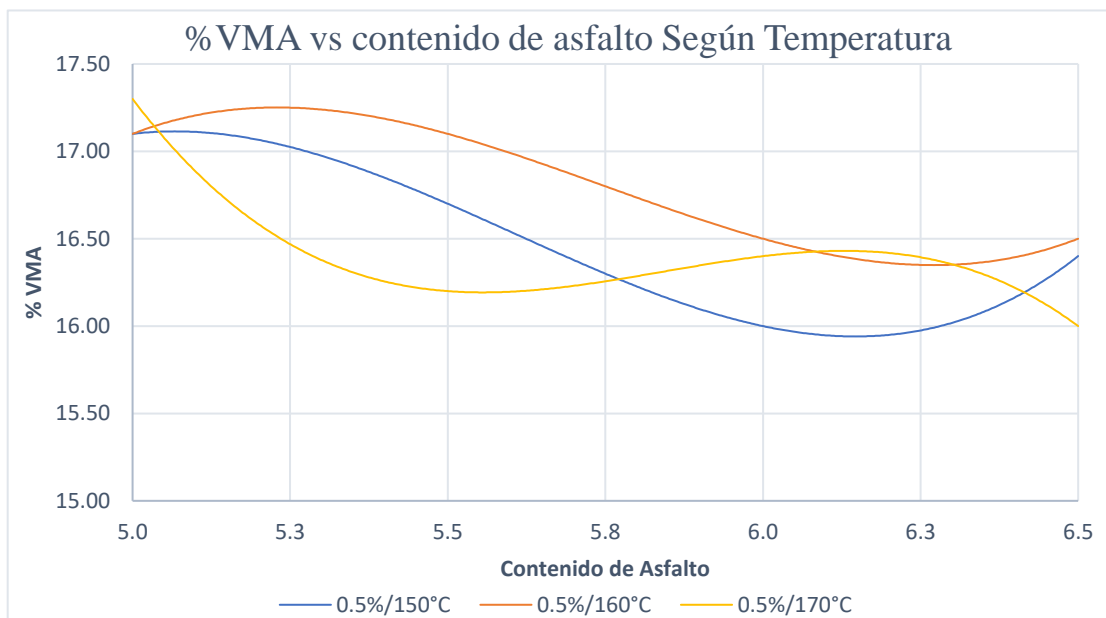


Figura 47: VMA vs Porcentaje de asfalto según temperatura con 0.5% de caucho

Fuente: Elaboración Propia

De la figura 44, se observa que para una dosificación del 0.5% de caucho se consiguen valores que superan el mínimo establecido y a su vez estos resultados no son considerablemente altos, sin llegar a superar los 17.3%.

Así mismo, de la figura 45 se detalla un comportamiento similar de la tendencia de resultados tanto para las temperaturas de 170°C y 150°C a diferencia de los resultados para una temperatura de 160°C, las tres con una dosificación del 1% de caucho. Esto se debe a que la incorporación de caucho tiene una relación inversamente proporcional a los resultados de

VMA al estar a una temperatura de 160°C de digestión, a diferencia de las otras temperaturas que ocurre lo contrario en cuanto a sus resultados.

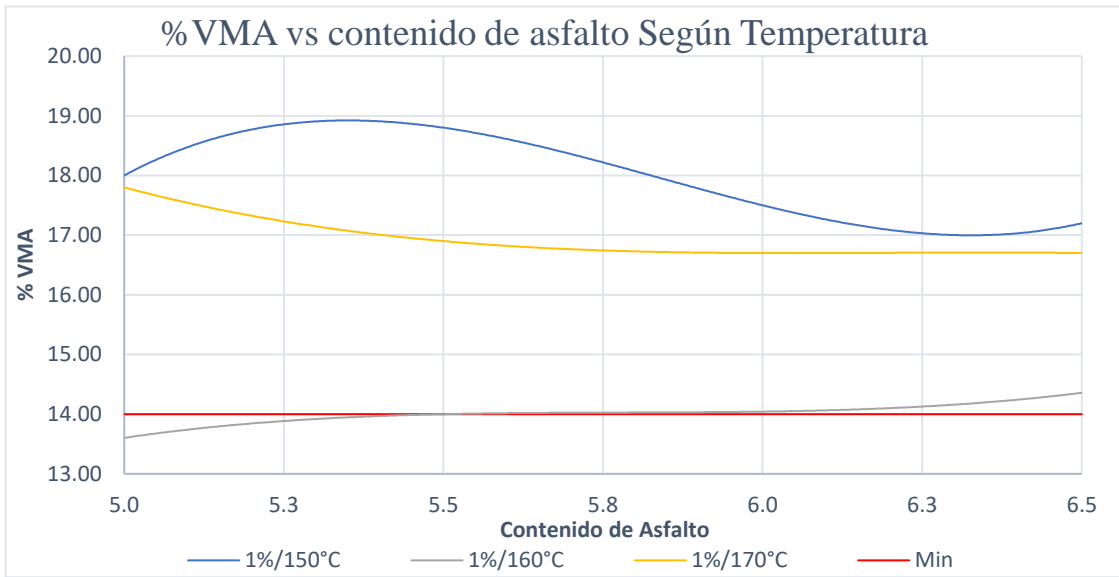


Figura 48: VMA vs Porcentaje de asfalto según temperatura con 1% de caucho

Fuente: Elaboración Propia

De la figura 46 observamos que respetando lo afirmado anteriormente, únicamente nos queda para una dosificación del 2% los resultados que compete a una temperatura de 170°C de digestión.

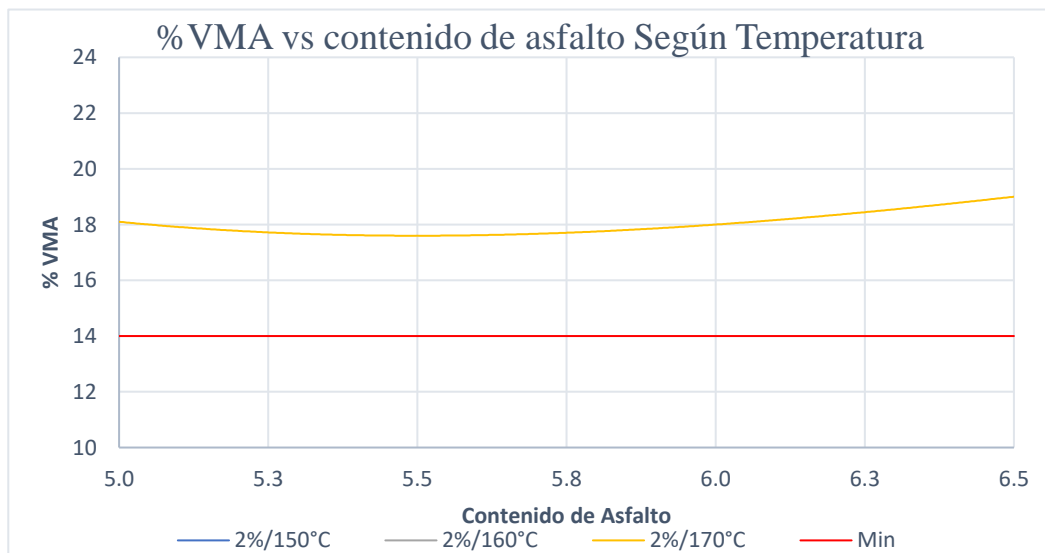


Figura 49: VMA vs Porcentaje de asfalto según temperatura con 2% de caucho

Fuente: Elaboración Propia

Por lo tanto, dentro de lo descrito anteriormente, se estaría dando que los beneficios óptimos para los resultados de VMA se encontrarían dentro de una temperatura de 170°C de digestión para la incorporación de caucho.

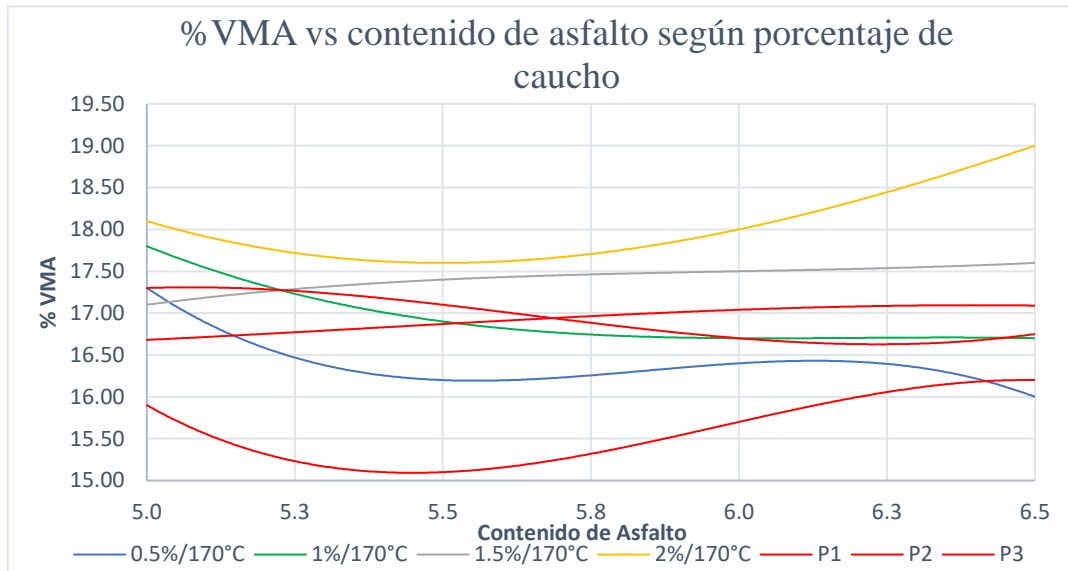


Figura 50: VMA vs Porcentaje de asfalto según porcentaje de caucho a 170 °C

Fuente: Elaboración Propia

No obstante, dentro de la gráfica 47 para la temperatura de 170°C se observó que los resultados cercanos al óptimo, tomando en cuenta que estos no seas considerablemente altos y superiores al mínimo establecido, están para la dosificación de 0.5% a 1.5% de caucho, como también lo están las mezclas asfálticas patrón (convencionales 0.0% caucho), sin embargo, se puede considerar una dosificación de 2% de caucho solo en caso de traer consigo beneficios dentro de otros parámetros Marshall, ya que con 0.5% de incorporación de caucho ya se obtienen resultados óptimos.

6.1.4. Análisis correlacional del grado de temperatura, el porcentaje de caucho y contenido de asfalto con respecto a la Estabilidad de las mezclas modificadas.

