

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela Profesional de Ingeniería Civil



TESIS

“Análisis de la granulometría de los agregados de la cantera El Pedregal
y su influencia en las mezclas asfálticas en caliente en la ciudad de
Abancay, 2019”

Presentado por:

DERRIC KIM BOZA CARBONELLI
MILAGROS STÉFANY RÍOS CHÁVEZ

Para optar el título profesional de:

INGENIERO CIVIL

Abancay - Apurímac – Perú

2022

Tesis

Análisis de la granulometría de los agregados de la cantera El Pedregal y su influencia en las mezclas asfálticas en caliente en la ciudad de Abancay, 2019.

Línea de investigación:

Gestión de la infraestructura para el desarrollo sostenible

Asesor:

Ing. Edilberto Gálvez Barrientos



**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

**ANÁLISIS DE LA GRANULOMETRÍA DE LOS AGREGADOS DE LA
CANTERA EL PEDREGAL Y SU INFLUENCIA EN LAS MEZCLAS
ASFÁLTICAS EN CALIENTE EN LA CIUDAD DE ABANCAY, 2019**

Presentado por **DERRIC KIM BOZA CARBONELLI, y MILAGROS
STÉFANY RÍOS CHÁVEZ** para optar el título de: Ingeniero Civil

Sustentado y aprobado el **24 de junio del 2022** ante el jurado:

Presidente: Ph. D Abbon Alex Vásquez Ramírez

Primer Miembro: Ing. Mauro Samuel Altamirano Camacho

Segundo Miembro: Mg. Fredy Quispe Ferrel

Asesor: Ing. Edilberto Gálvez Barrientos

Dedicatoria

A Dios todopoderoso y a mis padres: Betty Carbonelli y Wilfredo Boza por guiarme por el camino del bien, aconsejándome y acompañarme en todas las etapas de mi vida, por estar siempre ahí cuando más los necesité.

A mi hermana por brindarme su apoyo incondicional en todos los momentos compartidos y ser quien me guía a culminar cada etapa de mi vida.

Derric Kim

A Dios quien guía todos mis pasos, a mi madre Rosa Chávez Q.E.P.D., por ser el ángel que inspira mi vida, a mi padre Porfilio Ríos por el empuje constante en cada etapa de mi vida.

A mi hermana Katdlin Julieta por ser el soporte que necesito y a mis hermanos Milton y Kelly por ese amor incondicional.

Milagros Stéfany

Agradecimiento

Nuestro más sincero agradecimiento al Ing. Edilberto Gálvez Barrientos por brindarnos sus conocimientos, orientaciones, su paciencia y motivación, las cuales fueron fundamentales en el proceso de elaboración de la presente tesis.

A nuestros docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Tecnológica de los Andes, quienes guiaron y pusieron a nuestra disposición el material necesario para nuestra tesis.

Índice de contenidos

Portada.....	i
Pos portada.....	ii
Página de jurados	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimiento	v
Índice de contenidos.....	vi
Índice de tablas.....	x
Índice de figuras	xiii
Índice de fórmulas.....	xiv
Resumen.....	xv
Abstract	xvii
Introducción	xviii
Capítulo I.....	1
Planteamiento del problema.....	1
1.1. Realidad problemática	1
1.2. Planteamiento del problema.....	3
1.2.1. Formulación de problema	3
1.2.2. Problema general	3
1.2.3. Problemas específicos:.....	4
1.3. Justificación de la investigación	4
1.4. Objetivos de la investigación	5
1.4.1. Objetivo general.....	5
1.4.2. Objetivos específicos:	6

1.5.	Delimitación de la investigación.....	6
1.5.1.	Delimitación espacial.....	6
1.5.2.	Delimitación conceptual.....	6
1.5.2.	Delimitación social	7
1.5.3.	Delimitación científica.....	7
1.5.4.	Delimitación económica	7
1.6.	Viabilidad de la investigación.....	7
1.6.1.	Viabilidad técnica	7
1.6.2.	Viabilidad económica	7
1.7.	Limitaciones.....	8
	Capítulo II	9
	Marco teórico	9
2.1.	Antecedentes de la investigación	9
2.1.1.	A nivel internacional.....	9
2.1.2.	A nivel nacional	13
2.1.3.	A nivel regional y local.....	18
2.2.	Bases teóricas.....	18
2.2.1.	Granulometría de los agregados.....	18
2.2.2.	Granulometría MAC-02.....	20
2.2.3.	Granulometría Superpave	22
2.2.4.	Mezclas asfálticas en caliente	27
2.2.5.	Diseño de mezclas asfálticas en caliente.	48
2.3.	Marco conceptual.....	63
	Capítulo III.....	67

