



UNIVERSIDAD RICARDO PALMA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

Valores de compactación de mezclas asfálticas en centro y Sudamérica según
los criterios de aceptación

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero Civil

AUTORES

Calizaya Carazas, Aldo Adrian

ORCID: 0000-0002-3145-0034

De la Fuente Chavez Chuchón, Alberto Alonzo

ORCID: 0000-0003-0257-7092

ASESOR

Arévalo Lay, Víctor Eleuterio

ORCID: 0000-0002-2518-8201

Lima, Perú

2022

Metadatos Complementarios

Datos del autor(es)

Calizaya Carazas, Aldo Adrian

DNI: 46357011

De la Fuente Chavez Chuchón, Alberto Alonzo

DNI: 47867226

Datos de asesor

Arévalo Lay, Víctor Eleuterio

DNI: 04434662

Datos del jurado

JURADO 1

Támara Rodríguez, Joaquín Samuel

DNI: 31615059

ORCID: 0000-0002-4568-9759

JURADO 2

Huamán Guerrero, Néstor Wilfredo

DNI: 10281360

ORCID: 0000-0002-7722-8711

JURADO 3

Pereyra Salardi, Enriqueta

DNI: 06743824

ORCID: 0000-0002-6949-1317

Datos de la investigación

Campo del conocimiento OCDE: 02.01.01

Código del Programa: 732016

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mis padres, abuelos y hermano quienes me brindaron consejos, apoyo y conocimientos a lo largo de mis años de estudio.

Aldo Adrian Calizaya Carazas

Esta tesis está dedicada a mis padres que son el motor de mi vida, a mis hermanos por sus consejos y a mi pareja por su apoyo incondicional durante mi proceso de aprendizaje.

Alberto Alonzo De La Fuente Chavez
Chuchón

AGRADECIMIENTO

Nuestro agradecimiento a la Universidad Ricardo Palma por ser nuestra alma mater, así como al Mg. Ing. Víctor Arévalo y al Dr. Ing. Joaquín Támara por brindarnos los consejos para desarrollar esta tesis.

Aldo Calizaya y Alberto De La Fuente

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
INTRODUCCIÓN	iii
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1. Descripción y formulación del problema general y específicos	1
1.1.1. Descripción del problema.....	1
1.1.2. Formulación del problema general y específicos	2
1.2. Objetivo general y específico	3
1.3. Justificación e importancia	3
1.3.1. Justificación.....	3
1.3.1.1. Justificación social	3
1.3.1.2. Justificación teórica.....	4
1.3.1.3. Justificación metodológica	4
1.3.2. Importancia.....	4
1.4. Delimitación de la investigación.	4
1.4.1. Delimitación temporal	4
1.4.2. Delimitación espacial	4
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	5
2.1. Antecedentes del estudio de investigación	5
2.1.1. Marco Histórico.....	5
2.2. Investigaciones relacionadas con el tema	5
2.2.1. Investigaciones internacionales.....	5
2.2.2. Investigaciones nacionales	6
2.3. Estructura teórica y científica que sustenta el estudio	7
2.3.1. Agregado Mineral	7
2.3.2. Agregados en mezclas asfálticas	7
2.3.2.1. Especificaciones técnicas	8
2.3.3. Asfalto	11
2.3.3.1. Cementos asfálticos.....	11
2.3.3.2. Temperatura de aplicación de material bituminoso	15
2.3.4. Mezclas asfálticas.....	15
2.3.4.1. Clasificación de mezclas asfálticas	16

2.3.5. Mezclas asfálticas en caliente	18
2.3.5.1. Evolución de las mezclas asfálticas en caliente	19
2.3.6. Método Marshall para diseño de mezclas	20
2.3.7. Viscosidad – temperatura del asfalto	21
2.3.8. Contenido de vacíos en mezclas asfálticas	23
2.3.9. Compactación de mezclas asfálticas	24
2.3.10. Factores que afectan la compactación	26
2.3.10.1. Propiedades de la mezcla	26
2.3.10.2. Condiciones ambientales	27
2.3.10.3. Espesor de la capa	27
2.3.10.4. Temperatura de compactación	28
2.3.11. Condiciones del sitio	29
2.3.12. Criterios de aceptación de la carpeta asfáltica	29
2.3.12.1. Textura superficial	30
2.3.12.2. Tolerancia de la superficie	30
2.3.12.3. Densidad del proyecto	30
2.4. Control de calidad en mezclas asfálticas	32
2.4.1. Concepto de calidad	32
2.4.2. Sistema de calidad	33
2.4.3. Evolución de control de calidad de las mezclas asfálticas	34
2.4.4. Desarrollo del control de calidad de las mezclas asfálticas	35
2.4.5. El control de calidad en el diseño de la mezcla asfáltica	38
2.4.5.1. Control de los agregados	38
2.4.5.2. Control del ligante	39
2.4.5.3. Establecimiento de la fórmula de trabajo	40
2.4.5.4. El control de calidad en la fabricación	41
2.4.5.5. Controles en planta	41
2.4.5.6. Controles en mezcla fabricada	43
2.4.6. El control de calidad puesta en obra	44
2.4.6.1. Transporte	44
2.4.6.2. Extendido	45
2.4.6.3. Compactación	46
2.5. Definición de términos básicos	48

CAPÍTULO III: SISTEMA DE HIPÓTESIS	50
3.1. Hipótesis.....	50
3.1.1. Hipótesis general	50
3.1.2. Hipótesis específicas.....	50
3.2. Variables.....	50
3.2.1. Definición conceptual de las variables	50
3.2.2. Operacionalización de las variables	51
CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	52
4.1. Tipo y nivel.....	52
4.1.1. Tipo de investigación	52
4.1.2. Nivel de la investigación.....	52
4.2. Diseño de investigación.....	52
4.3. Población y muestra	52
4.3.1. Población.....	52
4.3.2. Muestra.....	53
4.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	53
4.4.1. Tipos de técnicas e instrumentos.....	53
4.4.2. Procedimientos para la recolección de datos.....	53
4.5. Técnicas para el procesamiento y análisis de la información	53
CAPÍTULO V: PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	54
5.1 Norma Peruana.....	54
5.1.1. Aceptación del trabajo.....	54
5.2 Normas de Sudamérica y Centroamérica.....	55
5.2.1. Norma de Chile	55
5.2.2. Norma de Bolivia	55
5.2.3. Norma de Brasil	55
5.2.4. Norma de Colombia	56
5.2.5. Norma de Ecuador.....	57
5.2.6. Norma de Paraguay	58
5.2.7. Norma de Costa Rica.....	58
5.3 Comparación de los valores de densidad y criterios de aceptación	59
5.3.1. Comparación de los valores de densidad	59
5.4 Análisis de resultados	68

5.5 Contratación de hipótesis	70
CONCLUSIONES	73
RECOMENDACIONES	74
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	75
ANEXOS.....	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Operacionalización de variables	51
Tabla 2 Norma Perú vs Norma Chile.....	59
Tabla 3 Norma Perú vs Norma Bolivia	60
Tabla 4 Norma Perú vs Norma Brasil.....	61
Tabla 5 Norma Perú vs Norma Colombia	62
Tabla 6 Norma Perú vs Norma Ecuador	63
Tabla 7 Norma Perú vs Norma Paraguay	64
Tabla 8 Norma Perú vs Norma Argentina	64
Tabla 9 Norma Perú vs Norma Venezuela	65
Tabla 10 Norma Perú vs Norma Costa Rica.....	66
Tabla 11 Criterios de aceptación	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Durabilidad del pavimento vs porcentaje de vacíos.....	2
Figura 2 Especificaciones técnicas para el agregado grueso de MAC	9
Figura 3 Especificaciones técnicas para el agregado fino de una MAC.....	10
Figura 4 Gradación de mezclas asfálticas en caliente.....	11
Figura 5 Elección del tipo de asfalto	12
Figura 6 Especificaciones del cemento asfáltico clasificados por penetración	13
Figura 7 Especificaciones del cemento asfáltico clasificados por viscosidad	14
Figura 8 Rangos de temperatura de aplicación.....	15
Figura 9 Estabilidad Marshall.....	21
Figura 10 Temperatura de mezcla y compactación	22
Figura 11 Proceso de compactación usando rodillo compactador estático	25
Figura 12 Compactación estática con rodillos neumáticos.....	26
Figura 13 Influencia de la temperatura de compactación	29
Figura 14 Relaciones entre la densidad de referencia.....	31
Figura 15 Curva de compactación típica	36
Figura 16 Transporte de mezcla asfáltica	45
Figura 17 Extendido de mezcla asfáltica	46
Figura 18 Compactación de mezcla asfáltica	47
Figura 19 Extracción de un espécimen para obtener espesor y compacidad.....	48
Figura 20 Parámetros de diseño Perú	54
Figura 21 Parámetros de diseño Chile	55
Figura 22 Parámetros de diseño Colombia	56
Figura 23 Parámetros de diseño Ecuador	57
Figura 24 Parámetros de diseño Paraguay	58

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 Porcentaje de compactación.....	57
--	----

RESUMEN

El objetivo de esta investigación es comparar los valores de compactación de mezclas asfálticas tanto en normas de Sudamérica y Centroamérica con la norma peruana y observar los diferentes criterios que hay en la evaluación y obtención de porcentaje de compactación en diferentes países.

En el Perú el ente regulador es el Ministerio de transportes y comunicaciones en cual nos indica en la norma llamada “Especificaciones técnicas generales para construcción” que el porcentaje aceptable para la compactación es no menor al 98% con respecto a la densidad de diseño de laboratorio, así tomamos este valor y lo comparamos con los valores que nos indican las diferentes normas de Chile, Bolivia, Ecuador, Colombia, Argentina, Paraguay y Costa Rica, obteniendo diferentes criterios de diseño para cada país en cual influyen el clima, el tráfico y el diseño.

Palabras clave: compactación, criterios de aceptación, comparación.

ABSTRACT

The objective of this research is to compare the compaction values of asphalt mixtures in both South American and Central American standards with the Peruvian standard and to observe the different criteria that exist in the evaluation and obtaining of compaction percentage in different countries.

In Peru, the regulatory entity is the Ministry of Transport and Communications, which indicates in the standard called "General technical specifications for construction" that the acceptable percentage for compaction is not less than 98% with respect to the laboratory design density. , so we take this value and compare it with the values indicated by the different standards of Chile, Bolivia, Ecuador, Colombia, Argentina, Paraguay and Costa Rica, obtaining different design criteria for each country which are influenced by climate, traffic and design.

Keywords: compaction, acceptance criteria, comparison.

INTRODUCCIÓN

En este trabajo se presentan el estudio de nueve normas de pavimentos flexibles que son de Perú, Chile, Bolivia, Brasil, Colombia, Ecuador, Paraguay, Argentina y Costa Rica. Para ellos se recurre a un análisis comparado entre la norma peruana y el resto de las normas, teniendo en cuenta los principales factores que inciden en los porcentajes de compactación del asfalto.

Se parte de la premisa que indica que la construcción de pavimentos requiere un conocimiento teórico, técnico y práctico detallado de los materiales involucrados, así como diferentes disposiciones en el manejo de técnicas y usos de estos materiales con el objeto de mejorar el comportamiento del pavimento en las condiciones adversas, por lo que es menester tener amplio conocimiento sobre las normas que lo disponen.

Es común que en el periodo de vida de los pavimentos flexibles se presenten problemas de fallas, factores climáticos, intensidad de tránsito, condiciones de drenaje y subdrenaje, etc. Estas fallas conllevan a que el pavimento requiera conservación y mantenimiento rápido y económico.

La investigación se soporta en el método comparativo. La meta de esta metodología es descubrir porque los casos son diferentes, a vez por medio de un abordaje de fortalezas, debilidades y similitudes entre las normas a estudiar.

El trabajo está estructurado en cinco capítulos, la primera de ellas está conformada por los capítulos preliminares, en donde se describen los objetivos, la justificación y el planteamiento del problema. El segundo capítulo corresponde al marco teórico o de referencia. En este se desglosan los conceptos básicos con los que se aborda las mezclas asfálticas y sus características y se describe el estado del arte en lo que hace referencia al estudio de estos. En el capítulo tres se aborda el sistema de hipótesis el cual está conformado por la hipótesis general e hipótesis específicas y también se definen las variables independiente y dependiente. El capítulo cuatro corresponde a la metodología a utilizar que corresponde al tipo de investigación, nivel de investigación, diseño de investigación, población y muestra y las técnicas a utilizar. El capítulo cinco corresponde a la presentación de resultados de la investigación, es decir a las comparativas entre la norma peruana y las diferentes normas tanto de Sudamérica como Centroamérica.

Finalmente, las conclusiones y recomendaciones se encuentran en la última parte de la sección del documento. Allí se sugieren acciones de tipo técnico para la mejora de las mezclas asfálticas en Perú, en especial al mejoramiento de la calidad de los materiales, composición, mezcla y manejo ambiental, todo en el marco de los resultados del estudio normativo comparado.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción y formulación del problema general y específicos

1.1.1. Descripción del problema

La compactación en las mezclas asfálticas es un proceso importante en la construcción de una carretera. Dorado, H., Guarín, A. (2004) afirma. “Una adecuada compactación incrementa la vida a fatiga, reduce deformación permanente, disminuye oxidación o envejecimiento, mitiga daño por humedad, incrementa resistencia y estabilidad y baja la posibilidad de agrietamiento por bajas temperaturas” (p.16).

Debido a esta importancia del proceso de la compactación, también es importante controlar la calidad de dicha compactación, ya que permitirá tener mayor control del proceso de compactación y en caso de existir variaciones en la densificación, poder tomar medidas correctivas en los equipos utilizados o en los factores que inciden en la compactación. (Laboratorio nacional de materiales y modelos estructurales, 2019)

MS-22 (1982) dice al respecto que:

La compactación correcta de las mezclas asfálticas se vuelve una necesidad, ya que al lograr una densidad óptima se consideran los efectos del agua, del aire y el tránsito sobre la mezcla compactada. Los vacíos de aire permiten el ingreso del agua y el aire, y estos al contener oxígeno en su composición reaccionan con el ligante asfáltico produciendo oxidación, debilitando la estructura del pavimento por las deformaciones constantes causadas por el tráfico, generando fallas. Así también, el agua interna, al enfrentar temperaturas bajo cero, incrementa su volumen, generando falla prematura del pavimento. Un pavimento que no presenta una buena compactación presentará huellas o surcos debido a las deformaciones causadas por el tránsito, por lo que el contenido de vacíos es otro factor importante, el contenido óptimo de un pavimento nuevo es de 8% por lo que, un valor menor a este generará inestabilidad por afloramiento, así también un valor mayor al 8% producirá desmoronamiento y agrietamiento prematuro en el pavimento causado por el tráfico (Ver Figura 1)

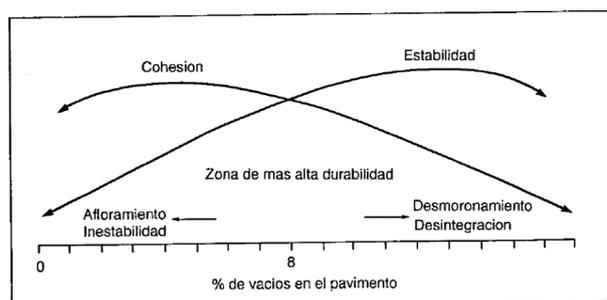


Figura 1 Durabilidad del pavimento vs porcentaje de vacíos

Fuente: Manual MS-22 Instituto del asfalto (1982)

El comportamiento físico de una estructura vial depende en gran medida del diseño de mezcla asfáltica, de este diseño obtenemos la gradación más adecuada y su gran proporción de asfalto, que aportan firmeza, estabilidad y una buena distribución de fuerzas que garantizan un buen desempeño en la estructura de la capa asfáltica. Sin embargo, estos proyectos se llevan a cabo en condiciones ideales para la preparación de muestras. Hay variables en el proceso de construcción del pavimento que pueden afectar estas condiciones óptimas del diseño original, una variable demasiado compleja para garantizar el porcentaje de compactación, pero: ¿qué tan importante es la compactación que se ha aplicado a la mezcla en el momento de la instalación? teniendo en cuenta que debido a condiciones relacionadas con el diseño, como el grado de compactación de las mezclas asfálticas el cual es menor del 100%, por qué es necesario establecer la influencia que puede tener la densidad, y su índice de vacíos dado por su grado de compactación en una mezcla asfáltica.

1.1.2. Formulación del problema general y específicos

Problema general:

¿Cuáles son los valores de compactación de mezclas asfálticas en centro y

Sudamérica según los criterios de aceptación?

Problemas específicos:

- a) ¿Cuál es el valor mínimo y máximo de la densidad en la mezcla asfáltica en la norma peruana comparada con las normas de centro y Sudamérica?
- b) ¿Cuáles son los criterios de aceptación establecidos en la norma peruana comparados con los criterios de aceptación de las normas de centro y Sudamérica?

1.2. Objetivo general y específico

Objetivo general:

Comparar los valores de compactación de mezclas asfálticas en centro y Sudamérica según los criterios de aceptación, año 2022.