Tabla 50: Estabilidad resultante de la modificación de las mezclas asfálticas con caucho obtenidos de las Investigaciones UCV TARAPOTO 2019, UCV CHIMBOTE 2019, URP MAESTRIA 2019, TESIS ECUADOR 2016, URP MAESTRIA 2017, UCV LIMA 2018 I y UCV LIMA 2018.

Mezcla	Porcentaje de Asfalto (%)					
	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	
Patrón 0%	P1	1259.0	1360	1356.0	1311.00	-
	P2	1234.1	1261	1242.2	1229.75	1200.6
	P3	1378.0	1416	1339.7	1233.90	-
150°C						
0.25%	-	-	-	-	-	
0.50%	1604.0	1776.0	1676.0	1556.0	-	
0.75%	-	-	-	-	-	
1.00%	1383.0	1495.0	1609.0	1645.0	-	
1.50%	1337.0	1407.0	1644.0	1695.0	-	
2.00%	1208.0	1242.0	1280.0	1249.0	-	
160°C						
0.25%	-	-	-	-	-	
0.50%	1868.0	1927.0	2039.0	1854.0	-	
0.75%	-	-	-	-	-	
1.00%	1981.0	2054.7	2179.6	2094.3	2238.34	
2.00%	1154.2	1402.3	939.8	1445.2	1682.51	
3.00%	917.4	1210.9	908.7	987.9	1365.99	
165°C						
0.50%	1665.0	1669.0	1298.0	1319.0	-	
1.20%	1827.0	1596.0	1570.0	1554.0	-	
1.80%	1851.0	2085.0	2004.0	1676.0	-	
170°C						
0.25%	-	-	-	-	-	
0.50%	2065.0	2178.0	2164.0	2044.0	-	
0.75%	-	-	-	-	-	
1.00%	1768.0	1889.0	1927.0	1898.0	875.10	
1.50%	1634.0	1806.0	1794.0	1618.0	-	
2.00%	1406.0	1443.0	1461.0	1449.0	894.400	
3.00%	-	-	-	-	897.400	

Fuente: Elaboración Propia

El parámetro de estabilidad es sumamente importante de detallar, caracterizar y obtener resultados óptimos, dado a que una mezcla estable tiene la capacidad de mantener su forma y continuar homogéneo a pesar

de la ocurrencia de las cargas repetitivas, estos valores óptimos están comprendidos entre un valor mínimo establecido por Marshall y un valor que no sea considerablemente alto respecto a este mínimo, de lo contrario se tendrá mayor rigidez para el pavimento. Partiendo de estas premisas, se observó de la tabla 50 que a mayor dosificación de caucho los resultados para la estabilidad van disminuyendo, por lo cual tienen una relación inversamente proporcional, este caso se da para todas las temperaturas de digestión, por lo tanto, se entiende que a una dosificación de 0.5% de caucho se tendrá mayores resultados para la estabilidad de las mezclas, así mismo, se resalta que todo los resultados comprendidos en la Tabla superan el mínimo establecido por el diseño Marshall. Por otro lado, para la temperatura de 150°C, la más baja entre todas, se encuentra el menor resultados de estabilidad para 0.5% de caucho entre el resto de las temperaturas a la misma dosificación, cercano a estos resultados se encuentran los que fueron realizados a una temperatura de 165°C, tal como se muestra en la figura 48.

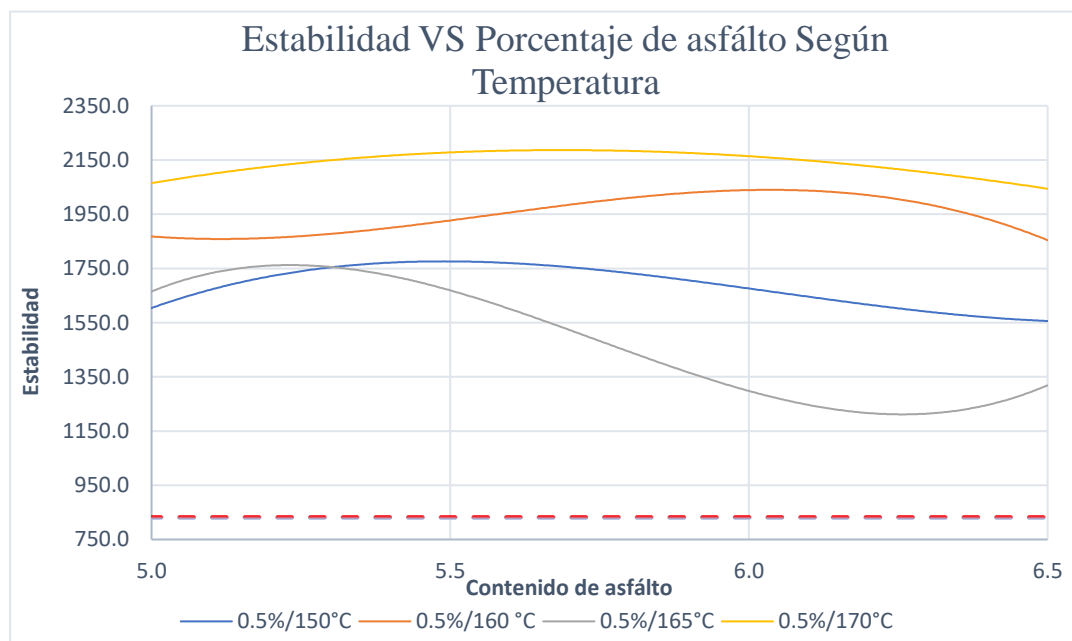


Figura 51: Estabilidad vs Porcentaje de asfalto según temperatura con 0.5% de caucho

Fuente: Elaboración Propia

Así mismo, de la figura 49 que comprende los mayores resultados para la estabilidad, la que resalta es la de 170°C, y cercano a estos resultados se encuentran los que fueron realizados a una temperatura de 160°C

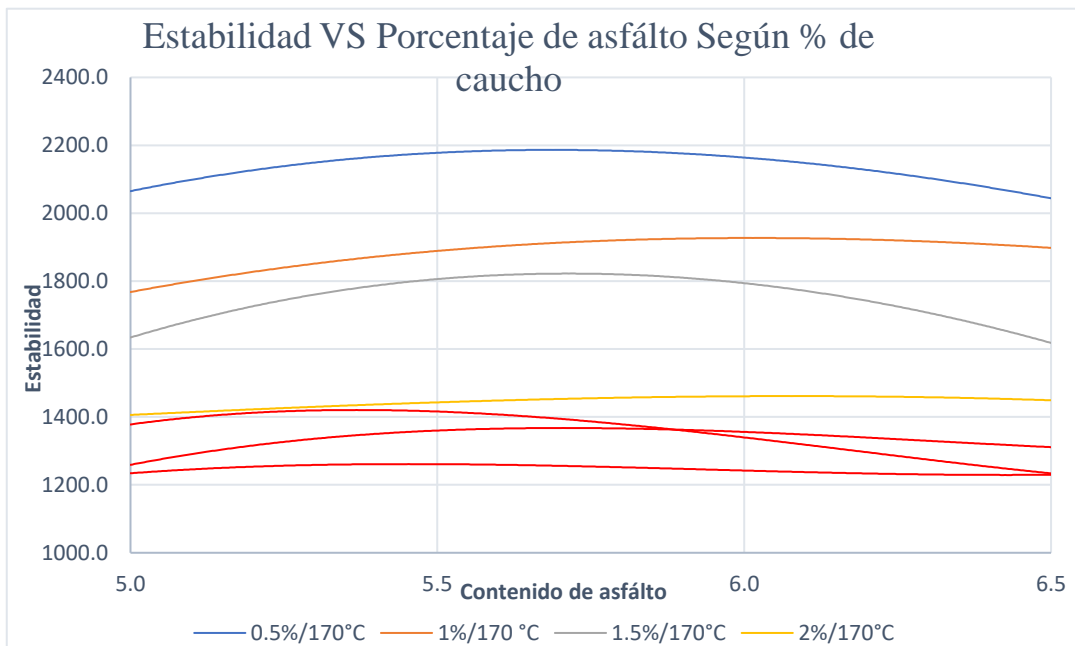


Figura 52: Estabilidad vs Porcentaje de asfalto según porcentaje de caucho a 170 °C

Fuente: Elaboración Propia

Por tanto, el mayor valor de estabilidad resulta para la temperatura de 170°C, con una dosificación de 0.5% de caucho y un 5.5% de asfalto. Nos obstante si se requiere incrementar el valor de la estabilidad debido al factor de tráfico, se puede optar por una incorporación de 1.0% a 1.5% de caucho, tal como se muestra en la figura 50, donde los valores de estabilidad para estas dosificaciones de caucho tienden a incrementar al aumentar la dosificación de asfalto

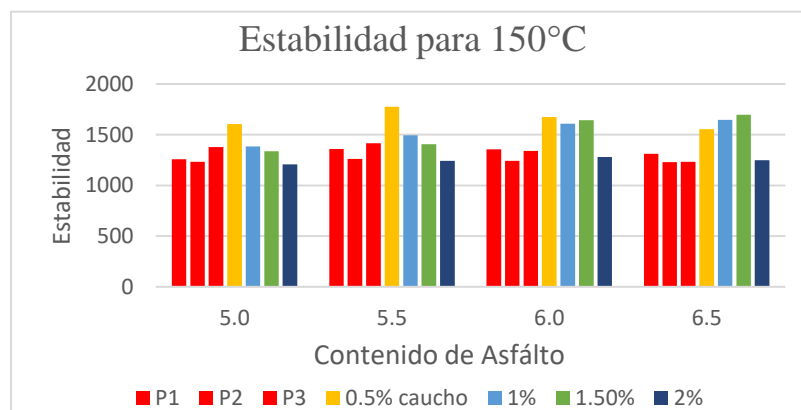


Figura 53: Estabilidad vs Porcentaje de asfalto según porcentaje de caucho a 150 °C

Fuente: Elaboración Propia

6.1.5. Análisis correlacional del grado de temperatura, el porcentaje de caucho y contenido de asfalto con respecto al Flujo de las mezclas modificadas.

Tabla 51: Flujo resultante de la modificación de las mezclas asfálticas con caucho obtenidos de las Investigaciones UCV TARAPOTO 2019, UCV CHIMBOTE 2019, URP MAESTRIA 2019, TESIS ECUADOR 2016, URP MAESTRIA 2017, UCV LIMA 2018 I y UCV LIMA 2018.