Metodología de la investigación	67
3.1. Hipótesis	67
3.1.1. Hipótesis general.....	67
3.1.2. Hipótesis específicas:.....	67
3.2. Método	68
3.3. Tipo de investigación.....	69
3.4. Nivel o alcance de investigación.....	70
3.5. Diseño de investigación	70
3.6. Operacionalización de variables	71
3.7. Población, muestra y muestreo	72
3.7.1. Población.....	72
3.7.2. Muestra	72
3.7.3. Muestreo	73
3.8. Técnicas e instrumentos.....	73
3.8.1. Técnica de recolección de datos	73
3.8.2. Instrumentos utilizados en la recolección	74
3.9. Consideraciones éticas	74
3.10. Procesamiento estadístico	75
Capítulo IV.....	76
Resultados y discusión	76
4.1. Resultados.....	76
4.1.1. Resultados de la variable: granulometría de los agregados	76
4.1.2. Resultados de la variable: mezcla asfáltica en caliente.	80
4.1.3. Resultados de objetivo específico 1	87

4.1.4.	Resultados de objetivo específico 2.....	88
4.1.5.	Resultados de objetivo específico 3.....	89
4.1.6.	Resultados de objetivo específico 4.....	90
4.2.	Discusión de resultados.....	91
4.3.	Prueba de hipótesis	99
4.3.1.	Contrastación de hipótesis específica 1	102
4.3.2.	Contrastación de hipótesis específica 2	104
4.3.3.	Contrastación de hipótesis específica 3	106
4.3.4.	Contrastación de hipótesis específica 4	109
	Conclusiones:	112
	Recomendaciones:.....	114
	Referencias bibliográficas	115
	ANEXOS.....	121

Índice de tablas

Tabla 1 Medida de muestras.....	19
Tabla 2 Cantidad mínima de muestra para granulometría del agregado grueso	20
Tabla 3 Gradaciones para mezclas asfálticas en caliente	21
Tabla 4 Especificación para un tamaño máximo nominal de 12,5mm	27
Tabla 5 Gradación de las muestras de ensayo	38
Tabla 6 Ensayo de partículas chatas y alargadas.....	39
Tabla 7 Cantidad mínima de muestra para el ensayo de partículas fracturadas.....	40
Tabla 8 Peso mínimo de la muestra para el ensayo de G. E. y absorción	42
Tabla 9 Cantidad mínima de muestra para el ensayo de durabilidad al MgSO ₄ - AF.....	43
Tabla 10 Cantidad mínima de muestra para el ensayo de durabilidad al MgSO ₄ - AG.....	43
Tabla 11 Cantidad de agua para el ensayo de sales solubles	44
Tabla 12 Valor de azul de metileno y el comportamiento esperado	45
Tabla 13 Caracterización del agregado grueso	47
Tabla 14 Caracterización del agregado fino.....	47
Tabla 15 Requerimientos para los agregados gruesos	50
Tabla 16 Requerimientos para los agregados finos.....	50
Tabla 17 Selección del tipo de cemento asfáltico	51
Tabla 18 Especificaciones del cemento asfáltico por penetración	52
Tabla 19 Requerimientos físicos de la cal.....	52
Tabla 20 Rangos de temperatura de aplicación.....	53
Tabla 21 Requisitos para la mezcla de concreto bituminoso	54
Tabla 22 Vacíos mínimos en el agregado mineral (VMA)	55
Tabla 23 Cuadro de operacionalización de variables.....	72