Objetivos específicos:

- a) Establecer el valor mínimo y máximo de la densidad en la mezcla asfáltica según la norma peruana para compararlo con los valores establecidos en las normas de centro y Sudamérica.
- b) Analizar los criterios de aceptación de la norma peruana para compararlos con los criterios de aceptación de las normas de centro y Sudamérica.

1.3. Justificación e importancia

1.3.1. Justificación

Un mayor entendimiento de la importancia de la compactación en las mezclas asfálticas permitirá que los pavimentos tengan un mejor comportamiento estructural, ya que los factores que influyen en el proceso de compactación no siempre son controlados y estos causan la poca durabilidad de los pavimentos.

1.3.1.1. Justificación social

Es importante entender que una carretera significa que existe comunicación entre la gente que vive en todo el tramo de la carretera, por lo tanto, que cuenten con una carretera que cumpla con un buen desempeño mejorará la calidad de vida de ellos.

1.3.1.2. Justificación teórica

Un entendimiento de la importancia de la compactación permitirá un mayor énfasis en este proceso, llevando así a un pavimento con mejor desempeño, lo que prolongará la vida del pavimento, siendo capaz de resistir los constantes esfuerzo a los que será sometido.

1.3.1.3. Justificación metodológica

La comparación de los valores de compactación con los demás países de la región centro y Sudamérica permitirá tener una mejor perspectiva de la toma de decisiones al momento de elegir los valores que permitirán el buen desempeño del pavimento.

1.3.2. Importancia

Este trabajo de investigación es importante porque realiza una comparación de la norma técnica peruana con las normas de otros países ubicados en la zona centro y sur de américa para tener en contexto como nos encontramos en relación a estos países.

1.4. Delimitación de la investigación.

El presente trabajo se basa en la comparativa de normas de la región centro y sur de américa por lo que las consideraciones de otra norma que no sea de la región serán tomadas como información adicional más no es objeto de estudio.

1.4.1. Delimitación temporal

El presente trabajo toma como objeto de estudio las normas que son vigentes hasta el año 2022, por lo que consideraciones pasadas que no estén vigentes en las normas no estarán consideradas.

1.4.2. Delimitación espacial

El presente trabajo se enfocará en la región centro y sur de américa, ya que al tener similitud de experiencias tanto geográficas como sociales, hace más fácil la comparativa de sus normas. Así también, los métodos sugeridos en sus normativas son muy parecidos a los usados por la norma peruana debido a lo anteriormente sobre la similitud de sus características.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del estudio de investigación

2.1.1. Marco Histórico.

En el Perú, es conocido que la brecha de infraestructura vial es muy amplia, con solo decir que solo el 16% de las carreteras en todo el país están pavimentadas (MTC,2019).

Esto quiere decir que existen muchos lugares donde transportarse es una tarea complicada y más teniendo en cuenta que la intercomunicación entre ciudades es vital para el desarrollo de un país, ya que permite el comercio fluido entre dichas ciudades, por lo tanto, El gobierno e instituciones internacionales nos brindan parámetros para la construcción de pavimentos, así como para su control de calidad, mantenimiento, etc. (Hernández y Ramírez, 2016)

2.2. Investigaciones relacionadas con el tema

2.2.1. Investigaciones internacionales

Silvestre A. (2015) en su trabajo titulado “Estudio comparativo de las normas técnicas para la construcción de pavimentos flexibles en Colombia y Brasil” realiza un estudio comparativo con respecto a las especificaciones y requisitos tanto en materiales, equipos, procesos constructivos y valores de aceptación según las norma de Colombia y la norma de Brasil, obteniendo muchas similitudes en base a los fundamentos básicos tomados del manual AASHTO , salvo excepciones con respecto a algunos requerimientos de los ensayos a los materiales.

Maldonado, J. Pozo, J. (2022) en su trabajo de tesis titulado “Comparación entre parámetros Marshall de mezclas asfálticas en caliente, obtenidos sobre muestras taladradas y briquetas compactadas en sitio” realiza una comparación entre briquetas fabricadas en el sitio y núcleos extraídos, uno de sus resultados fue la menor densidad bulk promedio en los núcleos extraídos con valor de 2.1439 en comparación a las briquetas que obtuvieron un valor de densidad bulk de 2.2544, lo que muestra una falla en la mezcla asfáltica, en cambio, la densidad teórica máxima usando la fórmula 1 es mayor en los núcleos 2.424 en comparación a las briquetas compactadas manualmente con un valor de 2.3351, usando la fórmula 2 la densidad teórica máxima en los

núcleos es de 2.4424 en comparación a las briquetas con un valor de 2.3498. También se observó que el volumen de vacíos de agregados minerales fue mayor en los núcleos extraídos lo que confirma una mala compactación ya que no se llegaron a los valores deseados comparados con los valores de vacíos de las briquetas fabricadas en campo.

Hernández, G., Ramírez, F. (2016) en su investigación titulada “Análisis de la influencia del grado de compactación de una mezcla asfáltica en su deformación permanente y la susceptibilidad a la humedad” estudian el nivel de desarrollo de un pavimento, analizando los valores de compactación y como estos influyen en el desempeño del pavimento flexible, no llegando a su estado óptimo en los casos que no se cumplía con el requerimiento mínimo de porcentaje de compactación.

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (2019) en el informe realizado para el gobierno de Costa Rica llamado “Evaluación de los procesos de compactación de la mezcla asfáltica colocada en los proyectos de conservación vial” se hace un estudio de la variabilidad de los valores de compactación en un proyecto vial, en el cual se contaban con varias plantas de asfalto, por lo tanto se hizo un análisis del cumplimiento del porcentaje de compactación que este dentro del rango de su normativa correspondiente, que en este caso el rango del porcentaje de 92% al 97% de la densidad de diseño obtenida mediante el ensayo Marshall. Al tener como resultado que el 50% de las zonas de estudio cumplen con las especificaciones.

2.2.2. Investigaciones nacionales

Arellano, L., Caceres, C. (2018) en su trabajo de investigación titulado “Importancia de la evaluación a las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas en caliente a más de 3000 msnm para el proyecto carretera desvío Imperial- Pampas” estudia el proceso de construcción de la carretera, buscando aquellos factores influyentes determinados por las condiciones climáticas y la geografía. Un factor importante fue la variación dentro de los valores de absorción del material pétreo ya que, a pesar de pertenecer a la misma cantera, tenían una variación con respecto a los obtenidos en el laboratorio. También se tuvo consideración en mantener una temperatura de compactación entre 120°C a 130°C ya que por las bajas temperaturas del

ambiente era un factor importante a tomar en cuenta. Debido a las condiciones adversas se determinó el uso de rodillos inteligentes a fin de obtener los grados de compactación en menos tiempo, permitiendo que se realice la compactación en la temperatura ideal.

Vargas, E. (2019) en su trabajo de investigación que lleva por título “Efecto de la temperatura de mezcla-compactación y la distancia de transporte en las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica en caliente en la región centro” determina las propiedades mecánicas óptimas necesarias para el diseño de la mezcla asfáltica de una carretera a ejecutarse en la zona centro del Perú, realizando ensayos de laboratorio a 130 briquetas con distintos porcentajes de asfalto y distintas temperaturas de mezcla y compactación así como la influencia del tiempo de transporte desde la planta de fabricación de la mezcla bituminosa. Con la finalidad de obtener la temperatura adecuada que cumpla con las propiedades de diseño, como resultado del trabajo de investigación la temperatura mínima de compactación fue de 138.5°C teniendo en cuenta que se analizaron las propiedades de los agregados obtenidos de la cantera Matahuasi.

2.3. Estructura teórica y científica que sustenta el estudio

2.3.1. Agregado Mineral

Material pétreo, proviene de la descomposición del lecho rocoso. El árido pétreo que se utilice en la ejecución de una mezcla bituminosa deberá ser de tal naturaleza que al aplicarse una cubierta de material asfáltico no se desprenda por exposición al agua y al tráfico. Solo se autoriza el uso de árido con propiedades hidrofílicas si se le añade un aditivo de probada eficacia para asegurar una buena adherencia.

2.3.2. Agregados en mezclas asfálticas

Los agregados de mezcla asfáltica en caliente generalmente se clasifican como agregado grueso, agregado fino o relleno mineral. ASTM define los agregados gruesos como partículas retenidas en un tamaño de malla #4 (4,75 mm); y una carga mineral como material que atraviesa la malla #200 (0.075mm) con un porcentaje mínimo del 70%.

Las especificaciones para agregados de relleno grueso, fino y mineral se dan en las normas ASTM D-692, D-1073 y D-242, respectivamente. Los agregados adecuados para su uso en mezclas asfálticas se determinan evaluándolos para las siguientes propiedades mecánicas:

1. Tamaño y gradación
2. Limpieza / materiales deletéreos
3. Tenacidad / dureza
4. Durabilidad / resistencia
5. Textura superficial
6. Forma de partículas
7. Absorción

2.3.2.1. Especificaciones técnicas

Los agregados serán considerados gruesos si cumplen las siguientes características de la Figura 2, que corresponde a la tabla 403.B-01 del Manual de carreteras del MTC.

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

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

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

Figura 2 Especificaciones técnicas para el agregado grueso de MAC

Fuente: Manual de carreteras del MTC (2013, p. 189)

Para el agregado fino se debe cumplir las siguientes especificaciones de la Figura 3, que corresponde a la tabla 403.B-02 del Manual de carreteras del MTC.

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.º 40)	MTC E 111	NP	NP
Durabilidad (al Sulfato de Magnesio)	MTC E 209	-	18% máx.
Índice de Durabilidad	MTC E 214	35 mín.	35 mín.
Índice de Plasticidad (malla N.º 200)	MTC E 111	4 máx.	NP
Sales Solubles Totales	MTC E 219	0,5% máx.	0,5% máx.
Absorción* *	MTC E 205	0,5% máx.	0,5% máx.

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

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

Figura 3 Especificaciones técnicas para el agregado fino de una MAC

Fuente: Manual de carreteras del MTC (2013, p. 190)

La calidad de los áridos a utilizar en mezclas bituminosas debe ser libre de grumos arcillosos y se acepta como máximo un 1% de partículas quebradizas según el ensayo MTC E 212, y no deben contener materia orgánica ni contaminante. La clasificación de combinaciones de agregados, como agregados finos y gruesos, debe estar de acuerdo con las Condiciones Técnicas Generales para la Construcción de Carreteras que se deben cumplir en la Figura 4 que corresponde a la tabla 423-03 del Manual de carreteras del MTC.

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

Figura 4 Gradación de mezclas asfálticas en caliente

Fuente: Manual de carreteras del MTC (2013, p. 266)

2.3.3. Asfalto

ASTM lo define como un material cementoso de color oscuro de consistencia variable cuya rigidez depende de la temperatura a la que se encuentre. El asfalto es de sólido a semisólido a temperatura ambiente y se vuelve líquido a medida que aumenta la temperatura, lo que permite que el agregado se cubra por completo cuando se mezcla. (Universidad Nacional de Ingeniería, 2006)

El asfalto utilizado para pavimentación, comúnmente conocido como cemento bituminoso, es poco rígido a alta temperatura (135 °C), condición que le permite adherirse fácilmente a las partículas de árido, por lo que es un excelente agregado cementante en mezclas asfálticas en caliente. (Universidad Nacional de Ingeniería, 2006)

2.3.3.1. Cementos asfálticos

El cemento asfáltico para uso en riego con ligantes y mezcla asfáltica en caliente se clasifica por viscosidad absoluta y penetración. Su uso se realiza de acuerdo con las características climáticas de la región, la tabla de viscosidad del cemento bituminoso correspondiente y lo indicado en la Figura 5 que corresponde a la tabla 415-01 del Manual de carreteras del MTC.

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

Figura 5 Elección del tipo de asfalto

Fuente: Manual de carreteras del MTC (2013, p.222)

Los requisitos de calidad del cemento asfáltico son los especificados en las Figura 6 y 7 que corresponden a las tablas 415-02 y 415-03 respectivamente del Manual de carreteras del MTC. El cemento asfáltico debe tener un aspecto homogéneo, estar libre de agua y no formar espuma cuando se calienta a una temperatura de 175°C.

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

(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 clasificados por penetración

Fuente: Manual de carreteras del MTC (2013, p.223)

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

(1) Porcentajes de solvente a usar, se determinara si el resultado del ensayo indica positivo.

Figura 7 Especificaciones del cemento asfaltico clasificados por viscosidad

Fuente: Manual de carreteras del MTC (2013, p.223)

2.3.3.2. Temperatura de aplicación de material bituminoso

El material bituminoso para utilizar en las distintas obras de acuerdo a las especificaciones respectivas deberá ser aplicado dentro de los rangos del diagrama viscosidad-temperatura (ASTM D341) definido en el proyecto y aprobado por el contratista principal. Se respetan los rangos de temperatura de aplicación especificados en la Figura 8 que corresponde a la tabla 415-07 del Manual de carreteras del MTC.

Tipo y Grado del Asfalto	Temperaturas de Esparcido ⁽²⁾		Temperaturas de Mezclado en Planta ⁽¹⁾	
	Mezclas in situ	Tratamientos superficiales	Mezclas Densas	Mezclas Abiertas
Asfaltos Diluidos				
MC-30	--	30	--	--
RC-70 o MC-70	20	50	--	--
RC-250 o MC-250	40	75	55-80	--
RC-800 o NC-800	55	95	75-100	--
Emulsiones Asfálticas				
CRS-1	--	50-85	--	--
CRS-2	--	50-85	--	--
CMS-2	20-70	--	10-70	--
CMS-2h, CSS-1, CSS-1h	20-70	--	10-70	--
Cemento Asfáltico	140 máx (4)		140 máx (4)	
Todos los grados	140 máx (4)		140 máx (4)	

(1) Temperatura de mezcla inmediatamente después de preparada.

(2) La Máxima temperatura deberá estar debajo de aquella en la que ocurre vapores o espuma

(3) En algunos casos la temperatura de aplicación puede estar por encima del punto de inflamación. Por tanto se debe tener precaución para prevenir fuego o explosiones.

(4) Se podrá variar esta temperatura de acuerdo a la carta de viscosidad-temperatura

Fuente: MS-16-Asphalt Institute

Figura 8 Rangos de temperatura de aplicación

Fuente: Manual de carreteras del MTC (2013, p.230)

2.3.4. Mezclas asfálticas

El concreto asfáltico, conocido por sus siglas en inglés HMA (Hot Mix Asphalt), es un material usado para la pavimentación que está conformado por un ligante asfáltico y el agregado mineral, resultando de esta mezcla una masa

cohesiva que actúa como una estructura pétreo que brinda resistencia y rigidez a la mezcla, dicha mezcla es afectada por las propiedades individuales y su interrelación. (Horacio Delgado, Paul Garnica, Carlos Sandoval, 2005).

Hay tres métodos de diseño utilizados para determinar las proporciones correctas de asfalto y agregado. El método Marshall y el método HVEEM, el método utilizado actualmente en los Estados Unidos es el método SUPERPAVE, ya que asume que la metodología de diseño se basa en pruebas más reales y científicas, en lugar de pruebas empíricas como la del método Marshall; debido a las condiciones económicas, países como el nuestro continúan utilizando el método Marshall. (Santa Cruz, y otros, 2012)

Las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90 % de agregados pétreos grueso y fino, un 5% de polvo mineral (filler) y otro 5% de ligante asfáltico. Los componentes mencionados anteriormente son de gran importancia para el correcto funcionamiento del pavimento y la falta de calidad en alguno de ellos afecta el conjunto. El ligante asfáltico y el polvo mineral son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en su costo total. (Alejandro Padilla Rodríguez, 2004)

2.3.4.1. Clasificación de mezclas asfálticas

Según Alejandro Padilla Rodríguez en su manual Mezclas Asfálticas, Existen varios parámetros de clasificación para establecer las diferencias entre las distintas mezclas y las clasificaciones pueden ser diversas:

- a) Por Fracciones de agregado pétreo empleado.
 - Masilla asfáltica: Polvo mineral más cemento asfáltico.
 - Mortero asfáltico: Agregado fino más masilla.
 - Concreto asfáltico: Agregado grueso, agregado fino, polvo mineral y cemento asfáltico.
 - Macadam asfáltico: Capa de rodadura formada por una sucesión de capas de mezcla asfáltica con materiales pétreos de diferentes granulometrías, colocando las de mayor granulometría abajo, y arriba la de menor granulometría. Luego se procede a la compactación con rodos y camiones.