Mezcla	Porcentaje de Asfalto (%)					
	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	
Patrón 0%	P1	3.048	3.378	3.479		
	P2	2.860	3.100	3.560	3.748	3.94
	P3	3.400	4.030	4.830	4.500	-
150°C						
0.25%	-	-	-	-	-	
0.50%	3.886	4.140	4.318	4.750	-	
0.75%	-	-	-	-	-	
1.00%	4.064	4.496	4.572	4.902	-	
1.50%	4.242	4.394	5.004	5.080	-	
2.00%	4.572	4.394	4.394	5.258	-	
160°C						
0.25%	-	-	-	-	-	
0.50%	2.718	3.302	3.480	4.242	-	
0.75%	-	-	-	-	-	
1.00%	1.595	1.755	2.035	2.532	2.695	
2.00%	2.113	2.494	2.865	4.503	4.183	
3.00%	2.870	4.343	3.221	3.790	4.082	
165°C						
0.50%	6.900	6.400	7.130	6.870	-	
1.20%	5.330	5.830	6.600	8.000	-	
1.80%	5.470	6.670	8.000	6.500	-	
170°C						
0.25%	-	-	-	-	-	
0.50%	3.302	3.480	3.988	4.496	-	
0.75%	-	-	-	-	-	
1.00%	3.632	3.810	4.140	4.648	4.240	
1.50%	3.734	4.140	4.648	4.826	-	
2.00%	4.064	4.496	4.826	5.004	4.220	
3.00%	-	-	-	-	4.240	

Fuente: Elaboración Propia

El parámetro flujo debe estar debidamente seleccionada al momento de considerarlo, dado a que estos resultados de flujo son los valores de deformación máxima y mínima que debe poseer una mezcla asfáltica, dicho rango establecidos por el diseño Marshall. De tal modo que dentro de la tabla 51 se observan valores que no son considerablemente altos

respecto al máximo, ni tampoco valores demasiado mínimos, dichos valores son enmarca en azul, no obstante hay valores igual de inferiores al mínimo y superiores al máximo fuera de esto, pero se resalta debido a que no sigue un comportamiento normal, dado a que al tener una temperatura menor a 160°C o superior 165°C, si hay un comportamiento ordenado de las resultantes para el flujo. Así mismo, no se toma en cuenta los resultados obtenidos a una temperatura de 165°C por superar el rango establecido por el diseño Marshall.

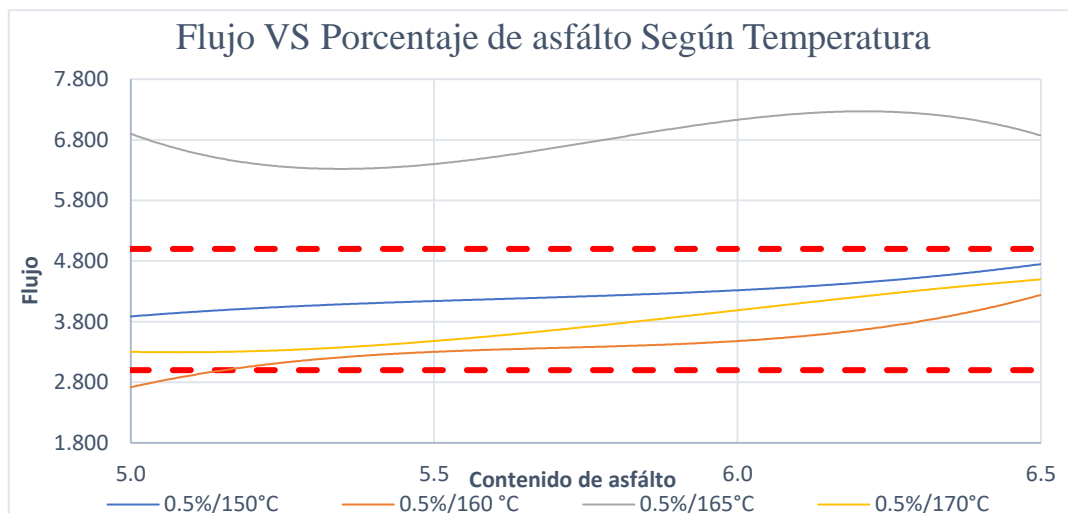


Figura 54: Flujo vs Porcentaje de asfalto según temperatura con 0.5% de caucho

Fuente: Elaboración Propia

De la figura 51 es importante detallar que los valores de flujo para una dosificación del 0.5% de caucho con una temperatura de 150°C y 170°C se encuentran dentro del rango establecido, y a su vez para el rango de 5.0% a 6.5% de asfalto, no obstante, para la temperatura de 160°C se llega a tener resultados dentro del rango a partir de un 5.2% de asfalto en la mezcla. Así mismo, para la figura 52 se muestra que para una incorporación de 1% de caucho para 150° y 170°C de temperatura, aún siguen teniendo resultados dentro del rango establecido por el diseño Marshall y para todos los valores de asfalto, más esto no se cumple para la temperatura de 160°C.

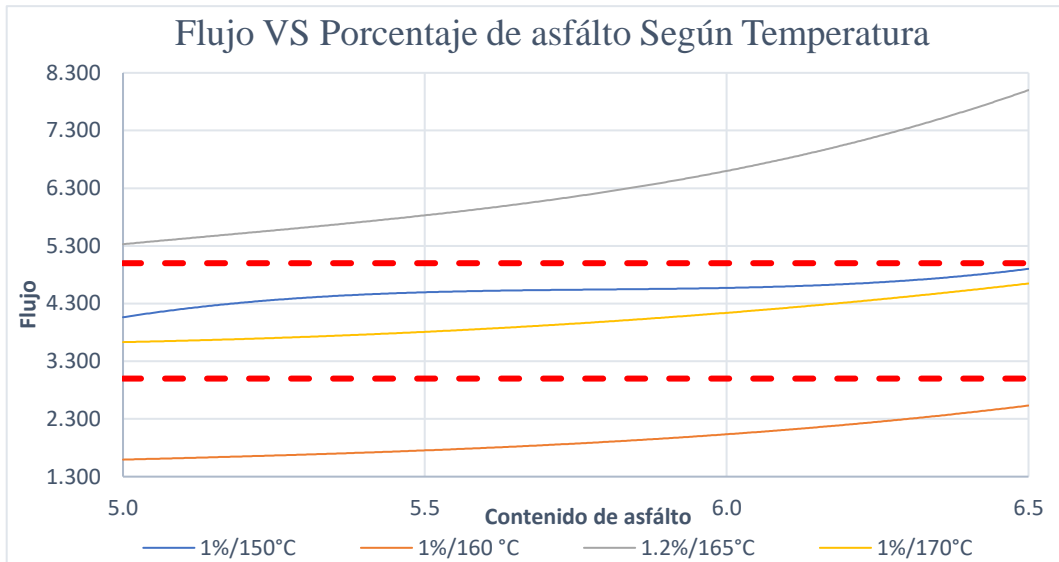


Figura 55: Flujo vs Porcentaje de asfalto según temperatura con 1% de caucho
Fuente: Elaboración Propia

Sin embargo, para estos casos de 150°C y 170°C de temperatura en la digestión, la que menor valor de flujo en cuanto a los resultados lo posee la temperatura de 170°C, tanto para una dosificación de 0.5% y 1.0% de caucho. Por lo tanto, se tiene que los valores óptimos para el flujo se encuentran a una temperatura de 170°C, y dentro de estas el menor valor a optar para el flujo se encuentra a una dosificación del 0.5%. debido que a menor valor del flujo representa a una menor deformación de la mezcla.

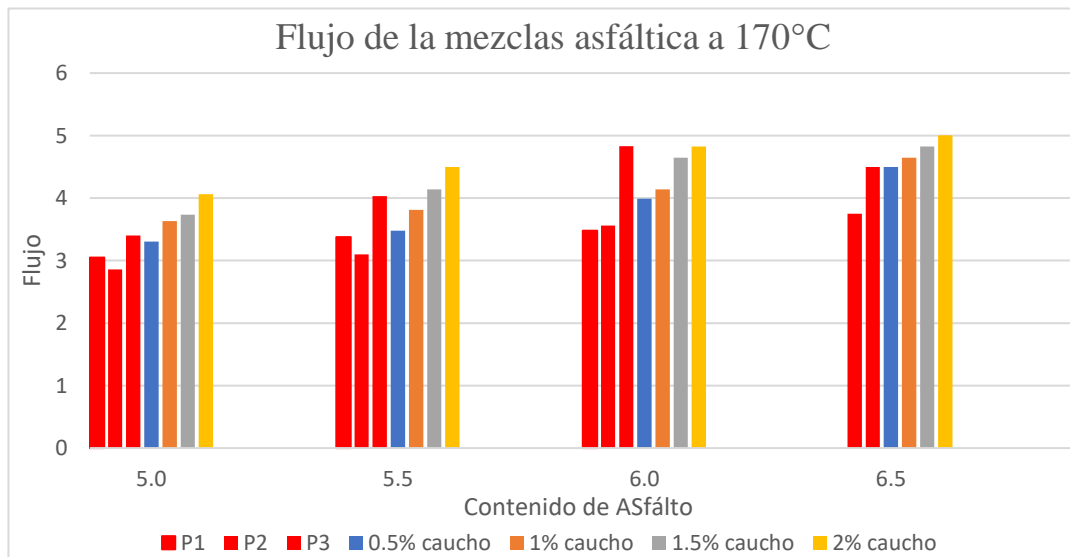


Figura 56: Flujo vs Porcentaje de asfalto según porcentaje de caucho a 170 °C
Fuente: Elaboración Propia

6.2. Síntesis del análisis correlacional de la data resultante

De lo estudiado dentro de la parte 6.1, del cual se detalla y observa todo el análisis correlacional de los parámetros Marshall para un diseño de mezcla a través de la incorporación de caucho a ciertas temperaturas de digestión con un único tiempo de 2hrs en todos los casos, se destaca que, para un 0.5% de caucho y una temperatura de 170°C nos resulta un valor de porcentaje de vacíos que se encuentra dentro del rango establecido, no obstante, esto únicamente ocurre para una dosificación del 5.5% al 6.0% de asfalto, si la temperatura tiende a bajar estos resultados se incrementan llegando a un punto de superar lo especificado. Así mismo, si la dosificación de caucho aumenta dentro de esta temperatura, se obtendrán resultados cercanos al límite máximo. Ahora, dentro del parámetro de densidad se destacó que para un 0.5% de caucho a una temperatura de 170°C se obtiene el valor más alto respecto a las otras dosificaciones y temperaturas de digestión. Para el caso del VMA, solo con la dosificación del 0.5% de caucho en todo el rango de temperaturas se cumplen las especificaciones de Marshall, siendo el de 170°C el que tiene resultados no dispersos. Por otra parte, ocurriendo del mismo modo al tener un 0.5% de caucho con una temperatura de 170°C se obtiene una mayor estabilidad, a lo largo de una dosificación de 5.0% a 6.5% de asfalto. Por último, dentro del parámetro de fluidez se encuentra que tanto para una temperatura de 150°C y 170°C los resultados se encuentran dentro del rango especificado por el diseño Marshall, esto únicamente para una dosificación del 0.5% y 1.0% de caucho.