Tabla 24 Componentes granulometría MAC-02.....	77
Tabla 25 Componentes de la granulometría Superpave.....	79
Tabla 26 Resultados caracterización del agregado grueso.....	80
Tabla 27 Resultados caracterización del agregado fino.....	81
Tabla 28 Dosificación para pastillas con peso aproximado de 1250gr.....	82
Tabla 29 Mezcla asfáltica propuesta – MAC-02 C.A. 6.3%.....	84
Tabla 30 Resultados ensayo mezcla asfáltica – MAC-02 C.A. 6.3%.....	84
Tabla 31 Mezcla asfáltica propuesta – Superpave C.A. 6.3%.	86
Tabla 32 Resultados ensayo mezcla asfáltica – Superpave C.A. 6.3%.....	86
Tabla 33 Promedios de estabilidad para distintos % de asfalto, MAC-02.....	87
Tabla 34 Promedios de estabilidad para distintos % de asfalto, Superpave	88
Tabla 35 Promedios de fluencia para distintos % de asfalto, MAC-02	88
Tabla 36 Promedios de fluencia para distintos % de asfalto, Superpave.....	89
Tabla 37 Promedios de estabilidad/fluencia % de asfalto, MAC-02	89
Tabla 38 Promedios de estabilidad/fluencia % de asfalto, Superpave.....	90
Tabla 39 Promedios de porcentajes de V.M.A de asfalto, granulometría MAC-02	91
Tabla 40 Promedios de porcentajes de V.M.A de asfalto, granulometría Superpave.....	91
Tabla 41 Determinación del nivel de significancia según T Student.....	101
Tabla 42 T Student para valores de estabilidad MAC-02 y estabilidad Superpave.....	102
Tabla 43 T Student para valores de estabilidad MAC-02 y estabilidad Superpave.....	103
Tabla 44 T Student para valores de fluencia MAC-02 y fluencia Superpave.....	105
Tabla 45 T Student para valores de fluencia MAC-02 y fluencia Superpave.....	105
Tabla 46 T Student para estabilidad - flujo MAC-02 y estabilidad - flujo Superpave	107
Tabla 47 T Student para estabilidad/flujo MAC-02 y estabilidad/flujo Superpave.....	108

Tabla 48 T Student para valores % V.M.A MAC-02 y % V.M.A Superpave	109
Tabla 49 T Student para valores de fluencia MAC-02 y fluencia Superpave.....	110

Índice de figuras

Figura 1 Gráfica Semilogarítmica Marshall MAC-02	21
Figura 2 Representación de Granulometrías según la FHWA	23
Figura 3 Ilustración de como graficar las abscisas en la metodología Superpave	24
Figura 4 Límites para las granulometrías Superpave	26
Figura 5 Ilustración del VMA en una probeta de mezcla compactada	29
Figura 6 Esquema de gravedad específica	31
Figura 7 Diagrama de compactación de una mezcla asfáltica en caliente	32
Figura 8 Caracterización de partículas chatas y alargadas.	39
Figura 9 Diagrama de equipo para el ensayo de angularidad del agregado fino.	41
Figura 10 Relación entre VMA y el límite de especificación	58
Figura 11 Efecto de los esfuerzos de compactación Marshall en VMA y V_a	61
Figura 12 Gráfica semilogarítmica husos MAC-02 para la granulometría MAC-02	78
Figura 13 Gráfica fúller granulometría Superpave T.M.N. 12.5 mm.	80
Figura 14 a), b), c), d), e) y f), Curvas Marshall para la granulometría MAC-02.	83
Figura 15 a), b), c), d), e) y f) Curvas Marshall para la granulometría Superpave	85
Figura 16 Esquema típico al 95% del nivel de significancia	101
Figura 17 Esquema típico valores de estabilidad	103
Figura 18 Esquema típico valores de fluencia	106
Figura 19 Esquema típico valores de relación estabilidad - flujo	108
Figura 20 Esquema típico valores de % de vacíos en el agregado mineral	110

Índice de fórmulas

(EC- 1) Gráfica Fuller	22
(EC- 2) Gravedad específica neta del agregado	33
(EC- 3) Gravedad específica efectiva del agregado	33
(EC- 4) Gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica	34
(EC- 5) Absorción del asfalto.....	35
(EC- 6) Contenido de asfalto efectivo de la mezcla	35
(EC- 7) Porcentaje de vacíos del agregado mineral en la mezcla compactada	36
(EC- 8) Porcentaje de vacíos de aire en la mezcla compactada	36
(EC- 9) Porcentaje de vacíos llenos con asfalto en la mezcla compactada	37
(EC- 10) Índice de plasticidad.....	46
(EC- 11) Distribución T-Student	99
(EC- 12) Hipótesis nula	100
(EC- 13) Hipótesis alterna	100
(EC- 14) Intervalos de confianza.....	100