- b) Por la Temperatura de puesta en obra.
- Mezclas asfálticas en Caliente: El concreto asfáltico mezclado
 - Mezclas asfálticas en Frío: El ligante suele ser una emulsión asfáltica (debido a que se sigue utilizando en algunos lugares los asfaltos fluidificados), y la puesta en obra se realiza a temperatura ambiente.
 - Mezclas asfálticas Tibias: Las mezclas tibias se describen como aquellas que se producen a temperaturas menores que las mezclas en caliente, es decir entre 100°C y 135°C, su producción involucra nuevas tecnologías a partir de las cuales es posible producir y colocar los concretos asfálticos a temperaturas sensiblemente inferiores a las técnicas convencionales. El concepto de mezcla tibia surgió en Europa, tras la necesidad de una mezcla bituminosa que ofreciera economía de energía y tuviera el mismo desempeño de las mezclas asfálticas en caliente.
- c) Por la proporción de Vacíos en la mezcla asfáltica.
- Este parámetro suele ser imprescindible para que no se produzcan deformaciones plásticas como consecuencia del paso de las cargas y de las variaciones térmicas.
- Mezclas Cerradas o Densas: contienen cantidades de agregados en proporciones adecuadas de todos los tamaños, de grueso a fino, incluyendo filler, proporcionados de tal forma de obtener una mezcla densa con pocos vacíos. La proporción de vacíos no supera el 5 %. Las mezclas densamente graduadas tienen un gran número de puntos de contacto entre las partículas, que pueden dar una alta resistencia friccional y reducir la posibilidad de trituración de las partículas en los puntos de contacto. Como el contenido de vacíos es bajo son poco permeables. En las mezclas asfálticas en caliente, deben preferirse agregados con granulometría densa, o muy cercana a la densa.
 - Mezclas Semi-cerradas o Semi-densas: La proporción de vacíos está entre el 5 % y el 10%.
 - Mezclas Abiertas: La proporción de vacíos supera el 12 %.
 - Mezclas Porosas o Drenantes: Mezclas asfálticas utilizadas como carpeta de rodadura, que se caracteriza por tener un elevado

porcentaje de huecos interconectados entre sí. Permitiendo el paso del agua a través de la mezcla y su rápida evacuación hacia las zonas laterales fuera de las calzadas. La proporción de vacíos es superior al 20 %.

- d) Por el Tamaño máximo del agregado pétreo.
 - Mezclas Gruesas: Donde el tamaño máximo del agregado pétreo excede los 10 mm.
 - Mezclas Finas: También llamadas micro aglomerado, pueden denominarse también morteros asfálticos, pues se trata de mezclas formadas básicamente por un agregado fino incluyendo el polvo mineral y un ligante asfáltico. El tamaño máximo del agregado pétreo determina el espesor mínimo con el que ha de extenderse una mezcla que vendría a ser del doble al triple del tamaño máximo.
- e) Por la Estructura del agregado pétreo.
 - Mezclas con Esqueleto mineral: Poseen un esqueleto mineral resistente, su componente de resistencia debida al rozamiento interno de los agregados es notable. Ejemplo, las mezclas abiertas y los que genéricamente se denominan concretos asfálticos, aunque también una parte de la resistencia de estos últimos se debe a la masilla.
 - Mezclas sin Esqueleto mineral: No poseen un esqueleto mineral resistente, la resistencia es debida exclusivamente a la cohesión de la masilla. Ejemplo, los diferentes tipos de masillas asfálticas.
- f) Por la Granulometría.
 - Mezclas Continuas: Una cantidad muy distribuida de diferentes tamaños de agregado pétreo en el uso granulométrico (Zona comprendida entre dos curvas granulométricas).
 - Mezclas Discontinuas: Una cantidad muy limitada de tamaños de agregado pétreo en el uso granulométrico.

2.3.5. Mezclas asfálticas en caliente

Representa el tipo más común de mezcla asfáltica y se define como la combinación de un ligante de hidrocarburo, agregados que comprenden polvos minerales y posiblemente aditivos, de modo que todas las partículas de

agregado están muy bien cubiertas por una película homogénea. de aglutinante Su proceso de fabricación implica el calentamiento del conglomerante y los áridos (excepto posiblemente el polvo de yeso mineral) y su instalación debe realizarse a una temperatura muy superior a la temperatura ambiente. (Pliego de Prescripciones Técnicas Generales art. 542 y 543 PG-3.)

2.3.5.1. Evolución de las mezclas asfálticas en caliente

A continuación, se muestra la evolución de los métodos de diseños de mezclas asfálticas en caliente.

- The Hubbard-Field (1920's). Método de diseño de mezclas asfálticas, fue uno de los primeros métodos en evaluar contenidos de vacíos en la mezcla y en el agregado mineral. Usaba una estabilidad como prueba para medir la deformación. Funcionó adecuadamente para evaluar mezclas con agregado pequeño o granulometrías finas, pero no también para mezclas con granulometrías que contenían agregados grandes.
- Método Marshall (1930's). Método de diseño de mezclas asfálticas, desarrollado durante la 2da. Guerra Mundial y después fue adaptado para su uso en carreteras. Utiliza una estabilidad y porcentaje de vacíos como pruebas fundamentalmente. Excepto cambios en las especificaciones, el método no ha sufrido modificación desde los años 40's.
- Método Hveem (1930's). Método de diseño de mezclas asfálticas, desarrollado casi en el mismo tiempo que el método Marshall. Evalúa una estabilidad pseudo triaxial.
- Método de la Western Association of State Highway on Transportation Officials. WASHTO (1984). Este método de diseño de mezclas recomendó cambios en los requerimientos del material y especificaciones de diseño de mezclas para mejorar la resistencia al ahuellamiento (efectos de deformación acumulada).
- Método de Asphalt Aggregate Mixture Analysis System. AAMAS (1987). La necesidad de cambios en el diseño de mezclas fue reconocida, tardaron 2 años para desarrollar un nuevo proyecto

para el diseño de mezclas, que incluía un nuevo método de compactación en laboratorio y la evaluación de las propiedades volumétricas, desarrollo de pruebas para identificar las deformaciones permanentes, grietas de fatiga y resistencia de grietas a baja temperatura.

- Método SUPERPAVE (1993). El método AAMAS, sirvió como punto de inicio del método SUPERPAVE, que contiene un nuevo diseño volumétrico completo de mezcla, con funcionamiento basado en predicción a través de modelos y métodos de ensayo en laboratorio, grietas por fatiga y grietas por baja temperatura. Los modelos de predicción de funcionamiento fueron completados satisfactoriamente hasta el año 2000. Ahora la aceptación en el control de calidad ha sido cambiada a propiedades volumétricas. SUPERPAVE promete un funcionamiento basado en métodos o ensayos de laboratorio que pueden ser usados para identificar la resistencia a las deformaciones plásticas de los pavimentos.

2.3.6. Método Marshall para diseño de mezclas

El criterio del procedimiento Marshall fue creado por BRUCE MARSHALL, ex-Ingeniero de bitúmenes del Departamento de Rutas del Estado de Mississippi.

El Ensayo Marshall, surgió de una exploración iniciada por el Cuerpo de Ingenieros del Batallón de los USA en 1943. Numerosos procedimientos para el diseño y control de mezclas asfálticas fueron comparados y evaluados para desarrollar un procedimiento fácil.

El procedimiento usa probetas normalizadas de 2.5 pulgadas (6.35 cm) de altura y 4 pulgadas (10.16cm) de diámetro. Se organizan empleando un trámite especificado para calentar, combinar y compactar la mezcla de asfalto y agregados. Los dos puntos claves del procedimiento Marshall son un examen de las relaciones entre consistencia y volumen de huecos y un ensayo para la determinación de la seguridad y fluencia de las probetas compactado. La estabilidad del espécimen de prueba es la máxima resistencia en N (lb) que desarrolla cuando es ensayado a una temperatura de 60° C. El valor de flujo es el movimiento total o deformación, en unidades de 0.25 mm (1/100”), que

ocurre en el espécimen entre estar sin carga y el punto máximo de carga durante la prueba de estabilidad. (Martínez Hernández, 2014)

El método de diseño de Marshall solo instaure requisitos para la granulometría y los parámetros volumétricos de la MAC. Los requisitos de calidad del agregado y del asfalto los fijan las instituciones encargadas del desarrollo de la infraestructura; en el caso de Perú, El Ministerio de Transporte y Comunicaciones (MTC) es el organismo que establece los requisitos que deben cumplirse para diseño y control de MAC.

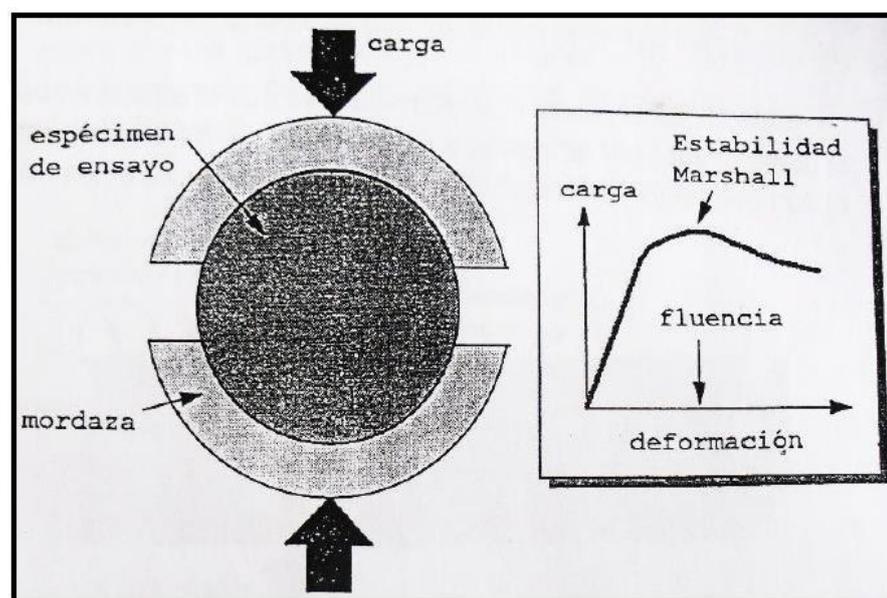


Figura 9 Estabilidad Marshall

Fuente: Martínez Hernández (2014, p.24)

2.3.7. Viscosidad – temperatura del asfalto

Durante muchos años, los métodos de diseño de HMA han utilizado el concepto de temperatura de equiviscosidad para seleccionar las temperaturas óptimas de mezcla y compactación en el laboratorio.

En el manual MS-2 del Asphalt Institute, Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot-Mix Types, el proceso de diseño de Marshall recomienda las temperaturas de mezcla y compactación a las que se debe calentar el asfalto, en función de los rangos de viscosidad de Furol de Saybolt, para moverse más adelante a un método más racional de medir la viscosidad

en centipoises, recomendándose 170 ± 20 centipoises para la temperatura de mezcla y 280 ± 30 centipoises para la temperatura de compactación.

Hasta ahora, se han recomendado los mismos rangos de viscosidad para el diseño compuesto, excepto que las unidades se han convertido al sistema métrico en pascales.segundos, que es $0,17 \pm 0,02$ Pa.s. y $0,28 \pm 0,03$ Pa.s.

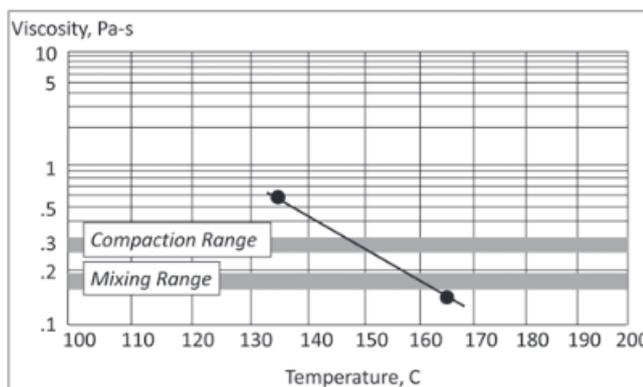


Figura 10 Temperatura de mezcla y compactación

Fuente: Manual de Instituto del asfalto MS-2 (2014, p. 35)

El uso de temperaturas de equiviscosidad para el mezclado y la compactación en los procedimientos de diseño de asfalto tiene por objeto normalizar el efecto de la viscosidad del asfalto en las propiedades volumétricas del asfalto. En el caso de una planta mezcladora de asfalto, la producción de una mezcla asfáltica con un asfalto duro se realiza aumentando la temperatura de mezcla hasta alcanzar el mismo grado de cobertura de los áridos que con un asfalto más blando. Las temperaturas de mezcla y densificación se pueden obtener usando el viscosímetro Brookfield como se especifica en la especificación ASTM D 4402. Las mediciones de viscosidad a dos o más temperaturas (por ejemplo, 135 y 160 °C) se almacenan en un gráfico logarítmico. logaritmo de la viscosidad en centipoises en función de la temperatura en Rankine. Las temperaturas recomendadas obtenidas con este método solo están destinadas al diseño de mezclas en el laboratorio. Para las temperaturas de mezcla y compactación de carreteras, el Asphalt Institute recomienda usar una pista de prueba para determinar la temperatura de compactación más baja a la que se puede lograr la densidad deseada. La temperatura de compactación en el sitio

está influenciada por la temperatura del aire, la temperatura del suelo, la velocidad del viento, la distancia de transporte de la mezcla, el espesor, entre otros, capa asfáltica, equipos de compactación, etc. El procedimiento descrito sólo se aplica a la mezcla directamente extraída sin ninguna modificación. El Instituto del Asfalto recomienda temperaturas de mezcla ligeramente superiores a las temperaturas de compactación alcanzadas en una sección de prueba, pero que no excedan los 170 °C.

Actualmente está muy extendido el uso de viscosímetros rotacionales, que permiten determinar la viscosidad de ligantes bituminosos a diferentes temperaturas. Hemos visto la susceptibilidad térmica de la mezcla o índice de penetración: podemos determinarla utilizando el diagrama de Heukelom que, para su determinación, requiere datos de penetración a dos temperaturas diferentes, a saber, la penetración a 25°C y el punto de reblandecimiento de la mezcla.

2.3.8. Contenido de vacíos en mezclas asfálticas

Uge y Van de Loo (1974) encontraron que los movimientos relativos de las partículas de los minerales se forman cuando la mezcla asfáltica se manipula a altas temperaturas (durante expansión y sedimentación de la mezcla) o a temperatura moderada, pero también por largas cargas sucede de la misma manera. Por lo tanto, para minimizar la propensión a la formación de surcos, recomiendan usar asfalto rugoso (que afecta la cierta maniobrabilidad) y rodillos pesados para la compactación. La combinación da un marco mineral muy estable y aumenta la fricción interna. Concluyeron que las mezclas crudas son muy resistentes a deformaciones plásticas después de la compactación durante la instalación de la capa.

Monsmith et al. (1994) observaron que un aumento en el contenido de vacíos en mezcla provoca una reducción en la resistencia de la mezcla a la deformación plástica. Se realizaron varios ensayos de compresión axial con fluencia y aunque las mezclas se comportaron de manera significativamente diferente, su módulo instantáneo fue muy similar. Finalmente, los compuestos con bajo contenido de vacíos se desempeñaron mejor que los compuestos con una alta proporción de vacíos.

Linden y Van Der Heide (1987) enfatizaron la importancia de la compactación y llegó a la conclusión de que el grado de compactación es uno de los parámetros de calidad más importantes de mezclas in situ, especialmente para diseños críticos (como un bajo contenido de asfalto para aumentar la resistencia a las roderas). buen diseño y la preparación de la mezcla aumenta la durabilidad y las propiedades mecánicas de las mezclas, sin descuidar la compactación adecuada.

Cabe mencionar que la compactación es un factor crítico en la fabricación de muestras para evaluación de laboratorio. Debe tratar de simular y reproducir en lo posible la compactación en el campo en condiciones reales.

En los casos en que el diseño de las mezclas deba incluir parámetros sobre los porcentajes mínimos y máximo aceptable de vacíos tanto en la mezcla como en los agregados minerales para asegurar el desempeño adecuado del pavimento durante la construcción el tiempo de servicio.

2.3.9. Compactación de mezclas asfálticas

La compactación de mezclas asfálticas es un proceso en el que la mezcla es comprimida mediante la aplicación de una carga con un rodillo, por lo tanto este disminuye su volumen e incrementa su densidad, esto causa que se disminuya el porcentaje de vacíos de la mezcla, factor importante en el desarrollo del pavimento, por lo tanto si se realiza un adecuado proceso de compactación, la mezcla aumenta su resistencia a la fatiga, disminuye su deformación permanente, reduce oxidación, incrementa estabilidad (US Army Corps of Engineers, 2000).

Es un proceso que determina cómo será el desenvolvimiento del pavimento expuesto a factores como el tránsito, el clima, que afectan directamente a la carpeta asfáltica.



Figura 11 Proceso de compactación usando rodillo compactador estático

Fuente: US Army Corps of Engineers (2000, p.181)

El proceso de compactación de mezclas asfálticas dentro del procedimiento en obra se puede realizar de las siguientes maneras:

- a) Pre compactación con la extendedora: La mayoría de los equipos actuales de extensión entregan la mezcla precompactada en la vía, lo cual favorece la uniformidad de la capa extendida y como ventaja adicional permite el inicio de la compactación de manera temprana, garantizando una mayor temperatura de compactación.
- b) Compactación estática: La compactación se realiza por medio del peso propio del equipo de compactación, utilizándose compactadores de rodillo tándem y compactadores neumáticos. El rendimiento que se obtiene por medio de este método es inferior al resultante de realizar compactación por vibración. En la figura 11 se observa el efecto de la compactación mediante rodillos tándem, mientras que en la figura 12 se observa el procedimiento con rodillos neumáticos.
- c) Compactación por vibración: Este proceso de compactación se realiza por medio del peso propio del equipo junto a la carga dinámica que se origina mediante el sistema de vibración incorporado en los rodillos de los compactadores. Por lo

anterior el efecto de la compactación se determina no solo por la masa de vibración, sino también por la amplitud y frecuencia del vibrado, y se puede ver ilustrado en la figura 12.