En resumidas cuentas, para lograr un óptimo diseño Marshall para mezclas asfálticas modificadas con caucho, la dosificación recomendada debe ser de 0.5% de caucho a una temperatura de 170°C con un tiempo de 2hrs de digestión, usando un contenido de asfalto que no baje del 5.5%, ni supere el 6.0%. Sin embargo, estos contenidos de asfalto pueden variar según las especificaciones lo requieran, para destacar un parámetro en particular, del mismo modo para la dosificación del caucho, mas no debe haber una variación por parte de la temperatura ni el tiempo de digestión.

Por lo tanto, se tiene como resultado de nuestro análisis la Tabla 52, la cual servirá como referencia para relacionar el uso de porcentaje de caucho acorde a un rango de contenido de asfalto para conseguir resultados de cada parámetro que se encuentren dentro de lo especificado por el diseño Marshall.

Tabla 52: Porcentaje de cemento asfáltico utilizados para cumplir los parámetros Marshall

Mezclas 170°C / 2hrs (Digestión)	Requerimientos de Parámetros Marshall		Porcentaje de cemento asfáltico para cumplir las especificaciones de parámetros Marshall			
			Caucho			
	Mínimo	Máximo	0.50%	1.00%	1.50%	2.00%
1. Densidad	-	-	5.5 - 6.0	5.5 - 6.0	5.5 - 6.5	5.5 - 6.0
2. Estabilidad (kg)	831	-	5.5 - 6.0	5.5 - 6.5	5.5 - 6.0	-
3. Flujo (mm)	3	5	5.0 - 6.5	5.0 - 6.5	5.0 - 6.0	5.0 - 6.0
4. Vacíos (%)	3	5	5.4 - 6.0	5.6 - 6.1	5.4 - 6.4	5.5 - 6.5
5. VAM (%)	14	-	5.0 - 6.5	5.0 - 6.5	5.0 - 6.5	5.0 - 6.5

Fuente: Elaboración Propia

6.3. Contrastación de Hipótesis General y Especificas

Contrastación de Hipótesis específica:

Para contrastar las hipótesis haremos uso de la distribución de probabilidad T Student para muestras relacionadas (prueba de una cola), debido a que los resultados que optaremos para este análisis estadística cumplen son ser muestras con una distribución normal, cada grupo no supera las 30 muestras, por lo cual vienen siendo relativamente pequeñas. Dentro de esta prueba se tiene 3 escenarios:

$$H_0: \mu_d = 0$$

$$H_0: \mu_d \leq 0$$

$$H_0: \mu_d \geq 0$$

$$H_1: \mu_d \neq 0$$

$$H_1: \mu_d > 0$$

$$H_1: \mu_d < 0$$

Bilateral

Uni. Derecha

Uni. Izquierda

Donde:

H_0 : Hipótesis Nula

H_1 : Hipótesis Alterna

De estos escenarios se tomarán dependiendo el caso hipotético optado por cada hipótesis específica, tanto si es Bilateral, Unilateral derecho o izquierdo.

Para conocer si se rechaza la hipótesis Nula (Ho) se tiene:

El estadístico de prueba “t”, que sigue una distribución con n – 1 grados de libertad.

$$t = \frac{\bar{d}}{S_d/\sqrt{n}}$$

Donde:

- d es la diferencia de promedios: $\bar{d} = \bar{X} - \mu$
- Sd es la desviación estándar de las diferencias
- N es el número de datos a usar ($n < 30$)

Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula (Ho) si:

$$t < -t_{(1-\frac{\alpha}{2}), (n-1)} \text{ o } t > t_{(1-\frac{\alpha}{2}), (n-1)} \text{ (BILATERAL)}$$

$$t > t_{(1-\alpha), (n-1)} \text{ (UNILATERAL DERECHA)}$$

$$t < t_{(1-\alpha), (n-1)} \text{ (UNILATERAL IZQUIERDA)}$$

Así mismo, para determinar el punto crítico según los grados de libertad en cada caso, se tendrá como referencia la tabla de distribución T de Student (área en una cola), y se hará uso del procesador de datos Excel (análisis de datos) para obtener el valor con mayor exactitud.

Tabla 53: Tabla de distribución T de Student

TABLA DE DISTRIBUCIÓN T DE STUDENT

TABLA DE LA DISTRIBUCIÓN T DE STUDENT						
GRADOS DE LIBERTAD	ÁREA EN UNA COLA					
	0.10	0.05	0.025	0.01	0.005	0.0005
	ÁREA EN DOS COLAS					
MSc. GABRIEL HEREDIA VILLARROEL						
	0.20	0.10	0.05	0.02	0.01	0.001
1	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657	636.619
2	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	31.599
3	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	12.924
4	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	8.610
5	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	6.869
6	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.959
7	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	5.408
8	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	5.041
9	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.781
10	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.587

Fuente: Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias; Ronald E.

Teniendo claro el uso de esta prueba, se procede hacer los análisis correspondientes para cada hipótesis específica.

- a) Primera hipótesis específica: “La incorporación de caucho a una dosificación del 5.5% de asfalto mediante el proceso de vía seca genera que la Densidad de la mezcla disminuya hasta un 5%, respecto de las mezclas asfálticas convencionales”

Para contrastar estadísticamente la primera hipótesis específica se hace uso de la base de datos del cual se va obteniendo el porcentaje que disminuye para la densidad en una mezcla asfáltica modificadas con un rango de dosificación 0.5% a 3% de caucho respecto al resultado de densidad de una mezcla asfáltica convencional.

Tabla 54: Porcentaje de disminución de la densidad según dosificación de caucho.

Caucho	Densidad
Dosificación	Disminuye (%)
0.50%	2.075
1.00%	2.863
1.20%	5.145
1.50%	3.444
1.80%	2.324
2.00%	3.776
3.00%	8.133

Fuente: Elaboración Propia

H_0 : Al incorporar granos de caucho dentro de una mezcla asfáltica convencional, la densidad de la mezcla no disminuye hasta un 5%.

H_1 : Al incorporar granos de caucho dentro de una mezcla asfáltica convencional, la densidad de la mezcla si disminuye hasta un 5%.

$$H_0: \mu_d \geq 5\%$$

$$H_1: \mu_d < 5\%$$

Teniendo como condición, que se cumpla:

$$t < t_{(1-\alpha), (n-1)} \text{ (UNILATERAL IZQUIERDA)}$$

Del cual se rechazaría la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis alterna (H_1)

Desarrollo de la Prueba:

Tabla 55: Datos iniciales para el desarrollo de prueba T de Student – 1era hipótesis.

Descripción	Símbolo	Resultado
Numero de datos	n	7.0
grado de Libertad	$gl = n - 1$	6.0
Significación	α	0.05

Fuente: Elaboración Propia

Haciendo uso del análisis de datos del software Excel, tenemos:

Tabla 56: Análisis del valor crítico con el software Excel.

P(T<=t) una cola	0.00124799
Valor crítico de t (una cola)	1.94318028
P(T<=t) dos colas	0.00249598
Valor crítico de t (dos colas)	2.44691185

Fuente: Elaboración Propia

Del cual haremos uso el valor critico t (una cola)

Cálculo del estadístico de prueba “t”

Tabla 57: Datos para el cálculo del estadístico “t” de prueba – 1era hipótesis.

Descripción	Símbolo	Resultado
Numero de datos (n)	N	7.0
Promedio Disminuye	\bar{X}	3.956%
Desviación estándar Sd	Sd	2.1036
Valor hipotético	U	5%

Fuente: Elaboración Propia

$$t = \frac{\bar{d}}{S_d/\sqrt{n}} = \frac{5\% - 3.956\%}{2.1036/\sqrt{7}} = \mathbf{1.301}$$

Prueba de Hipótesis:

$$t < t_{(1-\alpha),(n-1)} \text{ (UNILATERAL IZQUIERDA)}$$

$$\mathbf{1.301 < 1.943}$$

Debido a que se cumple la condición, se rechaza la hipótesis nula (Ho) y se acepta la hipótesis alterna (Hi), dándonos de este modo que con un nivel de significación del 0.05, las muestras evaluadas manifiestan que al incorporar caucho se llega a tener una disminución de hasta un 5% en el parámetro de densidad.

- b) Segunda hipótesis específica: “La incorporación de 0.5% de caucho a temperaturas de 150°C, 160°C, 165°C y 170°C, con a una dosificación del 5.5% de asfalto mediante el proceso de vía seca genera un incremento de hasta un 30% en la presencia de Vacíos, respecto de las mezclas asfálticas convencionales”

Para contrastar estadísticamente la segunda hipótesis específica se hace uso de la base de datos del cual se va obteniendo el porcentaje que incrementa en el parámetro de vacíos dentro una mezcla asfáltica modificadas con una dosificación de 0.5% de caucho a una temperatura de 150°C a 170°C respecto al resultado de vacíos que contiene una mezcla asfáltica convencional.

Tabla 58: Porcentaje de incremento del contenido de vacíos al incorporar 0.5% de caucho a diferentes temperaturas.

Temperatura	5.5% Asfalto	
	Caucho	% vacíos
	Dosificación	Incremento %
150°C	0.50 %	22.41
160°C	0.50 %	15.52
165°C	0.50 %	31.03
170°C	0.50 %	6.90

Fuente: Elaboración Propia

H_0 : Al incorporar 0.5% de caucho a una temperatura de 150°C a 170°C dentro de una mezcla asfáltica convencional, el porcentaje de vacíos de la mezcla no se incrementa hasta un 30%.

H_1 : Al incorporar 0.5% de caucho a una temperatura de 150°C a 170°C dentro de una mezcla asfáltica convencional, el porcentaje de vacíos de la mezcla se incrementa hasta un 30%.

$$H_0: \mu_d \geq 30\%$$

$$H_1: \mu_d < 30\%$$

Teniendo como condición, que se cumpla:

$$t < t_{(1-\alpha), (n-1)} \text{ (UNILATERAL IZQUIERDA)}$$

Del cual se rechazaría la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis alterna (H_1)

Desarrollo de la Prueba:

Tabla 59: Datos iniciales para el desarrollo de prueba T de Student – 2da hipótesis.