Acrónimos

AF	: Agregado fino
AG	: Agregado grueso
CA	: Concreto asfáltico
T.M.	: Tamaño máximo
MTC	: Ministerio de Transportes y Comunicaciones
NTP	: Norma Técnica Peruana
MAC	: Mezcla asfáltica den caliente
VMA	: Vacíos en el agregado mineral
VFA	: Vacíos llenos de asfalto
TMN	: Tamaño máxima nominal
IMT	: Instituto Mexicano del Transporte
EG-2013	: Especificaciones técnicas generales para la construcción 2013
EM-2016	: Manual de ensayo de materiales para carreteras 2016
ASSHTO	: Asociación americana de autoridades estatales de carretera y transporte

Resumen

En la presente investigación se analiza la granulometría de los agregados y su influencia en las mezclas asfálticas por medio de la comparación de las propiedades físicas, mecánicas y volumétricas obtenidas empleando la metodología Marshall con la granulometría convencional MAC-02 y la propuesta de mejora con la granulometría Superpave.

Se realizó los ensayos de caracterización de los agregados pétreos de acuerdo al Manual de Ensayo de Materiales EM-2016 del MTC para la combinación de agregados de las dos granulometrías empleadas MAC-02 y Superpave donde cumplieron satisfactoriamente los ensayos excepto el de adherencia y absorción del agregado fino.

El análisis posterior se enfocó en los resultados obtenidos del ensayo Marshall, donde se moldearon 15 pastillas de asfalto para la mezcla asfáltica empleando el huso granulométrico MAC-02 y 15 pastillas de asfalto empleando el huso granulométrico Superpave, obteniéndose así el porcentaje óptimo de asfalto y con ello los valores de las dimensiones de la mezcla asfáltica en caliente (estabilidad, flujo, relación estabilidad/flujo y % de vacíos en el agregado mineral).

Finalmente, la estabilidad y la relación estabilidad/flujo de la mezcla asfáltica en caliente aplicada al huso granulométrico Superpave tiene influencia con un cambio significativo en comparación a la mezcla asfáltica en caliente con el huso granulométrico MAC-02, en cuanto al flujo y al % de vacíos en el agregado mineral de la mezcla asfáltica en caliente aplicada al huso granulométrico Superpave no tiene influencia con un cambio significativo en comparación a los valores obtenidos de la mezcla asfáltica en caliente con el huso granulométrico MAC-02.

Palabras claves: Granulometría, mezclas asfálticas.

Abstract

In the present investigation, the granulometry of the aggregates and its influence on the asphalt mixtures is analyzed by means of the comparison of the physical, mechanical and volumetric properties obtained using the Marshall methodology with the conventional granulometry MAC-02 and the improvement proposal with the Superpave granulometry.

The characterization tests of the stone aggregates were carried out according to the Materials Testing Manual EM-2016 of the MTC for the combination of aggregates of the two granulometries used, MAC-02 and Superpave, where the tests were satisfactorily fulfilled except for adhesion and absorption of the fine aggregate.

The subsequent analysis focused on the results obtained from the Marshall test, where 15 asphalt tablets were molded for the asphalt mixture using the MAC-02 granulometric spindle and 15 asphalt tablets using the Superpave granulometric spindle, thus obtaining the optimum percentage of asphalt and with this, the values of the dimensions of the hot asphalt mixture (stability, flow, stability/flow ratio and % of voids in the mineral aggregate).

Finally, the stability and the stability/flow ratio of the hot asphalt mixture applied to the Superpave granulometric spindle has an influence with a significant change compared to the hot asphalt mixture with the MAC-02 granulometric spindle, in terms of flow and % of voids in the mineral aggregate of the hot asphalt mixture applied to the Superpave granulometric spindle has no influence with a significant change compared to the values obtained from the hot asphalt mixture with the MAC-02 granulometric spindle.

Keywords: Granulometry, asphalt mixtures

Introducción

En el Perú, las mezclas asfálticas en caliente son ampliamente utilizadas en los pavimentos flexibles, desde pavimentos urbanos hasta la red vial nacional, estas se componen de agregados pétreos aglutinados con cemento asfáltico, calentados a una temperatura adecuada que facilita su mezcla y colocación, a su vez permite la apertura casi inmediata del tránsito vehicular lo cual es conveniente para su uso; por este motivo se considera importante investigar la mejora de las características de las mezclas asfálticas en caliente para pavimento flexible a través de la presente investigación teórica y experimental.