Figura 12 Compactación estática con rodillos neumáticos

Fuente: US Army Corps of Engineers (2000, p.181)

2.3.10. Factores que afectan la compactación

Dentro de la compactación de las mezclas asfálticas, según el Manual MS-22 del Instituto del asfalto existen 3 factores que afectan la compactación, estos son:

2.3.10.1. Propiedades de la mezcla

a) Agregado:

La granulometría, textura superficial y la angulosidad del agregado influyen en la trabajabilidad de la mezcla asfáltica, el exceso de agregado grueso (retenido por la malla n°8) dificulta la trabajabilidad de la mezcla, por lo tanto, se necesita mayor esfuerzo en la compactación para obtener la densidad requerida. Obtener una textura superficial áspera requiere mayor esfuerzo de compactación. El porcentaje de arena fina usada dentro de la mezcla también influye en la trabajabilidad, pero en exceso disminuye la estabilidad, por lo que son vulnerables a desgarros por el tráfico.

b) Asfalto:

El asfalto es sólido a temperatura ambiental por lo que para su trabajabilidad se tiene que aumentar la temperatura entre 120°C y 150°C para obtener la fluidez necesaria, y que el agregado se acomode, luego de su colocación y compactación la mezcla se enfría y es aquí donde el asfalto junto con la arena fina interconecta al agregado. La temperatura mínima con la que se puede trabajar es de 85°C por lo que a temperaturas menores no se podrá lograr la compactación adecuada.

c) Temperatura de mezclado:

La temperatura de la mezcla asfáltica es importante por tener influencia sobre el proceso de pavimentación, se sabe que la temperatura mínima a la cual el asfalto puede ser trabajable es de 85°C por lo que una temperatura adecuada me dará el tiempo para obtener la densidad requerida, por otra parte, una temperatura muy alta o mayor a 163°C pueden dañar al asfalto.

2.3.10.2. Condiciones ambientales

El proceso de compactación al realizarse en campo será influenciado por su entorno, en este caso ambiental, ya que afectará el tiempo que se tiene para compactar la mezcla. La temperatura del ambiente, la humedad, la lluvia, la velocidad del viento son los principales agentes externos que pueden modificar la temperatura con la que viene la mezcla asfáltica.

2.3.10.3. Espesor de la capa

Según el Manual del instituto del asfalto (MS-22), una capa más gruesa (mayor a 3”) permite obtener la densidad requerida, ya que mantiene por más tiempo la temperatura que una capa más delgada. Conviene en casos en los que la temperatura ambiental es muy fría. Colucci, B. (2008) dice que “Nunca se debe colocar una capa mayor a 4” (10cm) de espesor”. En caso de tener una capa más gruesa que la anteriormente señalada se tendrá que hacer por capas.

2.3.10.4. Temperatura de compactación

El proceso de compactación al tener como elemento principal al ligante asfáltico, necesita ser calentado a una determinada temperatura, para que la mezcla se realice, por lo tanto, al momento de colocar la mezcla para compactar necesita tener una temperatura ideal que permita la trabajabilidad y obtenga las propiedades mecánicas esperadas. (Cremades, Garnica, Limón y Recasens, 2007)

La temperatura de la mezcla durante la compactación tiene una gran importancia a la hora de calcular el trabajo de compactación necesario. Cuando la mezcla tiene unas temperaturas elevadas, la baja viscosidad del asfalto contribuye al rendimiento de compactación del rodillo. El asfalto o betún actúa como un lubricante y reduce la fricción interna de la mezcla mineral. El asfalto va adquiriendo rigidez a medida que se enfría, con lo que a bajas temperaturas aumenta en gran medida el esfuerzo de compactación requerido (H.-J. Kloubert, 2010).

De lo anterior se evidencia que el esfuerzo necesario para realizar una compactación adecuada es inversamente proporcional a la temperatura de la mezcla asfáltica, es decir, a mayor temperatura de compactación menor esfuerzo de compactación se necesita, esto se ve representado gráficamente en la figura 13.

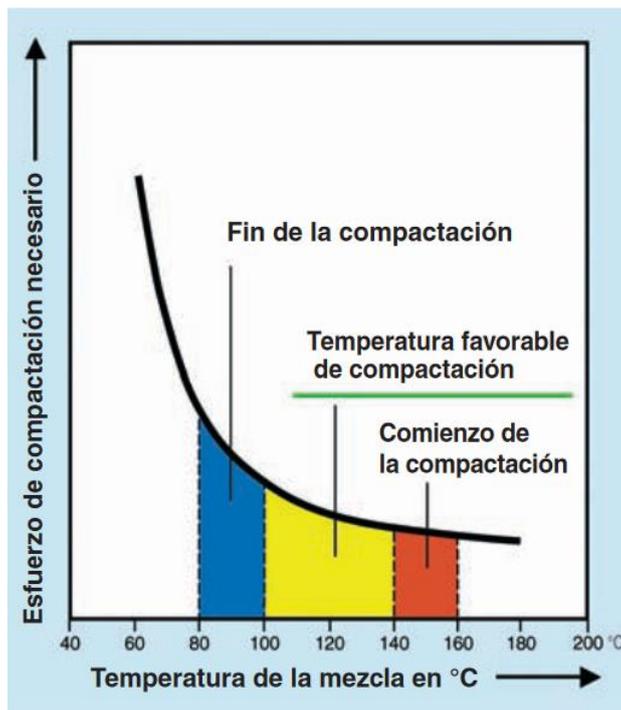


Figura 13 Influencia de la temperatura de compactación

Fuente: H.-J. Kloubert (2010, p.4)

2.3.11. Condiciones del sitio

Muchos factores de las condiciones del sitio afectan al proceso de compactación para obtener la densidad requerida, uno de estos factores es el espesor de la capa a ser compactada. La relación entre el tamaño de los agregados en comparación al espesor de la capa es importante. Por lo que una capa que tenga al menos el triple del tamaño del agregado tendrá mayores facilidades para obtener la densidad requerida. Otro factor a tomar en cuenta es la uniformidad de la capa, la densidad requerida se obtiene con mayor facilidad en capas que tienen el espesor continuo. (US Army Corps of Engineers, 2000)

2.3.12. Criterios de aceptación de la carpeta asfáltica

La compactación exitosa determinará la calidad del pavimento, por lo tanto, se necesita el uso de criterios que permitan la aceptación, según el manual del instituto del asfalto (MS-22) se tienen 3 criterios, estos son:

2.3.12.1. Textura superficial

Durante el proceso de mezclado, transporte, pavimentación o compactación pueden ocasionar fallas en la textura, una mezcla que presente defectos antes de ser compactada se remueve y se coloca una nueva. Si durante la compactación se observan fallas en la textura se deberá pasar el rodillo, si las fallas continúan se cambiará la mezcla antes de que esta llegue a los 85°C.

2.3.12.2. Tolerancia de la superficie

Luego de la compactación la lisura de la carpeta asfáltica no será mayores que 6mm medido con una regla de 3m colocada perpendicularmente al eje central y 3 mm cuando la regla se coloca paralela a la línea central.

2.3.12.3. Densidad del proyecto

Para determinar si la densidad de la mezcla asfáltica es la óptima según el diseño se utiliza una densidad de referencia. Instituto del asfalto MS-2 (2014) menciona que existen 3 formas de elegir la densidad de referencia, estas son:

a) Densidad de laboratorio:

Esta densidad se determina a partir de la preparación de muestras con mezcla tomada directamente de la producción diaria, se usa el mismo procedimiento de compactación que se usó durante el diseño de la mezcla. Teniendo en cuenta el porcentaje de vacíos de 4% según el diseño de la mezcla, si se desea obtener 8% de vacíos, entonces la densidad in situ con respecto a la densidad del laboratorio debe ser como mínimo el 96%. El rango de densidades para este caso varía entre el 96% y 100%, valores mayores a 100 dan a entender que hubo un cambio en la mezcla, algún error en el laboratorio o una muestra pobre que no es representativa.

b) Densidad máxima teórica:

Esta densidad se determina considerando el peso unitario de una muestra, compactándola hasta que no existan vacíos, y luego se realiza una comparación la densidad obtenida in situ, considerando un porcentaje de vacíos máximo (8%) el valor de la densidad será de 92% con respecto a la densidad máxima teórica, y un mínimo (4%) la densidad será de 96%, por lo que el rango está comprendido entre 92% y 96%. Valores mayores a 97% determina un error en la compactación, por lo que se necesita un correctivo. Valores mayores a 100% son teóricamente imposibles.

c) Densidad de sección de prueba:

Esta densidad es determinada colocando un tramo de prueba que pertenece al pavimento, utilizando la densidad obtenida como referencia, siendo que las densidades posteriores deben ser mayores al 99% de la densidad del tramo, siendo que el 100% de esa densidad representa el 96% de la densidad del laboratorio.

La elección de la densidad de referencia será especificada según la normativa correspondiente, tener en cuenta que existe una relación entre estas densidades, como se muestra en la figura 14.

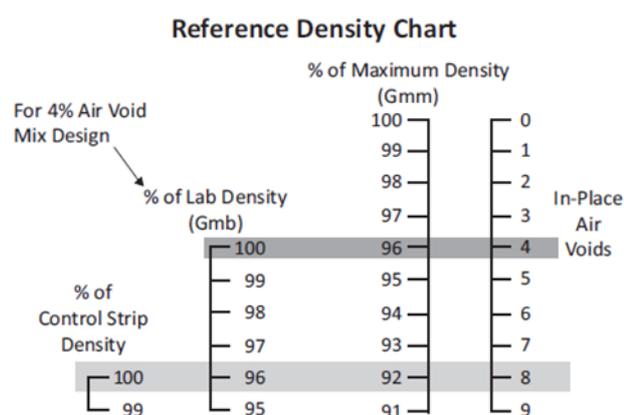


Figura 14 Relaciones entre la densidad de referencia medidas y los vacíos de aire

Fuente: Manual del Instituto del asfalto MS-2 (2014, p.181)

Durante la compactación se espera que la mezcla sea compactada a la temperatura previamente determinada en laboratorio, de manera que la mezcla asfáltica ya colocada tenga las propiedades mecánicas esperadas.

El Asphalt Institute recomienda un rango de temperatura de compactación de entre 163 °C y 85 °C, pero recomienda comenzar la compactación a la temperatura determinada en el laboratorio. Asimismo, las especificaciones FP-92 (Federal Highway Projects) establecen que no se debe proceder a la compactación si la mezcla alcanza una temperatura inferior a 79°C.

Como se puede observar, el rango de temperatura en el que se debe realizar la compactación es muy amplio, lo que no garantiza un comportamiento ideal de la mezcla. Para lograr la densidad requerida, comúnmente expresada como un porcentaje de la densidad de referencia Marshall, es extremadamente importante que la temperatura de la mezcla se mantenga alta para permitir que se compacte y le dé a la mezcla su resistencia mecánica adecuada.

La compactación debe realizarse de manera continua y sistemática, si la mezcla se ha distribuido en tiras, cada tira debe superponerse al área de compactación en el compactador por lo menos 15 cm. Los elementos de compactación deben mantenerse lo más limpios y húmedos posibles. Los cambios de dirección de los compactadores deben hacerse sobre la superficie ya compactada y los cambios de dirección deben ser muy suaves.

2.4. Control de calidad en mezclas asfálticas

2.4.1. Concepto de calidad

Antes de analizar el aseguramiento de la calidad de una mezcla asfáltica, es importante conocer el concepto de calidad. En los últimos años, la calidad de un producto o servicio ha cobrado gran importancia gracias a los sistemas ISO

vienen a especificar un conjunto de propiedades que debe cumplir un producto como un servicio.

Martínez, A (2000) menciona en su tesis doctoral: “La Organización Internacional de la normalización (ISO), según su norma ISO 8402, expresa que la calidad es el conjunto de características de un producto, proceso o servicio que le dan la capacidad de hacer y satisfacer las necesidades expresas o implícitas de los usuarios. Por tanto, se entiende por calidad el conjunto de cualidades inherentes a un objeto que le da la capacidad de satisfacer necesidades implícitas o explícitas.

Pero, por otro lado, la calidad de un producto o servicio depende de la percepción que el cliente tiene, es una fijación mental del consumidor que asume conformidad con ese producto o servicio y su capacidad para satisfacer sus necesidades que necesita.

2.4.2. Sistema de calidad

Para asegurar la calidad de un producto o servicio, es necesario contar con un sistema de la calidad, es decir la organización de los recursos y documentos que permiten la implementación, mantener y corregir el aseguramiento de la calidad operativa para asegurar que los productos y servicios cumplen con los requisitos y especificaciones acordados. Por esta razón, se desarrollaron las normas ISO 9000, que especifican los requisitos para sistemas de calidad:

- La empresa debe desarrollar e implementar un sistema de manera adecuada de calidad que cumple con todos los elementos de la norma.
- El estándar no está orientado al producto sino al proceso.
- ISO 9000 permite e incluso motiva a las empresas a desarrollar un programa calidad efectiva y única para cada empresa.
- La empresa decide si uno o más de los elementos aplican o no a su organización.

El sistema de calidad debe ser gestionado por la dirección y cubrir todos los aspectos la empresa. Este elemento obliga a la empresa a mantener un “sistema de calidad documentado” que cumpla con los requisitos especificados en el mismo. Este objeto también requiere específicamente la creación de procedimientos e instrucciones para calidad. Finalmente, la implementación efectiva de estos procedimientos e instrucciones.

Estos procedimientos son estrategias que no solo ayudan a una empresa a cumplir un requisito, sino para tener una ventaja sobre los demás y aumentar la competitividad de un país.

Por lo tanto, el aseguramiento de la calidad no se centrará únicamente en comprobar una serie de procesos sino considerando la calidad general de un producto o servicio. Martínez, A (2000) dice: "La garantía de calidad ya no es un objetivo parcial, sino que se convierte en uno toda la actividad empresarial".

En resumen, el uso de este procedimiento resuelve los problemas que pueden surgir durante el desarrollo de un producto o servicio y por otro lado los consumidores tienen la seguridad de que el producto y servicio que están comprando es de la calidad esperada. Sin embargo, todo este procedimiento implica la adquisición de una conciencia del cambio, tanto entre los consumidores como entre los vendedores.

2.4.3. Evolución de control de calidad de las mezclas asfálticas

Para cualquier país que cuente con una infraestructura adecuada, funcional y estratégica es vital para facilitar su desarrollo, de ahí que la inversión en la construcción y/o el mantenimiento de carreteras está aumentando.

Por ello, el control de calidad es importante en cualquier tipo de infraestructura, debido a la relevancia para su servicio de los costes incurridos durante su construcción y la que podamos tener durante su conservación.

Sin embargo, como señala Martínez, A (2000): "La industria de la construcción fue el sector el último en admitir la importancia de la calidad en la competencia de una empresa y su nuevo concepto mediante la aplicación de un sistema de garantía de calidad".

Y dentro de la industria de la construcción, la construcción de carreteras fue una de los sectores donde el control de calidad está menos desarrollado, lo que no debería ser así, desde entonces no existe una infraestructura más grande y cara como las autopistas. También en muchos de estos casos podemos decir que si un país tiene malas carreteras es porque es pobre, o es pobre porque tiene malas carreteras, por los gastos de mantenimiento en muchos casos demasiados altos para abordarlos.

Las mezclas asfálticas son las capas finales en la construcción de una carretera y cualquier defecto que presenten se verán reflejados en el firme. Los firmes deben aportar comodidad y sobre todo seguridad para el usuario, por lo que, si los mezclas están en mal estado, la superficie no cumplirá su función. Y, en muchos casos, el deterioro que presentan los firmes es debido a que las mezclas bituminosas no han durado el tiempo para el que fueron diseñadas, como consecuencia de un mal control de calidad durante su ejecución.

Uno de los procesos más importantes y menos frecuentados para realizar mezclas asfálticas es su control de calidad. En la mayoría de los casos se toma más atención a la selección de materiales, diseño o procesos distintos del control de calidad. Es cierto que la elección de materiales y un buen diseño de mezcla asocian con su durabilidad, pero en muchos casos el control de calidad adecuado de un trabajo depende de su éxito.

2.4.4. Desarrollo del control de calidad de las mezclas asfálticas

En la década de 1940, las mezclas bituminosas se convirtieron en una capa de rodadura útil para transferencia de vehículos y también para algunas pistas, especialmente durante la Segunda Guerra Mundial.