Descripción	Símbolo	Resultado
Numero de datos	n	4.0
grado de Libertad	$gl = n - 1$	3.0
Significación	α	0.05

Fuente: Elaboración Propia

Haciendo uso del análisis de datos del software Excel, tenemos:

Tabla 60: Análisis del valor crítico con el software Excel.

P(T<=t) una cola	0.01833553
Valor crítico de t (una cola)	2.35336343
P(T<=t) dos colas	0.03667087
Valor crítico de t (dos colas)	3.18244631

Fuente: Elaboración Propia

Del cual haremos uso el valor critico t (una cola)

Cálculo del estadístico de prueba “t”

Tabla 61: Datos para el cálculo del estadístico “t” de prueba – 2da hipótesis.

Descripción	Símbolo	Resultado
Numero de datos (n)	N	4.0
Promedio Disminuye	\bar{X}	18.97%
Desviación estándar Sd	Sd	10.248
Valor hipotético	U	30%

Fuente: Elaboración Propia

$$t = \frac{\bar{d}}{S_d/\sqrt{n}} = \frac{30\% - 18.97\%}{10.248/\sqrt{4}} = \mathbf{2.1534}$$

Prueba de Hipótesis:

$$t < t_{(1-\alpha),(n-1)} \text{ (UNILATERAL IZQUIERDA)}$$

$$\mathbf{2.1534 < 2.3533}$$

Debido a que se cumple la condición, se rechaza la hipótesis nula (Ho) y se acepta la hipótesis alterna (Hi), dándonos de este modo que, con un nivel de significación del 0.05, las muestras evaluadas manifiestan que al incorporar caucho se llega a tener un incremento de hasta un 30% en el parámetro de contenido de vacíos.

- c) Tercera hipótesis específica: “La incorporación de caucho a una temperatura de 170°C con una dosificación del 5.5% de asfalto mediante el proceso de vía seca generando un incremento de hasta un 20% en la presencia de Vacíos de Agregado Mineral”

Para contrastar estadísticamente la tercera hipótesis específica se hace uso de la base de datos del cual se va obteniendo el porcentaje que incrementa para los vacíos de agregado mineral (VMA) en una mezcla asfáltica modificada con una dosificación de 0.5% de caucho a una temperatura de 170°C respecto al resultado del VMA de una mezcla asfáltica convencional.

Tabla 62: Porcentaje de disminución del VMA según dosificación de caucho a una temperatura de 170°C

Temperatura	5.5% Asfalto	
	Caucho	% VMA
	Dosificación %	Incremento %
170	0.5	7.28
170	1.0	11.92
170	1.5	15.23
170	2.0	16.56

Fuente: Elaboración Propia

H_0 : Al incorporar granos de caucho a una temperatura de 170°C dentro de una mezcla asfáltica convencional, el porcentaje de vacíos de agregado mineral de la mezcla no se incrementa hasta un 20%.

H_1 : Al incorporar granos de caucho a una temperatura de 170°C dentro de una mezcla asfáltica convencional, el porcentaje de vacíos de agregado mineral de la mezcla se incrementa hasta un 20%.

$$H_0: \mu_d \geq 20\%$$

$$H_1: \mu_d < 20\%$$

Teniendo como condición, que se cumpla:

$$t < t_{(1-\alpha), (n-1)} \text{ (UNILATERAL IZQUIERDA)}$$

Del cual se rechazaría la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis alterna (H_1)

Desarrollo de la Prueba:

Tabla 63: Datos iniciales para el desarrollo de prueba T de Student – 3era hipótesis

Descripción	Símbolo	Resultado
Numero de datos	n	4.0
grado de Libertad	$gl = n - 1$	3.0
Significación	α	0.05

Fuente: Elaboración Propia

Haciendo uso del análisis de datos del software Excel, tenemos:

Tabla 64: Análisis del valor crítico con el software Excel

P(T<=t) una cola	0.00360523
Valor crítico de t (una cola)	2.35336343
P(T<=t) dos colas	0.00721046
Valor crítico de t (dos colas)	3.18244631

Fuente: Elaboración Propia

Del cual haremos uso el valor critico t (una cola)

Cálculo del estadístico de prueba “t”

Tabla 65: Datos para el cálculo del estadístico “t” de prueba – 3ra hipótesis

Descripción	Símbolo	Resultado
Numero de datos (n)	N	4.0
Promedio Disminuye	\bar{X}	12.75%
Desviación estándar Sd	Sd	4.131
Valor hipotético	U	20%

Fuente: Elaboración Propia

$$t = \frac{\bar{d}}{S_d/\sqrt{n}} = \frac{20\% - 12.75\%}{12.75/\sqrt{4}} = \mathbf{3.511}$$

Prueba de Hipótesis:

$$t < t_{(1-\alpha),(n-1)} \text{ (UNILATERAL IZQUIERDA)}$$

$$\mathbf{3.511 < 2.3533}$$

Debido a que no se cumple la condición, se acepta la hipótesis nula (Ho) y se rechaza la hipótesis alterna (Hi), dándonos de este modo que, con un nivel de significación del 0.05, las muestras evaluadas manifiestan que al incorporar caucho no se llega a tener un incremento de hasta un 20% en el parámetro de VMA.

- d) Cuarta hipótesis específica: “La incorporación de caucho a una temperatura de 170°C con una dosificación del 5.5% de asfalto mediante el proceso de vía seca influirá en el incremento del flujo hasta un 25% y de la estabilidad hasta un 50% de la mezcla”

Para contrastar estadísticamente la cuarta hipótesis específica, se realizará de manera separada los resultados para cada parámetro, por lo cual, para la parte del flujo se obtiene los resultados en porcentaje que incrementa en una mezcla asfáltica modificada con una dosificación de 0.5% a 2.0% de caucho a una temperatura de 170°C respecto al resultado de una mezcla asfáltica convencional.

Tabla 66: Porcentaje de incremento del Flujo según dosificación de caucho a una temperatura de 170°C

Temperatura	5.5% Asfalto	
	Caucho	Flujo
	Dosificación %	Incremento %
170	0.5	3.02
170	1.0	12.79
170	1.5	22.56
170	2.0	33.10

Fuente: Elaboración Propia

Ho: Al incorporar granos de caucho a una temperatura de 170°C dentro de una mezcla asfáltica convencional, el flujo de la mezcla no se incrementa hasta un 25%.

H₁: Al incorporar granos de caucho a una temperatura de 170°C dentro de una mezcla asfáltica convencional, el flujo de la mezcla se incrementa hasta un 25%.

$$H_0: \mu_d \geq 25\%$$

$$H_1: \mu_d < 25\%$$

Teniendo como condición, que se cumpla:

$$t < t_{(1-\alpha), (n-1)} \text{ (UNILATERAL IZQUIERDA)}$$

Del cual se rechazaría la hipótesis nula (H₀) y se acepta la hipótesis alterna (H₁)

Desarrollo de la Prueba:

Tabla 67: Datos iniciales para el desarrollo de prueba T de Student – 4ta hipótesis

Descripción	Símbolo	Resultado
Numero de datos	n	4.0
grado de Libertad	$gl = n - 1$	3.0
Significación	α	0.05

Fuente: Elaboración Propia

Haciendo uso del análisis de datos del software Excel, tenemos:

Tabla 68: Análisis del valor crítico con el software Excel

P(T<=t) una cola	0.00366125
Valor crítico de t (una cola)	2.35336343
P(T<=t) dos colas	0.07322496
Valor crítico de t (dos colas)	3.18244631

Fuente: Elaboración Propia

Del cual haremos uso el valor critico t (una cola)

Cálculo del estadístico de prueba “t”

Tabla 69: Datos para el cálculo del estadístico “t” de prueba – 3ra hipótesis

Descripción	Símbolo	Resultado
Numero de datos (n)	N	4.0
Promedio Disminuye	\bar{X}	17.87%
Desviación estándar Sd	Sd	12.912
Valor hipotético	U	25%

Fuente: Elaboración Propia

$$t = \frac{\bar{d}}{S_d/\sqrt{n}} = \frac{25\% - 17.87\%}{12.912/\sqrt{4}} = \mathbf{1.1051}$$

Prueba de Hipótesis:

$$t < t_{(1-\alpha),(n-1)} \text{ (UNILATERAL IZQUIERDA)}$$

$$\mathbf{1.1051 < 2.353}$$

Debido a que se cumple la condición, se rechaza la hipótesis nula (Ho) y se acepta la hipótesis alterna (Hi), dándonos de este modo que, con un nivel de significación del 0.05, las muestras evaluadas manifiestan que al incorporar caucho se llega a tener un incremento de hasta un 25% en el parámetro de flujo.

Por la parte de la estabilidad se va obteniendo el porcentaje que incrementa en una mezcla asfáltica modificada con una dosificación de 0.5% a 2.0% de caucho a una temperatura de 170°C respecto al de una mezcla asfáltica convencional.

Tabla 70: Porcentaje de disminución de la Estabilidad según dosificación de caucho

5.5% Asfalto		
Temperatura	Caucho	Estabilidad
	Dosificación	Incremento %
170	0.5	60.15
170	1	38.90
170	1.5	32.79
170	2	6.10

Fuente: Elaboración Propia

H_0 : Al incorporar caucho a una temperatura de 170°C dentro de una mezcla asfáltica convencional, la estabilidad de la mezcla no se incrementa hasta un 50%.

H_1 : Al incorporar caucho a una temperatura de 170°C dentro de una mezcla asfáltica convencional, la estabilidad de la mezcla se incrementa hasta un 50%.

$$H_0: \mu_d \geq 50\%$$

$$H_1: \mu_d < 50\%$$

Teniendo como condición, que se cumpla:

$$t < t_{(1-\alpha), (n-1)} \text{ (UNILATERAL IZQUIERDA)}$$

Del cual se rechazaría la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis alterna (H_1)

Desarrollo de la Prueba:

Tabla 71: Desarrollo de prueba T de Student para la H. específica 4 (Estabilidad)

Descripción	Símbolo	Resultado
Numero de datos	n	4.0
grado de Libertad	$gl = n - 1$	3.0
Significación	α	0.05

Fuente: Elaboración Propia

Haciendo uso del análisis de datos del software Excel, tenemos:

Tabla 72: Análisis de datos mediante Excel para la H. específica 4 (Estabilidad)

P(T<=t) una cola	0.00366125
Valor crítico de t (una cola)	2.35336343
P(T<=t) dos colas	0.07322496
Valor crítico de t (dos colas)	3.18244631

Fuente: Elaboración Propia

Del cual haremos uso el valor critico t (una cola)

Cálculo del estadístico de prueba “t”

Tabla 73: Cálculo estadístico de la prueba T de Student para la H. específica 4 (Estabilidad)

Descripción	Símbolo	Resultado
Numero de datos (n)	N	4.0
Promedio Disminuye	\bar{X}	34.49%
Desviación estándar Sd	Sd	22.259
Valor hipotético	U	50%

Fuente: Elaboración Propia

$$t = \frac{\bar{d}}{S_d/\sqrt{n}} = \frac{50\% - 34.49\%}{22.259/\sqrt{4}} = \mathbf{1.394}$$

Prueba de Hipótesis:

$$t < t_{(1-\alpha),(n-1)} \text{ (UNILATERAL IZQUIERDA)}$$

$$\mathbf{1.394 < 2.353}$$

Debido a que se cumple la condición, se rechaza la hipótesis nula (Ho) y se acepta la hipótesis alterna (Hi), dándonos de este modo que, con un nivel de significación del 0.05, las muestras evaluadas manifiestan que al incorporar caucho se llega a tener un incremento de hasta un 50% en el parámetro de estabilidad.