El control de calidad en ese momento sobre la ejecución de una mezcla asfáltica era nulo porque no había métodos, ni material, ni compromiso por parte del fabricante para garantizar su calidad ya que no tenía sentido si el asfalto pavimentado tenía las propiedades esperadas.

Uno de los primeros métodos para controlar la ejecución de mezclas asfálticas, y que todavía se aplica hoy en día, es medir la densidad de la mezcla después de la compactación y compararla con la densidad calculada, figura 15, este método desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros encargado de la construcción de mezclas asfálticas durante la Segunda Guerra Mundial es simple, económico y en base a las propiedades volumétricas que debe tener la mezcla.

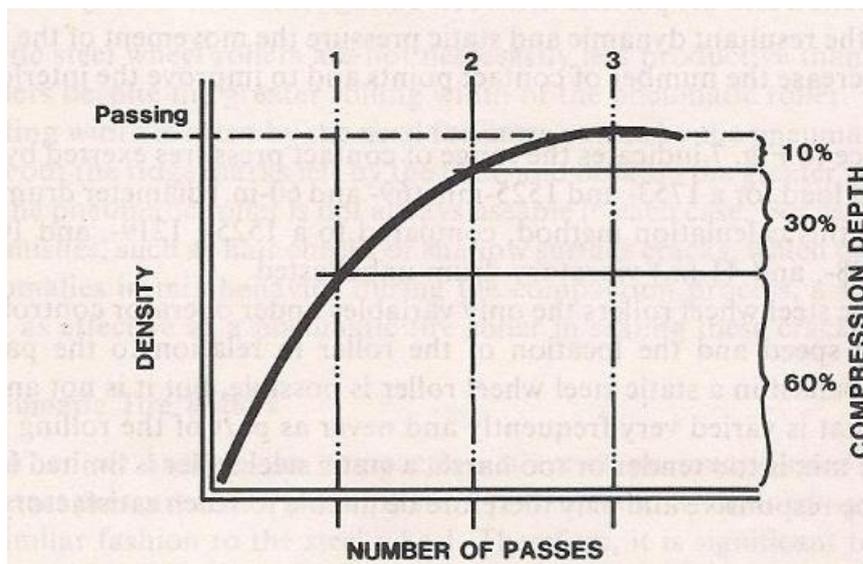


Figura 15 Curva de compactación típica

Fuente: Limón Covarrubias (2010, p.32)

Se realizaron varios estudios en la década de 1940 que encontraron que las densidades obtenidas con los controles tomados de trabajo fueron similares a los obtenidos con muestras realizadas con el compresor Marshall a 50 golpes por lado.

Sin embargo, no fue hasta la década de 1960 que la Administración Federal de Carreteras (FHWA) comenzó a llamar a los Departamentos de Transporte (DOT) y aseguramiento de la calidad del contratista. En aquellos años en los países latinoamericanos estábamos empezando a confiar en los equipos de Hveem y Marshall para el diseño. mezclas bituminosas, mientras que en Estados Unidos la garantía de control de la calidad se ha convertido en una parte importante en la organización de los recursos, en la que actividades como el control de procesos, la aceptación y, a veces, garantía independiente del producto, como apunta Radha, A (2006). Así, gradualmente, se fue adoptando la conciencia del control de calidad de la mezcla asfáltica.

Radha, A mencionó en 2006: “El rendimiento del producto final está vinculado a la especificación requerida y lo que el contratista logra con el producto final. En ese mismo año se describieron las principales ventajas de la aceptación en el aseguramiento de la calidad.

- La responsabilidad por la calidad de los materiales y la construcción es del proveedor de servicio.

- El contratista tiene derecho a elegir los materiales, equipos y métodos para tener más control sobre ellos y sobre la calidad de construcción.
- La decisión de aceptación/rechazo es objetiva, consistente, estadística y razonable.
- Durante la construcción, el constructor tiene derecho a realizar un tramo de prueba, en el que puede hacer una inspección rápida para hacer correcciones en la construcción y pago de materiales

En 2002, el Departamento de Transporte de DELAWARE (DELDOT) cambió sus especificaciones para que en mezclas asfálticas los conceptos de aseguramiento de la Calidad proponiendo tomar las medidas necesarias para tener un producto o servicio adecuado que cumpla con los requisitos de calidad.

Este protocolo menciona lo siguiente: El contratista es responsable de la calidad de los mientras que el DOT es responsable de la garantía de calidad. Para él DOT afecta componentes (70%) y aplicaciones (30%); dentro los componentes están las plantas de producción, mientras que en las aplicaciones están las mediciones de la densidad durante la colocación de la mezcla asfáltica. En este caso, el control de la propuesta de calidad se hizo para lotes de 2000 toneladas de mezcla; estos mismos los lotes se dividieron en sublotos de 500 toneladas cada uno.

Las cinco pruebas realizadas durante el proyecto para el aseguramiento de la calidad fueron:

- Contenido de betún
- Granulometría
- Densidad
- Contenido de vacíos
- Compactación

Como hemos visto, el desarrollo del control de calidad ha mejorado y ya es un requisito indispensable de la obra.

Sin embargo, en muchas ocasiones y en ciertos países, esto todavía no se ha logrado, ya que los Organismos encargados de gestionar las obras, por ahorrar en el concepto de supervisión, es decir, en lo correspondiente al “control de

calidad” (menos del 1% del valor total de la obra), ponen en riesgo la calidad de la misma.

2.4.5. El control de calidad en el diseño de la mezcla asfáltica

El diseño de una mezcla asfáltica se realiza teniendo en cuenta que es necesario alcanzar niveles mínimos de calidad normalmente asociados con condiciones meteorológicas y de tráfico a las que estará expuesto el proyecto. La calidad de la mezcla asfáltica se determina mediante los materiales utilizados en su fabricación y composición, es decir, se debe realizar una prueba para:

- Agregados
- La carpeta o ligante
- La fórmula de trabajo

2.4.5.1. Control de los agregados

Los requisitos que se piden a los áridos son importantes ya que a partir de ellos una mezcla bituminosa puede tener mejores o peores propiedades funcionales y estructurales, y en consecuencia un mejor o peor comportamiento durante su servicio. Los principales requisitos que se piden son los siguientes:

a) Árido grueso:

- Partículas fracturadas: este parámetro es importante para que la mezcla tenga mayor ángulo de fricción interna y, por lo tanto, mayor resistencia a las deformaciones plásticas.
- Partículas alargadas y lascas: de esta propiedad dependen las propiedades volumétricas de la mezcla.
- Desgaste de Los Ángeles: este parámetro está relacionado con las propiedades volumétricas de la mezcla, así como con las características funcionales de la capa bituminosa.
- Densidad: relacionada con las propiedades volumétricas de la mezcla.

- Pulimento: permite simular de manera acelerada en el laboratorio la susceptibilidad al pulimento que experimentan los áridos bajo la acción del tránsito real.

b) Árido Fino:

- Equivalente de arena: permite conocer la cantidad y la calidad de la fracción fina.
- Plasticidad: la plasticidad de los finos está relacionada con la adhesividad árido - ligante.
- Limpieza: nos define el porcentaje de masa de contaminantes, como grumos de arcilla, maderas, pizarras, micas y carbón dentro de los áridos.

c) Filler:

- Plasticidad: la plasticidad del filler está relacionada con la adhesividad árido-ligante.
- Granulometría: permite conocer la distribución de tamaños que tiene el material.

2.4.5.2. Control del ligante

De la misma forma en que los áridos, el control del ligante es muy importante, ya que éste influye directamente sobre las propiedades de la mezcla bituminosa.

El tipo de ligante generalmente se selecciona en función de la capa a la que se destine la mezcla bituminosa, de la zona térmica estival en que se encuentre y de la categoría de tráfico.

Algunos ensayos a los que son sometidos los betunes para comprobar su idoneidad son los siguientes:

- Penetración: esta propiedad nos indica la consistencia de un betún, además de que es una forma de clasificar al betún.
- Punto de reblandecimiento anillo y bola: permite conocer la susceptibilidad térmica del betún

- Viscosidad: la viscosidad permite establecer las temperaturas de mezclado y compactación a las cuales el betún debe utilizarse, además que es una forma de clasificar al betún. La variación de la viscosidad con la temperatura define la susceptibilidad térmica del betún.
- Recuperación elástica por torsión: permite comprobar lo modificado que está un betún.
- Grado de desempeño (PG): se utiliza en casi todo el mundo para clasificar los betunes; además, mediante los ensayos que permiten determinar el PG se pueden conocer las propiedades reológicas de los betunes, las cuales son de gran importancia en el comportamiento mecánico de una mezcla bituminosa.

2.4.5.3. Establecimiento de la fórmula de trabajo

Después de comprobar las características de los áridos y del ligante, se debe establecer la cantidad de betún que debe llevar la mezcla que se está diseñado, es decir, establecer la fórmula de trabajo.

Seleccionada una granulometría de la mezcla, se fabrican probetas con diferentes contenidos de betún, que son ensayadas de acuerdo a lo establecido por el método de diseño.

Los diferentes métodos de diseño evalúan diferentes propiedades sobre la mezcla fabricada, algunos de estos métodos son:

- Diseño Marshall: es el método más utilizado en el mundo para el diseño de mezclas bituminosas. Además de controlar las propiedades volumétricas, se determina su estabilidad y flujo Marshall.
- Diseño Hvemmm: se controla la cohesión de la mezcla.
- Máquina giratoria: con este equipo se controlan las propiedades volumétricas de la mezcla compactada, así como su post-compactación.
- Diseño mecánico: en este tipo de diseño se encuentran los ensayos de simulación, como las máquinas de pista, los ensayos de fatiga, módulos, etc., que pretenden evaluar el comportamiento de las

mezclas sometiénolas a sollicitaciones lo más parecidas posibles a las que tendrá en servicio.

2.4.5.4.El control de calidad en la fabricación

La fabricación se realiza en una planta formada por un conjunto de equipos mecánicos y electrónicos donde los áridos son calentados, secados y mezclados con el betún para producir una mezcla bituminosa en caliente según las proporciones deseadas y cumpliendo las especificaciones requeridas.

Durante la fabricación, se realizan controles sobre la planta para asegurar que funcione adecuadamente. Por otra parte, están los controles que se realizan a la mezcla fabricada, para asegurar que sea similar a la de mezcla diseñada.

2.4.5.5.Controles en planta

Martínez, A (2000), en su Tesis Doctoral, describe los controles que se deben realizar a la planta de fabricación de mezcla, entre los que se destacan los siguientes:

- Sistema de dosificación de los áridos en frío: en las tareas de control se debe considerar la verificación de la carga en las tolvas, que se debe realizar en forma tal, que siempre estén llenas entre un 50 y 100% de su capacidad y tratando de minimizar la segregación y degradación del árido.
- Secador de áridos: es fundamental conseguir el tiro de aire necesario para que la combustión sea completa. El secador debe estar provisto de un termómetro que permita controlar la temperatura de los áridos a la salida.
- Colector de polvo: diariamente se controla la granulometría y densidad del filler de recuperación. Es preciso que el extractor de aire funcione en equilibrio con el mechero para lograr una combustión perfecta. Si a este balance se le añade una correcta alimentación de áridos, entonces la granulometría del material recuperado será uniforme.

- Sistema de clasificación de áridos en caliente: es importante que el rendimiento de las cribas se ajuste a la producción del mezclador. Además, no deben sobrecargarse porque podría realizar una clasificación incorrecta del material. También se debe controlar que no se produzca rotura o desgaste de las mallas en las cribas.
- Silos de almacenamiento de los áridos cribados calientes: los silos cuentan con una alarma que advierte cuando el nivel de llenado es menor del necesario para asegurar el caudal previsto y un dispositivo para la toma de muestras de cada fracción de áridos. Están provistos de un termómetro para el control de la temperatura de los áridos.
- Sistema de alimentación del relleno mineral: debe realizarse un control frecuente de la cantidad de relleno mineral añadida a la mezcla pues esta variable puede afectar de modo considerable a la calidad de la mezcla. Para ello se debe revisar constantemente la calibración de los mecanismos de alimentación y pesado.
- Sistema de alimentación, calefacción y alimentación de ligante: se instalan varios termómetros para asegurar el control de temperatura del ligante. Para tomar muestras del ligante existen válvulas adecuadas en el tanque o la tubería.
- Sistema de dosificación de áridos, filler y del ligante bituminoso: en una planta discontinua se debe realizar un control periódico de las básculas y sistemas de dosificación. En una planta continua el control se puede hacer desviando parte del material que sale de cada silo. Es muy importante considerar la temperatura de bombeo porque la densidad del betún cambia y, además, esta temperatura debe mantenerse constante.
- Mezclador: en una planta discontinua se debe controlar el tiempo de mezclado mínimo necesario para obtener una masa homogénea, equilibrando con el máximo rendimiento posible. También es posible variar la velocidad de las paletas de los ejes, así como su forma y disposición. En una planta continua la combinación de áridos que pasa sobre la cinta es pesada continuamente. Es

importante conocer la humedad del árido que entra al secador para realizar los ajustes en el medidor del ligante y asegurar la dosificación necesaria para el árido una vez seco.

- Descarga del mezclador: a la salida del mezclador, y de acuerdo al tipo de planta que se trate, la mezcla puede descargarse directamente al camión. Es importante controlar que la mezcla no se segregue al caer por un exceso de altura de descarga, ni que forme conos demasiados altos en el camión. La mezcla también puede llegar al camión a través de una cinta transportadora y en ese caso se debe cuidar que los finos no queden adheridos a la cinta. En esta etapa es fundamental el control de la temperatura de la mezcla en el camión, antes de iniciar el transporte.

2.4.5.6. Controles en mezcla fabricada

Los controles no terminan con las revisiones de la planta y los pesos de las cargas en los camiones. También se debe evaluar la mezcla fabricada, mediante los siguientes ensayos:

- Extracción del betún: mediante el ensayo de extracción se mide el contenido de betún, y se obtiene el árido limpio para el análisis granulométrico. Es la revisión final de todas las operaciones individuales que han hecho durante la producción de la mezcla, y puede ser de gran ayuda en la evaluación de la calidad de la mezcla. Cuando el ensayo muestre variaciones repetidas en sucesivas extracciones, se deberá efectuar una inspección cuidadosa de los alimentadores en frío, de la cubierta de la criba, de las paletas y de la barra suministradora de betún. Adicionalmente, los tiempos de mezclado y de dosificación deberán ser revisados.
- Análisis granulométrico: sobre el árido extraído deberá efectuarse un análisis granulométrico, que permitirá asegurar la correcta calibración de la planta y fabricación de la mezcla.
- Densidad de mezcla: las determinaciones de densidad en la mezcla son necesarias para garantizar una correcta compactación de la mezcla. Comúnmente, las especificaciones requieren que la mezcla se compacte hasta un porcentaje mínimo de la densidad

máxima teórica o de la densidad obtenida mediante compactación de laboratorio.

- Estabilidad Marshall: el ensayo Marshall sobre las probetas compactadas ayuda a verificar que la mezcla que se está fabricando tenga las mismas características que la de diseño, ya que variaciones en el tipo de árido, granulometría, contenido y tipo de betún pueden ser significativas en los cambios de valores de estabilidad Marshall.

2.4.6. El control de calidad puesta en obra

Las etapas incluidas en la puesta en obra de la mezcla bituminosa son el transporte de la misma, su extensión sobre la superficie preparada y su compactación.

La preparación de la superficie existente exige que se compruebe la regularidad superficial de la capa subyacente. Si la superficie está constituida por una mezcla bituminosa, se debe ejecutar un riego de adherencia, si es granular o tratado con conglomerantes hidráulicos, se ejecuta un riego de imprimación.

Se toman las medidas de control correspondientes al riego aplicado: verificar el plazo de rotura o de curado del mismo, que no queden restos de fluidificante o de agua en la superficie y que mantenga su capacidad de adherencia si ha transcurrido mucho tiempo desde su aplicación.

2.4.6.1. Transporte

Es la etapa en la que la mezcla es trasladada de la central de fabricación a la extendidora por medio de camiones. Es inevitable el enfriamiento de la mezcla por efecto en la temperatura ambiente y el viento. De todos modos, estando la mezcla protegida con una lona, figura 16, sólo se enfría en la zona superficial, aunque se debe evaluar las condiciones climáticas de cada caso para determinar las distancias de transporte máximas posibles. Debe especificarse que la temperatura de la mezcla en el momento de la descarga no sea menor a la especificada en la fórmula de trabajo.



Figura 16 Transporte de mezcla asfáltica

Fuente: US Army Corps of Engineers (2000, p.116)

2.4.6.2.Extendido

Durante el proceso de extendido de la mezcla bituminosa se debe:

- Verificar que no exista ninguna imperfección en la superficie de colocación
- Comprobar que exista riego de adherencia sobre la capa asfáltica subyacente
- Vaciar cuidadosamente y de manera continua la mezcla bituminosa sobre la extendedora.
- Verificar que las planchas de la extendedora se encuentren calentadas adecuadamente.
- Controlar el espesor de mezcla que se está colocando.
- Cuidar que no se produzcan imperfecciones durante el extendido de la mezcla



Figura 17 Extendido de mezcla asfáltica

Fuente: US Army Corps of Engineers (2000, p.116)

2.4.6.3. Compactación

Una vez extendida la mezcla, pasan los compactadores, figura 11 que pueden ser neumáticos o lisos, con o sin vibración, y se elige en función del tipo y espesor de la mezcla. Se propone un plan de compactación que debe ser aprobado por el director de la obra de acuerdo a los resultados de un tramo de prueba. En esta oportunidad el director puede ordenar modificar la fórmula de trabajo, cambiar la forma de empleo de algún equipo o su reemplazo.

Para poder conseguir la densidad necesaria, que suele expresarse como un porcentaje de la densidad Marshall de referencia, es de suma importancia que la temperatura de la mezcla se mantenga elevada, cerca de la temperatura óptima de compactación, para que sea posible su densificación.



Figura 18 Compactación de mezcla asfáltica

Fuente: US Army Corps of Engineers (2000, p.167)

La compactación debe realizarse de manera continua y sistemática, si la mezcla ha sido extendida en tres franjas, al compactar cada una de éstas, se ha de superponer la zona de compactación al menos quince centímetros.

Deben mantenerse limpios los elementos de compactación y en lo posible húmedos. Los cambios de dirección de los compactadores deben hacerse sobre una superficie ya compactada y los cambios de sentido deben hacerse con mucha suavidad.

El control del producto terminado se lleva a cabo sobre el espesor, la compactación de la mezcla y el acabado de la capa, evaluando las tres características por capas asiladas y por lotes:

Espesor: se extraen testigos aleatoriamente situados y se determina su espesor. La empresa puede realizar un control previo comprobando el espesor con un vástago graduado, inmediatamente detrás de los compactadores cuando la capa está aún caliente. Siempre que la capa inferior esté bien definida y sea resistente al punzonamiento, con este método se pueden hacer muchas mediciones.

Compacidad: La compacidad de la capa se evalúa comparando la densidad de un testigo extraído, figura 12, con la de una probeta de referencia fabricada a partir de la mezcla obtenida en planta. Los

critérios de aceptación o rechazo están especificados en los pliegos correspondientes



Figura 19 Extracción de un espécimen para obtener espesor y compacidad

Fuente: Limón Covarrubias (2010, p.46)

Acabado: la regularidad superficial del lote se comprueba con una regla de tres metros, con el índice de regularidad internacional (IRI) o con el viógrafo. Los criterios de aceptación o rechazo están especificados en los pliegos correspondientes. En las capas de rodadura se verifica la macrotextura con ensayos de círculo de arena y resistencia al deslizamiento.

2.5. Definición de términos básicos

Según el ASTM se tiene:

Asfalto o cemento asfáltico: Un cementante de color marrón oscuro a negro en el que sus componentes predominantes son los asfáltenos que pueden ser naturales u obtenidos como residuo en la refinación del petróleo crudo.

Compactación: Proceso de compresión de la mezcla asfáltica para reducir su volumen, y aumentar su densidad, hasta obtener la densidad requerida. En la mayoría de los casos se utilizan rodillos de acero o neumáticos.

Densidad: Grado de solidez que puede alcanzar una mezcla y que solo está limitada por la cantidad de vacíos de aire que posee.

Ductilidad: Es la capacidad de disipación de energía que tiene un material dentro de su rango plástico. La rotura del material es dependiente de la deformación del mismo. En el caso del asfalto, la ductilidad le permite normalmente tener mejores propiedades aglomerantes, y los asfaltos con una ductilidad muy elevada son usualmente susceptibles a los cambios de temperatura.

Elasticidad: Propiedad que tienen los materiales para recuperar su forma al finalizar o disminuir la carga que los modifica.

Mezcla asfáltica: Mezcla de agregado, ligante asfáltico y aire preparado en altas temperaturas que sirve para la pavimentación de carreteras, usado como la última capa, llamada “capa de rodadura” y será compactada hasta obtener la densidad requerida.

Resistencia al corte: Es la capacidad de resistencia a altas temperaturas, la cual se determina con un “reómetro de corte dinámico”, que es el aparato que imprime una fuerza cortante cosenoidal con la que se miden dichas resistencias.

Volumen de vacíos: Cantidad total de espacios vacíos en una mezcla compactada.

Viscosidad: Propiedad de un fluido que tiende a oponerse a su flujo cuando se le aplica una fuerza. Los fluidos de alta viscosidad presentan mayor resistencia a fluir en comparación de un fluido con baja viscosidad que fluye con facilidad. Es importante mencionar que la viscosidad es inversamente proporcional a la temperatura; a mayor temperatura, menor viscosidad.

CAPÍTULO III: SISTEMA DE HIPÓTESIS

3.1. Hipótesis

3.1.1. Hipótesis general

Los valores de compactación de mezclas asfálticas cumplen los criterios de aceptación en centro y Sudamérica.

3.1.2. Hipótesis específicas

- a) El valor mínimo y máximo de densidad en la mezcla asfáltica según la norma peruana no tienen los mismos valores que las normas de centro y Sudamérica.
- b) Los criterios de aceptación de la norma peruana no siguen los mismos criterios de aceptación de las normas de centro y Sudamérica.

3.2. Variables

3.2.1. Definición conceptual de las variables

a) Valores de compactación:

La compactación de mezclas asfálticas es el proceso mediante el cual se comprime el material, disminuyendo el contenido de vacíos y el aumento de la densidad. (Hot Mix Asphalt Paving Handbook, 2000)

b) Criterios de aceptación:

Son valores aceptables para cada proceso según normativa interna de cada país en base a normativas internacionales.

3.2.2. Operacionalización de las variables

Tabla 1
Operacionalización de variables

VARIABLE	DEFINICION CONCEPTUAL	DEFINICION OPERACIONAL	DIMENSION	INDICADORES	INDICES	UNIDAD DE MEDIDA	ESCALA	INSTRUMENTO	HERRAMIENTAS
Variable independiente					Porcentaje de vacios de aire de la mezcla	%			
VALORES DE COMPACTACION	La compactación de mezclas asfálticas es el proceso mediante el cual se comprime el material, disminuyendo el contenido de vacíos y el aumento de la densidad. (Hot Mix Asphalt Paving Handbook, 2000)	Valor de densidad real con respecto a la densidad de diseño, que es influenciada por la composición de la mezcla, temperatura de compactación, condiciones del sitio y maquinaria	Densidad	Criterios para diseño de mezcla asfáltica	Porcentaje de vacios de agregado mineral	%			Hot Mix Asphalt Paving HandBook
					Porcentaje de vacios llenos de asfalto	%	Cuantitativa continua	Manual de diseño, articulos científicos, tesis, normativa.	MS-22 Asphalt's Institute Manual
					Estabilidad	N			
					Compactacion	Nº de golpes			
					Fluencia	mm			
Variable dependiente									
CRITERIOS DE ACEPTACIÓN	Son valores aceptables para cada proceso según normativa interna de cada país en base a normativas internacionales.	Condiciones específicas de cada funcionalidad respecto a su comportamiento y calidad técnica. Son descripciones rápidas que guían la implementación, así como permitir las estimaciones o detectar dependencias.	Calidad técnica	Porcentajes de compactación	Valores de compactación	%	Cuantitativa continua	Normativa y articulos científicos	EG 2013 Manual de carreteras - Especificaciones técnicas generales para construccion

Fuente: Elaboracion propia

CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. Tipo y nivel

4.1.1. Tipo de investigación

- Será de tipo descriptivo – correlacional.
- Descriptivo porque recopila datos que son cuantificables y que pueden ser comparados, en este trabajo se realizará una comparación a los valores de compactación de diferentes normativas.
- Correlacional porque se analizan dos variables, la primera variable son los valores de compactación y la segunda variable los criterios de aceptación, se encuentra la relación que existe entre estas para responder al problema general.

4.1.2. Nivel de la investigación.

- Sera de tipo descriptivo – explicativo.
- Descriptivo porque se describen los datos en consideración.
- Explicativo porque busca causalidad, va un paso delante de solo la descripción.

4.2. Diseño de investigación

El diseño de la investigación es no experimental, transversal y retrospectiva.

- No experimental porque no se interfiere en las variables, usando la información bibliográfica.
- Transversal porque solo se realiza la observación de la información una vez, y no se hacen más muestreos.
- Retrospectiva porque utiliza información recopilada con anterioridad.

4.3. Población y muestra

4.3.1. Población

Las normas de especificaciones técnicas de construcción de carreteras de Perú y los países de centro y Sudamérica.

4.3.2. Muestra

La muestra son las normas de especificaciones técnicas de construcción de carreteras de Perú, Ecuador, Colombia, Brasil, Chile, Costa Rica.

4.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

4.4.1. Tipos de técnicas e instrumentos

En este trabajo de investigación se emplearon diversas fuentes para la búsqueda de la información como tesis, libros, manuales, normativas y trabajos de experimentación. También se hará el uso de encuestas a los profesionales de distintas universidades con el fin de obtener una perspectiva de lo que ocurre en la realidad.

4.4.2. Procedimientos para la recolección de datos

El procedimiento a seguir será la consulta del manual de Instituto del asfalto MS – 2, la teoría con respecto a la construcción de un pavimento asfáltico, así como de la norma peruana y las normas de diversos países de centro y Sudamérica.

4.5. Técnicas para el procesamiento y análisis de la información

El procesamiento de la información se realizará mediante la comparación de los valores de compactación de mezclas asfálticas para obtener la correlación con los criterios de aceptación usando cuadros comparativos.

CAPÍTULO V: PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

5.1 Norma Peruana

La norma llamada “Especificaciones técnicas generales para construcción” del MTC 2013 nos da los parámetros para la construcción de la mezcla asfáltica a continuación:

Con relación a la mezcla y los valores requeridos se tiene la figura (20) que corresponde a la tabla 423-06 del manual de especificaciones de construcción del MTC se tiene:

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

Figura 20 Parámetros de diseño Perú

Fuente: MTC (2013, p.271)

Como se observa en la figura (20) se tienen los valores para el diseño de la mezcla asfáltica, siendo un valor importante el porcentaje de vacíos con aire que tiene un rango de 3% a 5%, el cual será un valor que varía según la región y que demuestra la importancia de este estudio. Para el caso de lugares con altitud mayor a los 3000 msnm, la norma recomienda el rango porcentajes de vacíos de 2% a 4% ya que según la experiencia se han obtenido resultados de desempeño favorables.

5.1.1. Aceptación del trabajo

Con respecto a la densidad el MTC 2013 dice:

Se determina calculando la densidad de una probeta cada 250m² como mínimo, se utilizará el proceso aleatorio de selección de muestreo al azar. La densidad media del tramo deberá ser cuando menos 98% de la media obtenida luego de compactar en el laboratorio mediante Marshall, 4 probetas por jornada de trabajo. La toma de muestras se realizará mediante la norma MTC E 509 y las densidades se determinarán mediante los indicados en las normas MTC E 506, MTC E 508 y MTC E 510.

5.2 Normas de Sudamérica y Centroamérica

5.2.1. Norma de Chile

La norma chilena con nombre “Especificaciones técnicas generales de construcción” Volumen nº5 del Manual de carreteras nos da las condiciones para el diseño de la mezcla asfáltica descritos en la tabla 5.408.203A:

TIPO DE MEZCLA ASFALTICA	ESTABILIDAD (N)	FLUENCIA (0,25 mm)		HUECOS EN LA MEZCLA (%)	
	Min.	Min.	Máx.	Min.	Máx.
Rodadura	9.000	8	16	4,0	6,0
Intermedia	8.000	8	16	3,0	8,0
Base Gruesa	6.000	8	16	5,0	10,0
Superficie Fina	4.000	8	16	3,0	8,0

Figura 21 Parámetros de diseño Chile

Fuente: Especificaciones generales de construcción (2010, p 269.)

En este caso se tiene una Estabilidad mínima de de 9kN, una fluencia entre 8 y 16 y un porcentaje de vacíos que va desde 4% a 6%. En este caso se toma en cuenta que Chile presenta en su mayoría desierto y cordillera. Con respecto al porcentaje de densidad que debe tener la mezcla luego de ser compactada se tiene:

Se obtendrán grupos de 5 muestras consecutivas, luego se le calculará la densidad individual siendo que esta deberá ser mayor al 97% de la densidad de diseño.

5.2.2. Norma de Bolivia

Según la norma “Manual de especificaciones generales de construcción” de la Administración boliviana de carreteras, sobre el control del grado de compactación:

Se medirá la densidad aparente de las muestras obtenidas, 1 muestra cada 500m de tramo, no se aceptarán valores menores al 97% de la masa específica aparente máxima del proyecto o si poseen un valor del porcentaje de vacíos entre 5 a 7%.

5.2.3. Norma de Brasil

Según la norma “DNIT Pavimentos flexibles- Concreto asfáltico- Especificaciones de servicio” del Ministerio de Transportes de Brasil, la

mezcla asfáltica como capa de rodadura deberá tener un porcentaje de vacíos de 3% a 5% luego de la compactación.

Para el control del grado de compactación, la densidad aparente debe ser obtenida de las muestras extraídas de la mezcla compactada, por medio de brocas rotativas, comparando este valor con la densidad del proyecto. No se aceptarán valores menores al 97% o mayores al 101% de la densidad aparente.

5.2.4. Norma de Colombia

Según la norma colombiana con nombre “Especificaciones generales de construcción de carreteras 2022” en el capítulo 4 nos da las condiciones para el diseño de la mezcla asfáltica en la tabla 450-9, están son:

Característica	Norma Ensayo INV	Mezclas densas, semidensas y gruesas			Mezcla de alto módulo	
		Categoría de tránsito				
		NT1	NT2	NT3		
Compactación (golpes/cara)	E-748 (E-800) (Nota 1)	50	75 (112)	75 (112)	75	
Estabilidad mínima (N)		5 000	7 500 (16 875)	9 000 (20 250)	15 000	
Flujo (mm). (Nota 2)		2,0 – 4,0	2,0 – 4,0 (3,0 – 6,0)	2,0 – 3,5 (3,0 – 5,3)	2,0 – 3,0	
Relación Estabilidad/Flujo (kN/mm)		2,0 – 4,0	3,0 – 5,0 (4,5 – 7,5)	3,0 – 6,0 (4,5 – 9,0)	-	
Vacíos con aire (Va) (%). (Nota 3)	Rodadura	E-736	3,0 – 5,0	3,0 – 5,0	4,0 – 6,0	NA
	Intermedia	E-799	4,0 – 8,0	4,0 – 7,0	4,0 – 7,0	4,0 – 6,0
	Base		NA	5,0 – 8,0	5,0 – 8,0	4,0 – 6,0

Figura 22 Parámetros de diseño Colombia

Fuente: Especificaciones generales de construcción de carreteras
(2022, p450-9.)

Como se observa en la figura (22) se tiene que según el tipo de tráfico que se usará para el diseño, el porcentaje de vacíos de aire son 3% a 5% para el caso de NT1 y NT2 y 4% a 6% para el caso de NT3, valor que será fundamental en el entendimiento de la densidad obtenida. La densidad del pavimento compactado deberá tener un valor mínimo de 94% para el tráfico NT1 y NT2 y un valor mínimo de 93% para el tráfico NT3, siendo el porcentaje calcula de la ecuación (1):

$$GC_i = \frac{\rho_i}{G_{mm} * \rho_w} * 100$$

Ecuación 1 Porcentaje de compactación

Donde:

GC_i : Porcentaje de compactación

ρ_i : Valor de la densidad en campo

G_{mm} : Gravedad específica máxima

ρ_w : Densidad del agua a 25°C

5.2.5. Norma de Ecuador

La norma ecuatoriana con nombre “Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes” Volumen 3 del MTOP señala las condiciones de la mezcla asfáltica:

Parámetros de Diseño	Clase de Mezcla		
	A	B	C
Marshall (MTC E 504)			
1. Estabilidad	8 kN (815Kg)	5,34 kN (544Kg)	4,45 kN (453Kg)
2. Flujo 0,25 mm	8 - 14	8 - 16	8 - 2
3. Porcentaje de vacíos con aire (¹)MTC E 505)	3 - 5	3 - 5	3 - 5
4. Vacíos en el agregado mineral	Tabla 403-4.11		
5. Compactación, núm de golpes en cada capa de testigo	75	50	50
c. Inmersión - Compresión (MTC E 518)			
1. Resistencia a la compresión Mpa mín	2,1	2,1	1,4
2. Resistencia retenida % (mín)	70	70	70
d. Resistencia Conservada en la Prueba de Tracción indirecta (mín)	70	70	70
e. Relación Polvo - Asfalto	0,6 - 1,3	0,6 - 1,3	0,6 - 1,3
f. Relación Est. / flujo(²)	1700 – 2500		

Figura 23 Parámetros de diseño Ecuador

Fuente: Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes (2013, p 426.)