Hipótesis General: “La incorporación de caucho como agente modificante mediante el proceso de vía seca genera una variación de hasta un 50% en al menos uno de los parámetros de diseño de una mezcla asfáltica convencional.”

De acuerdo a los resultados de la contrastación hipotética realizados con anterioridad para cada caso específico, se acepta la hipótesis general y se ratifica que la incorporación de caucho, mediante el proceso de vía seca, genera una variación de hasta un 50% en al menos uno de los parámetros de diseño de una mezcla asfáltica convencional.

CONCLUSIONES

1. La incorporación de caucho a la mezcla asfáltica mediante el proceso de vía seca generó una variación de hasta un 50% en uno de sus parámetros de diseño, este parámetro es el de Estabilidad de la mezcla asfáltica.
2. La incorporación de caucho a la mezcla asfáltica con una dosificación del 5.5% de asfalto, mediante el proceso de vía seca, genera que la Densidad de la mezcla disminuya respecto de las mezclas asfálticas convencionales, esto debido a que las partículas de caucho poseen menor densidad respecto de los agregados, por lo cual el volumen de la mezcla total tiene una relación directamente proporcional al incremento de caucho.
3. La incorporación de 0.5% de caucho a temperaturas de 150°C, 160°C, 165°C y 170°C, con a una dosificación del 5.5% de asfalto mediante el proceso de vía seca genera que la presencia de vacíos con aire logre un incremento menor al 30%, lo cual permite una compactación extra al recibir tráfico.
4. La incorporación de caucho a la mezcla asfáltica por el proceso de vía seca a una temperatura de 170°C y un 5.5% de cemento asfáltico, genera que los vacíos de agregado mineral (VMA) logren un incremento inferior al 20%, permitiendo que se forme una película de asfalto más gruesa, lo cual aumenta la durabilidad de la mezcla asfáltica, siendo el de incorporación de 0.5% de caucho, el que tuvo el menor incremento de VMA.
5. La incorporación de caucho a la mezcla asfáltica por el proceso de vía seca genera que el flujo se incremente hasta en un 25%, esto producirá que la flexibilidad de la mezcla asfáltica aumente.
6. La incorporación de caucho a la mezcla asfáltica por el proceso de vía seca genera que la estabilidad se incremente hasta en un 50%, esto producirá que la mezcla tenga mayor resistencia a las deformaciones bajo las cargas de tránsito.
7. Es seguro y confiable el empleo de caucho reciclado de neumáticos en desuso mediante la incorporación por vía seca, en donde las partículas de caucho superiores al 0.5 mm actúa como un agregado y las partículas inferiores interactúan con el cemento asfáltico a temperaturas que superan lo convencional, de manera que realiza una interacción similar al proceso por vía húmeda, esta acción del caucho dentro de una mezcla asfáltica conlleva a cumplir con las especificaciones demandadas por el

diseño Marshall a tan solo un 5.5% a 6.0% en contenido de asfalto, a su vez, el empleo de este material trae consigo beneficios en cuanto a la contaminación medioambiental, dado a que se reduciría en gran manera los neumáticos en fuera de uso que estima el parque automotor de Perú.

8. Las variables más importantes y críticas dentro de un diseño de mezcla modificada con caucho mediante la incorporación por vía seca, es el tiempo y la temperatura de digestión, debido a que se debe cumplir con un mínimo necesario de estas dos variables para que exista una correcta interacción del caucho con el asfalto para su modificación.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda tener como principal punto de partida, para próximas investigaciones nacionales, realizar el ensayo de inmersión-compresión con la finalidad de conseguir un óptimo tiempo de digestión para las mezclas modificadas con caucho.
2. Se recomienda realizar tramos de prueba para poder analizar el comportamiento in-situ del pavimento modificado con caucho, como también, aumentar la inversión en investigación para poner en práctica estos avances, ya que actualmente en el Perú aún no se ha aplicado esta tecnología.
3. Se recomienda profundizar en los beneficios económicos que conlleva realizar una mezcla asfáltica modificada con caucho, mediante el proceso por vía seca, respecto de la mezcla asfáltica convencional.
4. Es importante que se creen normativas nacionales con respecto al uso de caucho en los pavimentos de Perú, ya que actualmente solo se hace una ligera mención en la Norma de Especificaciones Generales (EG-2013) del Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
5. Profundizar en el estudio de la incorporación de partículas de caucho que no superen los 0.5mm, mediante el proceso de vía seca.

BIBLIOGRAFIA

- Alvarez Briceño, L. A., & Carrera Sanchez, E. T. (2017). *Influencia de la incorporación de partículas de caucho reciclado como agregados en el diseño de Mezcla Asfáltica*. Tesis de grado, Universidad Privada Antenor Orrega, Trujillo. Obtenido de <http://repositorio.upao.edu.pe/handle/upaorep/3595>
- Angulo Rodríguez, R. A., & Duarte Ayala, J. L. (2005). *Modificación de un asfalto con caucho reciclado de llanta para su aplicación en pavimentos*. Tesis de Grado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga. Obtenido de <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/6916/2/118188.pdf>
- Arias Gomez, J., Villasis Keever, M. Á., & Miranda Novales, M. G. (2016). *El protocolo de investigación III: la población de estudio*. Revista Alergia, 63(2), 201-206.
- ASTM International. (2015). *Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures*. West Conshohocken. doi:10.1520/D6927-15
- Borja Suarez, M. (2012). *Metodología de la investigación científica para Ingenieros*.
- Cabezas Dulanto, V., & Mendoza Aguirre, C. F. (2018). *Alternativa de diseño de mezcla asfáltica en caliente con polvo de caucho de NFU para la ciudad de Lima 2018*. Tesis de grado, Universidad Cesar Vallejo, Lima. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12692/34939>
- Campaña Cruz, K. O., Galeas Hurtado, S., & Guerrero Barragán, V. H. (2015). *Obtención de Asfalto Modificado con Polvo Proveniente del Reciclaje de Neumáticos de Automotores*. Revista Politécnica, 36(3). Obtenido de https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/513
- Carrizales Apaza, J. J. (2015). *Asfalto modificado con material reciclado de llantas para su aplicación en pavimentos flexibles*. Tesis de Pregrado, Universidad Nacional del Altiplano, Puno. Obtenido de <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/1888>
- Cerda Neira, E. A., & Pintado Silupú, Y. D. (2019). *Uso del caucho en el diseño del pavimento flexible, en avenida Los Algarrobos, tramo avenida Las Amapolas – avenida Gustavo Mohme, Veintiséis de Octubre, Piura - 2018*. Tesis de Pregrado, Universidad Cesar Vallejo, Piura. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12692/32285>
- Díaz Claros, C. M., & Castro Celis, L. C. (2017). *Implementación del grano de caucho reciclado (GCR) proveniente de llantas usadas para mejorar las mezclas asfálticas y garantizar pavimentos sostenibles en Bogotá*. Tesis de Grado, Universidad Santo Tomás, Bogotá. Obtenido de <https://hdl.handle.net/11634/2633>
- Dong, Y., & Tan, Y. (2011). *Mix Design and Performance of Crumb Rubber Modified Asphalt SMA*. Geotechnical Special Publication(212), 78-86. Obtenido de <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/47623%28402%2910>

- Fajardo Cachay, L. E., & Vergaray Huamán, D. A. (2014). *Efecto De La Incorporación Por Vía Seca, Del Polvo De Neumático Reciclado, Como Agregado Fino En Mezclas Asfálticas*. Tesis de Grado, Universidad de San Martín de Porres, Lima, Perú. Obtenido de <http://repositorio.usmp.edu.pe/handle/usmp/1044>
- Feiteira Dias, J., Picado-Santos, L., & Capitaio. (2014). *Mechanical performance of dry process fine crumb rubber asphalt mixtures placed on the Portuguese road network*. *Construction and Building Materials*, 73, 247-254. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/267275452_Mechanical_performance_of_dry_process_fine_crumb_rubber_asphalt_mixtures_placed_on_the_Portuguese_road_network
- Flores Perez, J. R. (2018). *Efectos de la incorporación de caucho en granos en la carpeta asfáltica de la trocha carrozable Accopampa - Santa Ana, Lucanas, Ayacucho, 2018*. Tesis de Pregrado, Universidad Cesar Vallejo, Ayacucho. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12692/28182>
- Gallego Medina, J., & De los Santos Granados, L. (2003). *Mezclas bituminosas fabricadas con betunes de alto contenido de caucho. Aplicación al recrecimiento de un pavimento rígido en la A-7*. *Revista de Obras Publicas*, 150(3439). Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=794279>
- Gallego Medina, J., & Prieto Muñoz, J. N. (2004). *Tipos de Mezclas Bituminosas con caucho de neumaticos. Experiencia española en la conservación de carreteras*. Salamanca: IX Jornada de Investigación. Obtenido de http://www.crp.pt/docs/A11S96-pavimentos_34.pdf
- Goicochea Fernandez, F. (2019). *Estudio de un asfalto con adición de caucho de neumático reciclado como polímero base, Chachapoyas – Amazonas – 2017*. Tesis de Pregrado, Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza, Amazonas, Chachapoyas. Obtenido de <http://repositorio.untrm.edu.pe/handle/UNTRM/1627>
- Granados Noa, J. L. (2017). *Comportamiento Mecánico De La Mezcla Asfáltica En Caliente Modificada Con Caucho Mediante Proceso Por Vía Seca Respecto A La Mezcla Asfáltica Convencional*. Tesis de Maestría, Universidad Ricardo Palma, Lima. Obtenido de <http://repositorio.urp.edu.pe/handle/URP/1572>
- Guamanquispe Vaca, F. P. (2017). *Análisis de las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas con adición de caucho de llanta reciclado*. Tesis de Grado, Universidad Técnica de Ambato, Ambato. Obtenido de <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/25156>
- Hernandez Sampieri, R., Fernandez Collado, C., & Baptista Lucio, M. d. (2014). *Metodología de la Investigación* (Sexta ed.). Mexico D.F: McGraw-Hill education.
- Jimenez, R. A., & Meier, W. (1985). *laboratory Evaluation of an Asphalt-Rubber SAL*. *Transportation Research Record*(1034), 86-96. Obtenido de <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1985/1034/1034-011.pdf>