Para la compactación, la determinar la densidad obtenida en campo se tomarán muestras de una muestra por cada 250m² y para cada tramo por aprobar se tomarán 6 densidades. La densidad media del tramo deberá ser mínimo 98%

de la densidad obtenida en el laboratorio al compactar con el método Marshall y la densidad de cada muestra individual deberá ser mayor o igual al 97% de la densidad promedio.

5.2.6. Norma de Paraguay

La norma paraguaya con nombre “Manual de Carreteras “tiene como requisitos de la mezcla asfáltica los siguientes datos:

REQUISITOS DE DOSIFICACIÓN DE LA MEZCLA ASFÁLTICA		
Parámetro		Exigencia
Ensayo Marshall ASTM D-1559	Nº golpes por cara	75
	Estabilidad (kN)	> 9 kN
	Relación Estabilidad-Fluencia (kN/mm)	2,5 - 4,5
	Porcentaje de Vacíos en mezcla	3 % - 5 %
	Porcentaje de Vacíos del Agregado Mineral (VAM)	Mínimo 14 %.
	Porcentaje Relación Betún-Vacíos (Proporción en que el volumen de asfalto efectivo ocupa los VAM)	68 % – 78 %
Porcentaje de Resistencia Conservada mediante el ensayo de Tracción Indirecta. (Anexo I)		> 80 %
Evaluación de la resistencia al ahuellamiento (ensayo de rueda cargada)		Determinación obligatoria en capas de rodamiento e intermedias
Porcentaje de Árido Fino no triturado en mezcla		≤ 8%
Porcentaje mínimo Cal Hidratada en peso sobre mezcla de áridos mínimo		1 %
Relación en peso Filler/Asfalto		0,8 - 1,3
Proporciones máximas de filler en mezclas: Concentración crítica de filler		$C_v / C_s < 1,0$
Temperatura máxima de elaboración de las mezclas		≤ 170 °C

Figura 24 Parámetros de diseño Paraguay

Fuente: Manual de carreteras, Cap. 5 (2019, p 426.)

Se puede observar que nos determinan un rango de porcentajes de vacíos de 3% a 5 %, la densidad de la mezcla compactada deberá satisfacer un rango de porcentaje de vacíos de 3% al 6% con un desvío estándar no mayor a 1.5%. Para el cálculo de la cantidad de vacíos se usará la densidad máxima teórica (Rice) obtenida de la mezcla preparada para el lote.

5.2.7. Norma de Costa Rica

Según la norma que tiene por título “Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes” CR-2010 en la sección 402.17 de aceptación nos dice:

“La densidad tiene por límite 91% de la densidad específica máxima obtenida según AASHTO T 209” Esto nos quiere decir que luego de compactada una mezcla, se tiene que determinar la densidad del núcleo extraído.

5.3 Comparación de los valores de densidad y criterios de aceptación

5.3.1. Comparación de los valores de densidad

Comparar los valores de la densidad aceptada en las normas de los países de la región centro y sur de América nos permitirá conocer la importancia que le da cada país al proceso de compactación de las mezclas asfálticas en caliente, ya que como se sabe, el proceso de compactación en relación de costos es el que menos gasto genera, pero que determinará si un pavimento cumplirá con las funciones por la cual fue diseñado.

Norma peruana vs Norma chilena

Realizando la comparativa en función de la densidad requerida para que sea aceptada la compactación de un pavimento en la tabla 2, se observa que el Perú exige que el promedio de 4 probetas tengan en promedio una densidad mayor al 98% de la densidad de diseño (Marshall) en comparación con Chile que exige que se tomen 5 probetas y que en promedio la densidad sea como mínimo el 97% de la densidad de diseño, también se tiene que considerar que individualmente el Perú exige que la densidad sea como mínimo el 97% de la densidad de diseño, mientras que Chile exige que todas las probetas individualmente tengan una densidad mayor al 95% de la densidad de diseño.

Tabla 2
Norma Perú vs Norma Chile

Perú	Chile
EPGC 2013 MTC	EPTGC 2010 MOP
Densidad	Densidad
≥98%	≥97%
Densidad de referencia	Densidad de referencia
Densidad de laboratorio	Densidad de diseño
Gmb	Gmb

Fuente: Elaboración propia

Se concluye que la norma peruana es un poco más exigente con respecto al porcentaje mínimo de densidad que se requiere para la aceptación de la

compactación de la mezcla asfáltica, un criterio similar es el uso de la densidad de laboratorio realizada con la mezcla de la producción del día como referencia de la densidad (Gmb).

Norma peruana vs norma boliviana

Realizando la comparativa en función de la densidad requerida para que sea aceptada la compactación de un pavimento en la tabla 3, se observa que el Perú exige que el promedio de 4 probetas tenga en promedio una densidad mayor al 98% de la densidad de diseño (Marshall) en comparación con Bolivia que exige una probeta cada 500m de franja y como mínimo una en una jornada de 8 horas, la supervisión tiene la capacidad de pedir más probetas si así lo cree necesario. El valor de la densidad obtenida de la muestra debe tener una densidad como mínimo del 97% de la densidad de diseño (Gmb)

Tabla 3
Norma Perú vs Normal Bolivia

Perú	Bolivia
EPGC 2013 MTC	MEGC 2011 ABC
Densidad	Densidad
$\geq 98\%$	$\geq 97\%$
Densidad de referencia	Densidad de referencia
Densidad de laboratorio	Densidad de diseño
Gmb	Gmb

Fuente: Elaboración propia

Se observa en el caso de Bolivia que, si bien no es exigente con el número de probetas necesarias para la toma de la densidad, dejando esa decisión a la supervisión, nos dice que, en caso de no cumplirse, deberá satisfacer un porcentaje de vacíos entre 5% a 7%, dejando en claro que el criterio de porcentaje de vacíos es más importante que el criterio de solo el porcentaje como tal. Considerando que Bolivia tiene una altitud que necesita ser tomada en cuenta, en cambio el Perú solo se rige por el porcentaje de la densidad en sí, ya que no se menciona un control con respecto al porcentaje de vacíos.

Ambas normas coinciden en la densidad de laboratorio como densidad de referencia.

Norma peruana vs norma brasileña

Realizando la comparativa en función de la densidad requerida para que sea aceptada la compactación de un pavimento en la tabla 4, se observa que el Perú exige que el promedio de 4 probetas tenga en promedio una densidad mayor al 98% de la densidad de diseño (Marshall) en comparación con Brasil que no se habla de la cantidad de probetas a ensayar, dejando a criterio del supervisor esa cantidad, nos dice que la densidad de esas probetas no debe ser menor al 97% ni mayor al 101% de la densidad de laboratorio o de diseño del proyecto (Gmb).

Tabla 4
Norma Perú vs Norma Brasil

Perú	Brasil
EPGC 2013 MTC	DNIT 2006 MDT
Densidad	Densidad
$\geq 98\%$	$97\% \leq D \leq 101\%$
Densidad de referencia	Densidad de referencia
Densidad de laboratorio	Densidad de diseño
Gmb	Gmb

Fuente: Elaboración propia

En este caso se puede establecer que la norma de Brasil usa el valor mínimo y también valor máximo, que no es el caso de Perú, que solo establece valor mínimo, sabiendo que la teoría recomienda un valor máximo para no ocurra exudación al momento de poner en servicio. Ambas normas usan la densidad del laboratorio como densidad de referencia.

Norma peruana vs norma colombiana

Realizando la comparativa en función de la densidad requerida para que sea aceptada la compactación de un pavimento en la tabla 5, se observa que el Perú exige que el promedio de 4 probetas tenga en promedio una densidad mayor al 98% de la densidad de diseño (Marshall) en comparación con Colombia que requiere de 5 probetas por lote, y luego determinar el grado de compactación siendo que esta no deberá ser menor que 94% para tráfico NT1, menor que 94% para tránsito NT2 y 93% para tránsito NT3.

Tabla 5
Norma Perú vs Norma Colombia

Perú	Colombia
EPGC 2013 MTC	EGCC 2022 INVIAS
Densidad	Densidad
$\geq 98\%$	$\geq 94\%$
Densidad de referencia	Densidad de referencia
Densidad de laboratorio	Grado de compactación
Gmb	Gmm

Fuente: Elaboración propia

Se observa que en este caso Colombia considera como un porcentaje distinto al de Perú, debido a que toma como referencia la densidad máxima teórica, siendo calculada con el ensayo RISE, por lo tanto, considera la necesidad de un porcentaje de vacíos necesario para el óptimo desempeño de la mezcla asfáltica compactada.

Norma peruana vs norma ecuatoriana

Realizando la comparativa en función de la densidad requerida para que sea aceptada la compactación de un pavimento en la tabla 6, se observa que el Perú exige que el promedio de 4 probetas tenga en promedio una densidad mayor al 98% de la densidad de diseño (Marshall) en comparación con

Ecuador, siendo este caso particular debido a que toma los mismos valores y el mismo procedimiento de toma de muestras debido al uso de la norma peruana como referencia para establecer su norma.

Tabla 6
Norma Perú vs Norma Ecuador

Perú	Ecuador
EPGC 2013 MTC	NEVI 2013 MTOP
Densidad	Densidad
$\geq 98\%$	$\geq 98\%$
Densidad de referencia	Densidad de referencia
Densidad de laboratorio	Densidad de diseño
Gmb	Gmb

Fuente: Elaboración propia

Norma peruana vs norma paraguaya

Realizando la comparativa en función de la densidad requerida para que sea aceptada la compactación de un pavimento en la tabla 7, se observa que el Perú exige que el promedio de 4 probetas tenga en promedio una densidad mayor al 98% de la densidad de diseño (Marshall) en comparación con Paraguay que exige 2 probetas cada 800m² de trabajo, y que se determine el porcentaje de vacíos, cumpliendo un rango entre 3% a 6%, utilizando para este caso el ensayo RICE para calcular la densidad máxima teórica con producción del día.

Tabla 7
Norma Perú vs Norma Paraguay

Perú	Paraguay
EPGC 2013 MTC	MCP 2019 APC
Densidad	Densidad
$\geq 98\%$	$94\% \leq D \leq 97\%$
Densidad de referencia	Densidad de referencia
Densidad de laboratorio	Densidad Rice
Gmb	Gmm

Fuente: Elaboración propia

Norma peruana vs norma argentina

Realizando la comparativa en función de la densidad requerida para que sea aceptada la compactación de un pavimento en la tabla 8, se observa que el Perú exige que el promedio de 4 probetas tenga en promedio una densidad mayor al 98% de la densidad de diseño (Marshall) en comparación con Argentina que requiere como mínimo 8 probetas por lote para analizar la densidad y el porcentaje de vacíos, el cual debe estar entre un rango de 3% a 6% calculado mediante el ensayo rice.

Tabla 8
Norma Perú vs Norma Argentina

Perú	Argentina
EPGC 2013 MTC	DNV 2019
Densidad	Densidad
$\geq 98\%$	$94\% \leq D \leq 97\%$
Densidad de referencia	Densidad de referencia
Densidad de laboratorio	Densidad Rice
Gmb	Gmm

Fuente: Elaboración propia

Se observa que se hace un equivalente en porcentaje de densidad, restando el porcentaje de vacíos al total y obteniendo ese valor, pero considerando que ese porcentaje sigue siendo en función de la densidad teórica máxima. Otra restricción es que las muestras deben ser extraídas para el cálculo del porcentaje de vacíos, y el uso de densímetro nuclear es solo referencial.

Norma peruana vs norma venezolana

Realizando la comparativa en función de la densidad requerida para que sea aceptada la compactación de un pavimento en la tabla 9, se observa que el Perú exige que el promedio de 4 probetas tenga en promedio una densidad mayor al 98% de la densidad de diseño (Marshall) en comparación con Venezuela que no determina la cantidad de probetas necesarias para la obtención de la densidad, deberá ser como mínimo el 97% de la densidad del laboratorio para ser aceptada la compactación.

Tabla 9
Norma Perú vs Norma Venezuela

Perú	Venezuela
EPGC 2013 MTC	COVENIN 2000
Densidad	Densidad
$\geq 98\%$	$\leq 97\%$
Densidad de referencia	Densidad de referencia
Densidad de laboratorio	Densidad de diseño
Gmb	Gmb

Fuente: Elaboración propia

En este caso la norma peruana es más exigente en cuestión de la cantidad de muestras que deberán ser extraídas, y en cuestión de la densidad la norma venezolana es menor en 1% con respecto a la densidad de diseño.

Norma peruana vs norma de costa rica

Realizando la comparativa en función de la densidad requerida para que sea aceptada la compactación de un pavimento en la tabla 10, se observa que el Perú exige que el promedio de 4 probetas tenga en promedio una densidad mayor al 98% de la densidad de diseño (Marshall) en comparación con Costa Rica que exige como mínimo que la densidad obtenida de las muestras sea el 91% de la densidad máxima teórica.

Tabla 10
Norma Perú vs Norma Costa Rica

Perú	Costa Rica
EPGC 2013 MTC	CR 2010
Densidad	Densidad
$\geq 98\%$	$91\% \leq D \leq 97\%$
Densidad de referencia	Densidad de referencia
Densidad de laboratorio	Densidad Rice
Gmb	Gmm

Fuente: Elaboración propia

En el caso de Costa Rica se observa que mantienen un rango amplio con respecto a otros países, en relación a la densidad, tomando como referencia el rango que tiene el instituto del asfalto con respecto al porcentaje de vacíos que va desde 4% al 8%.

5.3.2. Criterios de aceptación

Para la comparación de los criterios utilizados se realizó la tabla 11, en la cual se muestran los criterios según el país.

Tabla 11
Criterios de aceptación

CRITERIOS DE ACEPTACION UTILIZADOS EN PERÚ VS PAÍSES DE CENTRO Y SUDAMÉRICA										
CRITERIOS SEGÚN TIPO DE CONTROL	PERU	CHILE	BOLIVIA	BRASIL	ARGENTINA	PARAGUAY	COLOMBIA	ECUADOR	COSTA RICA	VENEZUELA
DENSIDAD DE REFERENCIA	DENSIDAD DE LABORATORIO	DENSIDAD DE DISEÑO (MARSHALL)	MASA ESPECÍFICA APARENTE MÁXIMA DEL PROYECTO	MASA ESPECÍFICA APARENTE DEL PROYECTO	DENSIDAD TEÓRICA MÁXIMA	DENSIDAD TEÓRICA MÁXIMA	DENSIDAD TEÓRICA MÁXIMA	DENSIDAD DE LABORATORIO	GRAVEDAD ESPECÍFICA MÁXIMA	DENSIDAD DE LABORATORIO
% DE VACÍOS DE LA MEZCLA	3% - 5%	4% - 6%	5% - 7%	3% - 5%	3% - 6%	3% - 6%	3% - 5% 4% - 6%*	3% - 5%	3% - 5%	
VALOR MÁXIMO DE DENSIDAD	NO ESPECÍFICA	NO ESPECÍFICA	NO ESPECÍFICA	101% DE LA DENSIDAD	NO ESPECÍFICA	NO ESPECÍFICA	NO ESPECÍFICA	NO ESPECÍFICA	NO ESPECÍFICA	NO ESPECÍFICA
TRÁFICO	NO CONSIDERA	NO CONSIDERA	NO CONSIDERA	NO CONSIDERA	NO CONSIDERA	NO CONSIDERA	NT1 SEGÚN NT2 NT3	NO CONSIDERA	NO CONSIDERA	NO CONSIDERA
MEDICION	4 PROBETAS POR JORNADA LABORAL	5 MUESTRAS CONSECUTIVAS	CADA 500M DE FRANJA REALIZADA CON UNA PROBETA MINIMA POR JORNADA	SE DETERMINA MEDIANTE PROCESO ALEATORIO	TESTIGOS CADA 100m DE FRANJA ALEATORIAM ENTE	TESTIGOS CADA 100m DE FRANJA ALEATORIA MENTE	MINIMO 5 SITIOS POR LOTE	4 PROBETAS POR JORNADA LABORAL	SE DETERMINA MEDIANTE PROCESO ALEATORIO	SE DETERMINA MEDIANTE PROCESO ALEATORIO
MULTAS	NO CONSIDERA	SEGÚN EL PROMEDIO DE 5 PROBETAS	NO CONSIDERA	NO CONSIDERA	NO CONSIDERA	NO CONSIDERA	NO CONSIDERA	NO CONSIDERA	NO CONSIDERA	NO CONSIDERA

Fuente: Elaboración propia.

En esta tabla se describe que criterios son usados para que una mezcla asfáltica compactada sea aceptada por la supervisión, teniendo en cuenta que la teoría nos determina rangos, estos a su vez pueden variar según la zona, así como factores climáticos. Es por eso que es importante conocer la perspectiva de cada país con relación al proceso de compactación, ya que que en la norma peruana se utiliza la densidad de laboratorio como referencia y en los países como argentina, Paraguay y Colombia, se priorizan los porcentajes de vacíos, si bien la densidad del laboratorio viene a ser una consecuencia del porcentaje de vacíos, en el camino puede haber un mal entendimiento de la necesidad de un óptimo porcentaje de vacíos, en la norma boliviana por ejemplo, nos determina un porcentaje mínimo de la densidad con respecto a la densidad de referencia, pero nos pone la condición de que en caso este sea menor al 97% de la densidad de laboratorio, se calculara el porcentaje de vacíos de las muestras y si están en un rango del 5% al 7% será aceptada la compactación.