- Lira Segura, J. (18 de Mayo de 2019). *MTC aseguró pavimentar el 90% de la Red Vial Nacional y 70% de la Departamental para 2021*. Periodico Gestión. Obtenido de <https://gestion.pe/economia/mtc-aseguro-pavimentar-90-red-vial-nacional-70-departamental-2021-nndc-267313-noticia/>
- Llago Serrano, R. C. (2015). *Empleo en mezclas asfálticas de caucho recuperado de neumáticos fuera de uso*. Tesis de grado, Universidad Politécnica de València, Valencia. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10251/57873>
- Llago Serrano, R. C. (2015). *Empleo en mezclas asfálticas de caucho recuperado de neumáticos fuera de uso*. Tesis de grado, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10251/57873>
- Lougheed, T. J., & Papagiannakis, A. T. (1996). *Viscosity Characteristics of Rubber-Modified Asphalts*. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 8(3), 153-156. Obtenido de [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1996\)8:3\(153\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1996)8:3(153))
- Maguiña Salazar, W. T. (2019). *Caucho reciclado de llantas en la mezcla de Asfalto a Compresión para mejorar las Propiedades Mecánicas*. Tesis de Maestría, Universidad Ricardo Palma, Lima. Obtenido de <http://repositorio.urp.edu.pe/handle/URP/2919>
- Mantilla Forero, J. E., & Castañeda Pinzón, E. A. (2019). *Estudio experimental del efecto del caucho reciclado y la asfaltita en el desempeño del asfalto/Assessment of simultaneous incorporation of crumb rubber and asphaltite in asphalt binders*. *DYNA*(86(208)), 257-263. doi:<https://doi.org/10.15446/dyna.v86n208.69400>
- Martinez-Argellez, G., Caicedo, B., Gonzales, D., Celis, L., Fuentes, L., & Torres, V. (2018). *Trece años de continuo desarrollo con mezclas asfálticas modificadas con Grano de Caucho Reciclado en Bogotá: Logrando sostenibilidad en pavimentos*. *Revista Ingeniería de la Construcción*, 33 (1), 41-50. doi:<https://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732018000100041>
- Ministerio de Fomento y Medio Ambiente; CEDEX. (2007). *Manual de Empleo de Caucho de NFU en Mezclas Bituminosas*. Obtenido de http://www.cedex.es/NR/rdonlyres/27EDCC96-7C3A-42B5-96B7-F6B87D0BD3DF/116371/Manual_NFU.pdf
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2013). *Manual de Carreteras. Especificaciones técnicas generales para construcción EG-2013*. Lima. Obtenido de http://transparencia.mtc.gob.pe/idm_docs/P_recientes/4955.pdf
- Moreno Huamán, E. (2016). *Estudio comparativo del asfalto tradicional y el asfalto con la inclusión de caucho reciclado, con fines de pavimentación, Lima - 2016*. Tesis de Pregrado, Universidad Cesar Vallejo, Lima. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12692/18423>
- MTC. OGGP. Oficina de estadística. (2018). *Boletín Estadístico*. Obtenido de https://portal.mtc.gob.pe/estadisticas/publicaciones/boletines/boletin_estadistico_I_semestre_2018.pdf

- Murat, K., Volkan, O., & Arzu, E. (2015). *A Study on the Rheological Properties of Recycled Rubber-Modified Asphalt Mixtures*. The Scientific World Journal, 2015, 9. Obtenido de <https://www.hindawi.com/journals/tswj/2015/258586/>
- Navarro Dupre, N. M. (2013). *Confección y seguimiento de tramos de prueba de mezclas asfálticas con incorporación de polvo de caucho nacional de neumáticos fuera de uso (NFU) mediante vía seca*. Tesis de Pregrado, Universidad de Chile, Santiago de Chile. Obtenido de <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/115523>
- Pedraza Susa, A., & González Granada, D. F. (2016). *Influencia de la temperatura de compactación en mezclas asfálticas densas en caliente [MDC] modificadas con grano de caucho reciclado [GCR]*. Tesis de Grado, Universidad de la Salle, Bogotá. Obtenido de https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_civil/110
- Pelaez Arroyave, G. J., Velasquez Restrepo, S. M., & Giraldo Vasquez, D. H. (2017). *Aplicaciones de Caucho Reciclado: Una revisión de la Literatura*. Ciencia e ingeniería Neogranadina, 27(2), 27-50. doi:<http://dx.doi.org/10.18359/rcin.2143>
- Punith, V., Suresha, S., Raju, S., Bose, S., & Veeraragavan, A. (2011). *Laboratory Investigation of Open-Graded Friction Course Mixtures Containing Polymers and Cellulose Fibers*. Journal of Transportation Engineering. Obtenido de <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29TE.1943-5436.0000304>
- Ramírez Palma, N. I. (2006). *Estudio de la utilización de caucho de neumáticos en mezclas asfálticas en caliente mediante proceso seco*. Tesis de Pregrado, Universidad de Chile. Obtenido de <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104457>
- Robles Romero, A. N. (2018). *Comportamiento de la mezcla asfáltica agregando caucho reciclado en pavimentos flexibles, Ate, Lima-Perú, 2018*. Tesis de grado, Lima. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12692/39507>
- Rodriguez Castro, E. (2016). *Uso de polvo de caucho de llantas en Pavimentos Asfálticos*. Boletín Técnico PITRA-LanammeUCR, 7(4), 1-7. Obtenido de <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/316>
- Rondon Quintana, H. A. (2011). *Mezclas asfálticas modificadas con grano de caucho de llanta (GCR): estado de conocimiento y análisis de utilización en Colombia*. Bogotá: VI Jornada de Pavimentos y Mantenimiento Vial. Obtenido de <http://es.slideshare.net/alexa842003/articulo-asfalto-caucho>
- Rubber Pavement Association. (14 de Marzo de 2016). *Rubber Pavement Association*. Obtenido de <http://www.rubberpavements.org/index.html>
- Salamanca Vera, D. A. (2018). *Estudio comparativo del comportamiento de mezcla asfáltica con incorporación de polvo de caucho nacional, mediante vía seca, versus mezcla con asfalto modificado con polímeros y asfalto multigrado. Tramo de prueba: Catapilco – La laguna*. Tesis de Pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Obras Civiles, Valparaíso, Chile. Obtenido de <http://hdl.handle.net/11673/40998>

- Salazar Saldaña, G. K. (2019). *Comportamiento de las Mezclas Asfálticas adicionándole caucho por la técnica de Vía Seca*. Tesis de grado, Universidad Cesar Vallejo, Chicla. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12692/31641>
- Schilling Jeraldino, J. I. (2018). *Modificación con Caucho Reciclado de Neumático de Unligante Ca-24 y caracterización mediante Ensayos de Desempeño*. Tesis de Pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Obras Civiles, Valparaíso. Obtenido de <http://hdl.handle.net/11673/42240>
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2006). *CMT. Características de los Materiales*. Mexico D.F. Obtenido de <https://normas.imt.mx/normativa/N-CMT-4-05-002-06.pdf>
- Segovia Carhuas, E. C., & Paco Martínez, A. (2020). *Análisis del aprovechamiento de neumáticos reciclados usados como aditivo en el asfalto*. Tesis de grado, Arequipa. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12590/16229>
- Sibal, A., Das, A., & Pandey, B. B. (2000). *Flexural Fatigue Characteristics of Asphalt Concrete with Crumb Rubber*. *Int. J. of Pavement Engineering*, I(2), 119-132. Obtenido de <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10298430008901701>
- Soto Avalos, E. Y. (2017). *Influencia de la incorporación de porcentajes de caucho de llanta reciclado sobre los parámetros Marshall en las mezclas asfálticas en caliente, Trujillo 2017*. Tesis de Pregrado, Universidad Privada del Norte, Trujillo. Obtenido de <http://hdl.handle.net/11537/13751>
- Tam Malaga, J., Vera, G., & Olivares Ramos, R. (2008). *Tipos, métodos y estrategias de Investigaciones Científicas*.
- Ubidia Pinedo, L. E. (2019). *Diseño de pavimento flexible con la utilización de polvo de caucho reciclado para minimizar la generación de fisuras del Jr. Jorge Chávez cdra. 01-09 Ciudad de Tarapoto San Martín*. Tesis de grado, Universidad Cesar Vallejo, Tarapoto. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12692/31570>
- Universidad de los Andes. (2005). *Segunda fase del estudio de las mejoras mecánicas de las mezclas asfálticas con desechos de llantas-Pista de Prueba*. Bogotá D.C. Obtenido de https://www.idu.gov.co/web/content/7461/mejoras_mecanicas_mezclas_asfalticas
- Vega Zurita, D. S. (2017). *Análisis del comportamiento a compresión de asfalto conformado por caucho reciclado de llantas como material constitutivo del pavimento asfáltico*. Tesis de Grado, Universidad Técnica de Ambato, Ambato. Obtenido de <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/25264>
- Velazques, M. (1977). *Manual del Asfalto*. Bilbao: URMO, S.A DE EDICIONES. Obtenido de <https://www.libros-antiguos-alcana.com/asphalt-institute/manual-del-asfalto/libro>
- Villagaray Medina, E. J. (2017). *Aplicación de caucho reciclado en un diseño de Mezcla Asfáltica para el tránsito vehicular de la avenida Trapiche-Comas (Remanso)*

2017. Tesis de grado, Universidad cesar Vallejo, Lima. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12692/1535>

Wulf Rodriguez, F. A. (2008). *Análisis de pavimento asfáltico modificado con polimero*. Tesis de Grado, Universidad Austral de Chile, Valdivia. Obtenido de <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2008/bmfciw961a/doc/bmfciw961a.pdf>

Xiao, F., & Amirkhanian, S. N. (2009). *HP-GPC Approach to Evaluating Laboratory Prepared Long-Term Aged Rubberized Asphalt Binders*. *GeoHunan International Conference* 2009(191), 42-48. Obtenido de <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/41043%28350%296>