5.4 Análisis de resultados

5.4.1. Valores de la densidad

Como se observó en la sección 5.3.1 donde se realizó un cuadro comparando los valores establecidos en la norma peruana vs las normas de los países de centro y Sudamérica, el Perú y Ecuador son los únicos países que exigen un porcentaje mínimo del 98% en promedio de la densidad de laboratorio tomada como referencia, esto nos dice que el proceso de compactación será más exigente debido a que el resto de países de toman como densidad de referencia a la densidad del laboratorio, toman como valor mínimo al 97% en promedio de la densidad, haciendo una comparación con los países que toman como referencia el porcentaje de vacíos a través de la densidad máxima teórica, que puesto en términos del porcentaje de la densidad el laboratorio tendría un valor del 96% al 97% de la densidad. Esto demostraría que según la experiencia de cada país se toman estos valores con mayor o menor exigencia, ya que durante el proceso de compactación conseguir valores cercanos al 100% de la densidad depende de factores de experiencia del Ing. de campo y los operadores, también considerando que durante el tiempo de vida el pavimento

asfáltico sigue aumentando su densidad debido al tránsito recurrente, que termina de compactar el pavimento.

5.4.2. Criterios de aceptación

Los criterios de aceptación usados por cada norma, permite conocer el enfoque que tienen sobre la compactación, es decir, el caso peruano solo considera una obtención de la densidad mediante el uso de briquetas o densímetro nuclear y comparar este valor con el valor en el laboratorio.

Porcentaje de vacíos:

Si bien todos los países determinan inicialmente el porcentaje de vacíos que deber tener la mezcla luego de ser compactada, esto solo es referido a las briquetas ensayadas para el diseño, el caso de Argentina que su densidad de referencia es la densidad teórica máxima y luego el cálculo del porcentaje de vacíos que debe estar entre 3% al 6%. El caso de Paraguay que usa la densidad teórica máxima con un porcentaje de vacíos del 3% al 6%. El caso de Colombia que usa la densidad máxima teórica con 3 rangos según el tráfico que se usa en el diseño siendo estos para NT1 3% a 5%, para NT2 3% a 5%, para NT3 4% a 6%. El caso de Costa Rica que exige un porcentaje del 3% al 5% pero a su vez su valor mínimo de la densidad con respecto a la densidad máxima teórica es de 91%.

Una consideración importante sobre el aspecto del porcentaje de vacíos se ve reflejada en la norma de Argentina, ya que menciona el cambio de enfoque al momento de la evaluación de la compactación, cambiando la priorización de obtener un porcentaje de la densidad de laboratorio, con la de enfocarse en el porcentaje de vacíos, ya que este criterio nos proporciona un efecto inmediato en el flujo y la durabilidad de la mezcla.

Tráfico:

En este aspecto, el país que trabaja su densidad de acuerdo al tráfico que pasara por ese pavimento es Colombia, ya que determina 3 Tipos de tráfico y cada uno con su densidad correspondiente, es un factor importante que se debería considerar más a menudo, ya que exigir el mismo proceso de compactación para lograr los valores determinados en otras normas podría ser contraproducente, por eso se usa una densidad mínima para cada tráfico correspondiente, siendo que para el tráfico más pesado (NT3) se exige 1 punto porcentual menos en comparación a los otros tipos de tráfico (NT1 y NT2) ,

esto puede ser que el mismo tráfico completara el proceso de compactación y no causara problemas de sobre compactación, lo que podría a lo largo de la vida útil generar exudación del asfalto.

Valor máximo de densidad:

Un valor mínimo de la densidad marca un referente para el correcto desenvolvimiento del pavimento, se demostró que de todas las normas no cuentan con un valor máximo de compactación, solo en el caso de Brasil nos determina que la densidad no puede ser mayor al 101% de la densidad de laboratorio, ya que según el Instituto del asfalto, un valor excesivo de compactación generaría poco espacio para que el asfalto interno al estar en funcionamiento genere exudación, ya que no cuenta con el porcentaje de vacíos necesarios para que el asfalto no expande a través del pavimento, generando oxidación por el contacto con el medio ambiente.

5.5 Contrastación de hipótesis

Hipótesis específica 1

H1-1. El valor mínimo y máximo de densidad en la mezcla asfáltica según la norma peruana no tienen los mismos valores que las normas de centro y Sudamérica.

H0-1. El valor mínimo y máximo de densidad en la mezcla asfáltica según la norma peruana tiene los mismos valores que las normas de centro y Sudamérica.

- Según el cuadro comparativo de cada país, se observó que el valor mínimo de densidad aceptada en la norma peruana que es del 98% de la densidad de laboratorio no coincide con las normas de los otros países de centro y Sudamérica, excepto con la norma ecuatoriana.
- Para el caso del valor máximo, la norma peruana no cuenta con un valor específico.
- Según (Hernández Gerardo, Ramírez Fernando; 2016) observo que una probeta humedecida y con diferentes grados de compactación solo a partir de un grado de compactación del 96% (Gmm) se obtuvo una resistencia mayor al 80% y que de probetas compactadas al 90%, 92% y 94% se observó una disminución de 0.415mm de ahuellamiento, teniendo en cuenta que en Colombia el porcentaje mínimo para el grado de compactación es de 94% para

tráfico NT1 y NT2 y de 93% para NT3. Valores distintos a los considerados en la norma peruana que utiliza la densidad de laboratorio (Gmb).

- Según (Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales ,2019) en la evaluación del porcentaje de compactación alcanzado en una obra de pavimentación, solo el 50% de las densidades obtenidas por los ensayos están dentro del rango de 92% al 97% de la densidad teórica máxima (Gmm) que es muy diferente al valor de la norma peruana que utiliza la densidad del laboratorio (Gmb).
- Por lo tanto, se valida la hipótesis H1-1 y se descarta la hipótesis nula H0-1.

Hipótesis específica 2

H1-2. Los criterios de aceptación de la norma peruana no siguen los mismos criterios de aceptación de las normas de centro y Sudamérica.

H0-2. Los criterios de aceptación de la norma peruana siguen los mismos criterios de aceptación de las normas de centro y Sudamérica.

- La norma peruana usa como criterio el uso de un porcentaje de la densidad de diseño, teniendo un valor mínimo. Para el caso de las otras normas que también usan este criterio, tanto como el porcentaje de la densidad de laboratorio o un porcentaje de la densidad máxima teórica. Pero se debe tener en cuenta que casos como Colombia que también incluye un criterio según el cual se exige un valor mínimo según el tráfico para el cual es diseñado el pavimento. Otro caso particular es el de Chile que aparte del porcentaje de densidad requeridos, establece como un criterio el uso de multas, ya que aun teniendo valores que disminuyan el promedio, la multa será un porcentaje según corresponda a cuanto disminuya la densidad promedio, pudiendo llegar a costar el 100% del costo del lote.
- Según (Arellano Lady, Caceres Claudia; 2018) los porcentajes de vacíos para una altitud mayor a los 3000 msnm que determina la norma peruana, en este caso un porcentaje de 2% a 4%, protegen a la carpeta asfáltica de las condiciones climáticas a las que esta será expuesta, en su trabajo de investigación se obtuvieron resultados que tenían un porcentaje de vacíos menores al 2% y se vio reflejado que ni el flujo que tendría que estar en un rango de 2mm a 4mm da como resultado en 2 días diferentes 1.84 y 1.74, una

estabilidad también menor de 563kg y 525kg siendo que no deberían ser menores a 800kg. Concluyendo la importancia de un porcentaje de vacíos que estén dentro del rango y en este caso considerando factores climatológicos que podrían influenciar en un mal comportamiento del pavimento asfáltico. Este criterio de la temperatura no está considerado en otros países, por lo que es importante tener en cuenta lo influyente de las condiciones climáticas.

- Por lo tanto, se valida la hipótesis H1-2 y se descarta la hipótesis nula H0-2.

Hipótesis General

Comparando los valores de compactación de centro y sudamérica se pudo determinar mediante la hipótesis alterna (H1-1, H1-2) que estos no cumplen los criterios de aceptación por lo que se invalida la hipótesis general.

CONCLUSIONES

1. Los valores de compactación no son iguales con los valores de las normas de centro y Sudamérica. El porcentaje mínimo de densidad para la aceptación de la compactación de la carpeta asfáltica en la norma peruana es de 98% de la densidad de laboratorio, y es diferente a los valores de las normas de centro y Sudamérica. Por lo que se considera más exigente al requerir mayor compactación.
2. La norma peruana no toma en cuenta los mismos criterios de aceptación que las normas de centro y Sudamérica, ya que este solo considera el porcentaje de la densidad tomando como referencia un porcentaje de la densidad del laboratorio.
3. La norma peruana no determina un porcentaje máximo de compactación, lo que podría generar una excesiva compactación disminuyendo el porcentaje de vacíos. La norma colombiana es la única norma de las estudiadas que considera distintos porcentajes de densidad según el nivel de tráfico, lo que permite tener un objetivo más claro al momento de compactar la mezcla asfáltica. La norma chilena permite tener valores que disminuyan la densidad promedio, pero estableciendo un sistema de multas. La norma brasileña es la única norma que establece un máximo en el porcentaje de densidad, teniendo como valor a 101% de la densidad de laboratorio. Este valor nos permite ver que el Ministerio de Transportes de Brasil, sabe de la importancia de no excederse en el porcentaje de densidad por las fallas que se pueden generar, entre ellas la exudación.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda un estudio comparativo simultaneo entre la densidad de laboratorio y la densidad teórica máxima, para determinar el grado de importancia de ambas y estandarizar un modelo de control óptimo.
2. Se recomienda realizar estudios de campo, determinando el rango específico que determinaría un óptimo comportamiento para el caso peruano, teniendo en cuenta que en el Perú existen diferentes regiones.
3. Se recomienda seguir investigando las normas de otros países, ya que estos pueden ser actualizados con criterios nuevos o en base a las experiencias previas demostrando su óptimo funcionamiento.
4. Se recomienda evaluar los criterios utilizados en otros países para determinar y mejorar la norma, ya que la compactación adecuada puede generar mejor comportamiento del pavimento asfáltico.
5. Se recomienda mayor relevancia en el estudio de la compactación de mezclas asfálticas contrastando valores reales y determinando el nivel de esfuerzo necesario para lograr valores óptimos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arellano, L., Caceres, C. (2018). *Importancia de la evaluación a las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas en caliente a más de 3000 msnm para el proyecto carretera desvío Imperial- Pampas*. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.
- Asociación Paraguaya de carreteras. (2019). *Manual de carreteras de Paraguay*.
- Asphalt Institute (2014). *MS-2 Asphalt Mix Design Methods*.
- Asphalt Institute. *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente. Serie de manuales N° 22 (MS-22)*, Asphalt Institute, Lexington, 1991.
- Cremades, I., Garnica P., Limón P., Miro R. (2007). *Efecto de la temperatura de compactación sobre el módulo resiliente de las mezclas asfálticas*. Premio internacional a la innovación en carreteras Juan Antonio Fernández del Campo II Edición.
- Delgado, H., Garnica, P., Sandoval, C. (2005). *Análisis de varianza del efecto de algunos factores que influyen en la deformación permanente de mezclas asfálticas*. Instituto mexicano del transporte.
- Dirección Nacional de Vialidad. (2019). *Guía de Buenas Prácticas para el Control de Calidad de Mezclas Asfálticas y Aplicaciones Bituminosas*.
- Dorado, H., Guarín, A. (2004). *Influencia de la energía y temperatura de compactación de mezclas asfálticas sobre su composición volumétrica y comportamiento dinámico, utilizando el equipo Marshall, giratorio (Superpave) y compactación a presión*. Universidad del Cauca.
- H.-J. Kloubert (2010). *Nociones fundamentales sobre compactación de mezclas asfálticas*, Bomag GmbH, Fayat Group, Alemania.
- Hernández, G., Ramírez F. (2016). *Análisis de la influencia del grado de compactación de una mezcla asfáltica en su deformación permanente y la susceptibilidad a la humedad*. Universidad Católica de Colombia.
- Instituto Nacional de Vías. (2022). *Especificaciones generales de construcción de carreteras*.
- Limón Covarrubias P. (2010). *Aseguramiento de la calidad en mezclas bituminosas mediante la aplicación del ensayo de modulo resiliente en el control de su aplicación*. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.

- Linden F. and J. Van Der Heide (1987). *Some Aspects of the Compaction of Asphalt Mixes and its Influence on Mix Properties*. Proceedings. The Association of Asphalt Paving Technologist, Vol. 56.
- Maldonado, J., Pozo, J. (2022). *Comparación entre parámetros Marshall de mezclas asfálticas en caliente, obtenidos sobre muestras taladradas y briquetas compactadas en sitio*. Universidad Politécnica Salesiana, Quito.
- Manual de Obras Públicas y Transportes. (2010). *Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes*.
- Martínez, A. (2000). *Aseguramiento de la calidad de mezclas bituminosas mediante la aplicación del ensayo de tracción indirecta en el control de su ejecución*. Tesis doctoral, Barcelona, España, 2000.
- M.F. *Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares” Normativa de Carreteras*. Ministerio de Fomento. España.
- Ministerio de Transportes y Obras Públicas de Ecuador. (2013). *Norma Ecuatoriana vial*.
- Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones (2019). *Red Vial Existente del Sistema Nacional de Carreteras, según Superficie de Rodadura: 1990-2018*.
- Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones (2013). *Manual de Carreteras: Especificaciones técnicas generales para construcción*.
- Monismith C. L. y A. A. Tayebali (1988). *Permanent Deformation (Rutting) Considerations in Asphalt Concrete Pavements Sections*. Proceedings, The Association of Asphalt Paving Technologists, Williamsburg, Virginia, Vol. 57.
- Secretaría de infraestructura, C. y. T. (2010). *Normativa para la Infraestructura del transporte*.
- Silvestre, A. (2015). *Estudio comparativo de las normas técnicas para la construcción de pavimentos flexibles en Colombia y Brasil*. Universidad libre seccional Pereira.
- Unidad de auditoría técnica (2019). *Evaluación de los procesos de compactación de la mezcla asfáltica colocada en los proyectos de conservación vial*. Laboratorio nacional de materiales y modelos estructurales.
- Uge P. y P.J. Van De Loo. (1974). *Permanent Deformation of Asphalt Mixes*. Koninklijke/Shell-Laboratorium, Ámsterdam, November 1974.
- US Corps of Engineers (2000). *Hot Mix Asphalt Paving Handbook 2000*.

Vargas, E. (2019). *Efecto de la temperatura de mezcla- compactación y la distancia de transporte en las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica en caliente en la región centro*. Universidad Continental.

ANEXOS

Matriz de consistencia

Título: Valores de compactación de mezclas asfálticas en centro y sudamérica según los criterios de aceptación

PROBLEMÁTICA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	METODOLOGÍA
Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	Variable independiente			
¿Cuáles son los valores de compactación de mezclas asfálticas en centro y sudamérica según los criterios de aceptación?	Comparar los valores de compactación de mezclas asfálticas en la norma peruana con los valores de centro y sudamérica según la criterios de aceptación, año 2022.	Los valores de compactación de mezclas asfálticas cumplen los criterios de aceptación en centro y sudamérica.	X: Valores de compactación	Densidad	Criterios para diseño de mezcla asfáltica	METODO DE INVESTIGACIÓN Método : Deductivo Orientación: Aplicada Enfoque: Cuantitativo Recolección de datos: Retrolectivo TIPO DE INVESTIGACION Descriptivo- Correlacional
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Variable dependiente			
1) ¿Cuál es el valor mínimo de la densidad en la mezcla asfáltica en la norma Peruana comparada con las normas de centro y sudamérica?	1) Establecer el valor mínimo de la densidad en la mezcla asfáltica según la norma Peruana para compararlo con los valores establecidos en las normas de centro y sudamérica.	1) El valor mínimo de densidad en la mezcla asfáltica según la norma peruana no tienen los mismos valores que las normas de centro y sudamérica.	Y: Criterios de aceptación			NIVEL DE INVESTIGACION Descriptivo, Explicativo DISEÑO DE INVESTIGACIÓN No experimental, Transversal, Retrospectivo
2) ¿Cuáles son los criterios de aceptación establecidos en la norma peruana comparados con los criterios de aceptación de las normas de centro y sudamérica?	2) Analizar los criterios de aceptación de la norma peruana para compararlos con los criterios de aceptación de las normas de centro y sudamérica.	2) Los criterios de aceptación de la norma peruana no siguen los mismos criterios de aceptación de las normas de centro y sudamérica.		Calidad técnica	Porcentaje de compactación	ESTUDIO DEL DISEÑO POBLACION Valores de compactacion aceptados según las normas. MUESTRA Centro y sudamérica TÉCNICAS E INSTRUMENTOS

Matriz de Consistencia

Fuente: Elaboración propia