ANEXOS

Anexo 1: Matriz de consistencia

MATRIZ DE CONSISTENCIA					
Tema: INFLUENCIA DEL CAUCHO RECICLADO UTILIZADO COMO AGENTE MODIFICANTE EN LOS PARÁMETROS DE DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA					
Problema	Objetivo	Hipótesis	Variables	Metodología	Tipo y Diseño
Problema General	Objetivo General	Hipótesis General			
¿De qué manera influye la incorporación de caucho como agente modificante en los parámetros de diseño de una mezcla asfáltica convencional mediante el proceso de vía seca?	Determinar de qué manera influye la incorporación de caucho como agente modificante en los parámetros de diseño de una mezcla asfáltica convencional mediante el proceso de vía seca, basándonos en información obtenida de investigaciones relacionadas al tema.	La incorporación de caucho como agente modificante mediante el proceso de vía seca genera una variación de hasta un 50% en al menos uno de los parámetros de diseño de una mezcla asfáltica convencional.	VI. Incorporación de Caucho VD. Parametros de diseño de una mezcla asfáltica	- Recopilación, análisis y exposición de información -Análisis de base de datos de ensayo marshall -Desarrollo de cuadros comparativos e informativos de los parámetros marshall.	1) Tipo de Investigación :Aplicada 2) Metodo de investigación: Cuantitativo 3) Diseño de Investigación: No experimental 4) Según numero de mediciones: Transeccional 5) Nivel de investigación: Correlacional
Problema Especifico 1	Objetivo Especifico 1	Hipótesis Especifica 1			
¿En qué medida la incorporación de caucho mediante el proceso de vía seca influiría en la Densidad de la mezcla?	Determinar en qué medida la incorporación de caucho mediante el proceso de vía seca influiría en la Densidad de la mezcla, basándonos en información obtenida de investigaciones relacionadas al tema.	La incorporación de caucho a una dosificación del 5.5% de asfalto mediante el proceso de vía seca genera que la Densidad de la mezcla disminuya hasta un 5%, respecto de las mezclas asfálticas convencionales.	VI. Incorporación de Caucho VD. Disminución de la Densidad	-Determinar la relacion e influencia del caucho en los parametros de diseño.	
Problema Especifico 2	Objetivo Especifico 2	Hipótesis Especifica 2			
¿En qué medida la incorporación de caucho mediante el proceso de vía seca influiría en la presencia de Vacíos de aire?	Determinar en qué medida la incorporación de caucho mediante el proceso de vía seca influiría en la presencia de Vacíos de aire, basándonos en información obtenida de investigaciones relacionadas al tema.	La incorporación de 0.5% de caucho a temperaturas de 150°C, 160°C, 165°C y 170°C, con a una dosificación del 5.5% de asfalto mediante el proceso de vía seca genera un incremento de hasta un 30% en la presencia de Vacíos de aire, respecto de las mezclas asfálticas convencionales.	VI. Incorporación de Caucho VD. Incremento de la Presencia de Vacios de aire		
Problema Especifico 3	Objetivo Especifico 3	Hipótesis Especifica 3			
¿En qué medida la incorporación de caucho mediante el proceso de vía seca influiría en la presencia de Vacíos de Agregado Mineral de la mezcla asfáltica?	Determinar en qué medida la incorporación de caucho mediante el proceso de vía seca influiría en la presencia de Vacíos en el Agregado Mineral, basándonos en información obtenida de investigaciones relacionadas al tema.	La incorporación de caucho a una temperatura de 170°C con una dosificación del 5.5% de asfalto mediante el proceso de vía seca genera un incremento de hasta un 20% en la presencia de Vacíos de Agregado Mineral.	VI. Incorporación de Caucho VD. Incremento de la Presencia de Vacios de Agregado Mineral		
Problema Especifico 4	Objetivo Especifico 4	Hipótesis Especifica 4			
¿En qué medida la incorporación de caucho mediante el proceso de vía seca influiría en el Flujo y Estabilidad de la mezcla asfáltica?	Determinar en qué medida la incorporación de caucho mediante el proceso de vía seca influiría en el Flujo y Estabilidad de la mezcla asfáltica, basándonos en información obtenida de investigaciones relacionadas al tema.	La incorporación de caucho a una temperatura de 170°C con una dosificación del 5.5% de asfalto mediante el proceso de vía seca influiría en el incremento del flujo hasta un 25% y de la estabilidad hasta un 50%	VI. Incorporación de Caucho VD.1 incremento del flujo VD.2 incremento de la estabilidad		

Fuente: Elaboración propia

Anexo 2: Infraestructura Vial Existente del Sistema Nacional de Carreteras

INFRAESTRUCTURA VIAL EXISTENTE DEL SISTEMA NACIONAL DE CARRETERAS, SEGÚN SUPERFICIE DE RODADURA: 1990-2018										
(Kilómetros)										
AÑO	CLASIFICADOR DE RUTAS DEL SINAC	TOTAL	PAVIMENTADO				NO PAVIMENTADA			
			Nacional	Departamental	Vecinal	Sub-Total	Nacional	Departamental	Vecinal	Sub-Total
1990	D.S. N° 062-85-TC	69,942	5,740	1,058	766	7,564	9,952	13,386	39,040	62,378
1991	D.S. N° 062-85-TC	69,942	5,635	1,058	766	7,459	10,057	13,386	39,040	62,483
1992	D.S. N° 062-85-TC	69,942	5,800	1,058	766	7,624	9,892	13,386	39,040	62,318
1993	D.S. N° 062-85-TC	69,942	5,800	1,058	766	7,624	9,892	13,386	39,040	62,318
1994	D.S. N° 062-85-TC	69,942	5,800	1,058	766	7,624	9,892	13,386	39,040	62,318
1995	D.S. N° 09-95-MTC	73,439	6,477	1,089	790	8,356	10,042	13,242	41,799	65,083
1996	D.S. N° 09-95-MTC	73,766	6,761	1,013	790	8,564	9,903	13,300	41,999	65,202
1997	D.S. N° 09-95-MTC	75,807	7,130	989	874	8,993	9,615	13,441	43,758	66,814
1998	D.S. N° 09-95-MTC	78,112	8,140	1,106	942	10,188	8,812	13,145	45,967	67,924
1999	D.S. N° 09-95-MTC	78,127	8,141	1,106	942	10,189	8,826	13,145	45,967	67,938
2000	D.S. N° 09-95-MTC	78,213	8,522	1,106	945	10,573	8,531	13,145	45,964	67,640
2001	D.S. N° 09-95-MTC	78,251	8,693	1,106	947	10,745	8,399	13,145	45,962	67,506
2002	D.S. N° 09-95-MTC	78,319	8,989	1,105	950	11,044	8,169	13,146	45,960	67,275
2003	D.S. N° 09-95-MTC	78,397	7,990.0	1,106.3	942.0	10,038.3	8,867.0	13,144.7	46,347.0	68,358.7
2004	D.S. N° 09-95-MTC	78,396	8,521.0	1,106.0	942.0	10,569.0	8,336.0	13,145.0	46,346.0	67,827.0
2005	D.S. N° 09-95-MTC	78,506	8,730.9	1,106.0	942.0	10,778.9	8,126.1	13,145.0	46,456.4	67,727.6
2006	D.S. N° 09-95-MTC	79,506	8,911.0	1,106.0	942.0	10,959.0	8,946.0	13,145.0	46,456.4	68,547.4
2007	D.S. N° 034-2007/MTC	80,325	11,177.9	1,507.0	955.0	13,639.9	12,660.1	12,930.0	41,095.0	66,685.1
2008	D.S. N° 044-2008/MTC	81,787	11,370.4	1,478.0	790.0	13,638.4	12,532.5	18,217.0	37,399.0	68,148.5
2009	D.S. N° 044-2008/MTC	84,026	11,500.0	1,622.3	809.8	13,932.0	13,000.0	22,768.8	34,325.2	70,094.1
2010	D.S. N° 044-2008/MTC	84,245	12,444.9	1,987.6	880.5	15,313.0	11,150.9	23,786.6	33,994.3	68,931.9
2011 ^a	D.S. N° 036-2011/MTC	129,162	13,639.7	2,089.7	1,484.3	17,213.7	9,679.7	23,508.5	78,759.7	111,947.9
2012 ^a	D.S. N° 036-2011/MTC	140,672	14,747.7	2,339.7	1,611.1	18,698.6	9,845.7	21,895.4	90,232.7	121,973.8
2013 ^a	D.S. N° 036-2011/MTC	156,792	15,905.9	2,517.8	1,933.0	20,356.7	9,099.5	22,474.4	104,861.5	136,435.5
2014 ^a	D.S. N° 012-2013/MTC	165,467	17,411.5	2,429.8	1,924.6	21,765.9	8,377.4	22,582.5	112,740.8	143,700.7
2015 ^a	D.S. N° 012-2013/MTC	165,372	18,420.1	3,459.0	1,890.1	23,769.2	8,016.0	20,828.4	112,758.3	141,602.7
2016 ^b	D.S. N° 011-2016/MTC	165,905	19,682.4	3,695.7	1,915.0	25,293.2	7,000.9	21,608.2	112,002.5	140,611.7
2017	D.S. N° 011-2016/MTC	166,765	20,367.5	3,714.1	1,883.9	25,965.5	6,424.4	23,766.9	110,608.3	140,799.6
2018	D.S. N° 011-2016/MTC	168,473	21,434.0	3,623.1	1,858.9	26,916.0	5,675.6	23,882.5	111,999.0	141,557.1
			79.6%	13.5%	6.9%		4.0%	16.9%	79.1%	

a/. Se incorpora la red vecinal No Registradas, y se encuentra en proceso de formalización producto de la sistematización de 185 Inventarios Viales Georreferenciados Provinciales de la Red Vial Vecinal, a cargo de los Gobierno Subnacional y Provias Descentralizado.

b/. El año 2016 se reclasificaron rutas vecinales No Registradas, pero aun existen 2008 rutas en proceso de revisión.

El período 2010 -2013 se desarrollan los procesos de actualización de datos con los inventarios viales.

El año 2010 se actualizó el Inventario Vial Básico de la Red Vial Nacional, el año 2012 actualizó el Inventario Vial Básico para la Red Vial Departamental en 14 departamentos y el año 2013 para los 10 departamentos restantes.

Fuentes:
MTC - Dirección General de Caminos y Ferrocarriles al 2010-2013
MTC - DGCF,PVD y OGPP, resultado de la Elaboración de la Línea Base de las Redes Viales 2011
MTC-Grupo Técnico de Trabajo (DGCF,PVN,PVD y OGPP) desde el 2012, mediante R.M N°232-2012/MTC

Elaboración: MTC - OGPP - Oficina de Estadística

Fuente: MTC – OGPP-Oficina de Estadística