Teniendo en cuenta que el agregado pétreo constituye en peso el 90% de la mezcla asfáltica en caliente, su granulometría es muy importante al momento de analizar las características físicas, mecánicas y volumétricas.

La presente tesis analiza la granulometría desde el punto comparativo entre el huso granulométrico MAC-02 frente a la propuesta de mejora empleando el huso granulométrico Superpave, que considera una zona restrictiva con puntos de control y una línea de máxima densidad en una gráfica Fuller, se determinó que la mezcla asfáltica con huso granulométrico Superpave presenta diferencias sustanciales en comparación con el huso granulométrico MAC-02 propuesta en las Especificaciones Técnicas EG-2013 del MTC.

Considerando la convencionalidad del huso granulométrico MAC-02 con límites superiores e inferiores y el huso granulométrico Superpave surge la pregunta ¿De qué manera la granulometría de los agregados de la cantera El Pedregal influye en la mezcla asfáltica en caliente en la ciudad de Abancay, 2019?

El objetivo principal por la cual se realizó la investigación es analizar la granulometría de los agregados de la cantera El Pedregal y su influencia en las mezclas asfálticas en caliente en la ciudad de Abancay, 2019; la cual tiene por finalidad específica analizar si la granulometría

de los agregados de la cantera El Pedregal aplicada al huso granulométrico Superpave en comparación con su aplicación al huso granulométrico MAC-02 influye significativamente en las dimensiones (estabilidad, flujo, relación estabilidad/flujo y % de vacíos en el agregado mineral) de las mezclas asfálticas en caliente., diseñadas con la metodología Marshall, para lo cual se emplearon procedimientos estipulados en el Manual de Ensayo de Materiales EM-2016 y consideraron parámetros de la Especificaciones Técnicas EG-2013 del MTC en la obtención de datos.

Como hipótesis general tenemos que la granulometría de los agregados de la cantera El Pedregal influye en las mezclas asfálticas en caliente en la ciudad de Abancay, 2019. En la presente investigación, los resultados obtenidos dan una perspectiva amplia de conclusiones basados en los objetivos planteados donde estos resultados serán base para otras investigaciones relacionadas al diseño de mezclas asfálticas en caliente en la ciudad de Abancay.

Los ensayos de granulometría y caracterización de los agregados fueron realizados en el laboratorio GEOMAT SERV E.I.R.L. de la ciudad de Abancay y para la metodología Marshall los ensayos fueron ejecutados en el laboratorio HRUIZ-GEOPAV S.A.C. de la ciudad de Cusco, empleando agregados pétreos procedentes de la cantera El Pedregal ubicada en el Km. 143+000 lado izquierdo de la vía Nazca – Cusco, con cemento asfáltico de grado de penetración PEN 85/100 proveniente de la refinería de PETROPERÚ.

La investigación comprende los siguientes capítulos:

El Capítulo I detalla el planteamiento del problema, la formulación y justificación del problema a investigar, así como también objetivos y limitaciones para el desarrollo de la investigación.

En el Capítulo II, presenta el marco teórico, donde se describe los antecedentes de investigación, también se encuentran las bases teóricas fundamentales para el desarrollo del trabajo de investigación, así como la descripción del marco conceptual conjuntamente con los términos más importantes utilizados en la presente tesis.

El Capítulo III se describe la metodología empleada en la investigación, la población de estudio, técnicas e instrumentos empleados para la obtención de datos, así como también las consideraciones éticas y procesamiento de datos obtenidos.

En el Capítulo IV, se detalla el análisis y discusión de los resultados obtenidos a nivel de ambas variables, como también la prueba de hipótesis y la correspondiente contrastación de las hipótesis específicas hallados al análisis de la granulometría de los agregados y su influencia en la mezcla asfáltica en caliente diseñada por el método Marshall.

Por último, se presentan con las conclusiones más importantes y recomendaciones a las que llegó en la tesis.

Capítulo I

Planteamiento del problema

1.1. Realidad problemática

Las carreteras son estructuras fundamentales para el desarrollo de los países a nivel mundial debido a que son el medio por el cual se transportan individuos y mercancías de un lugar a otro de manera local, nacional o internacional, siendo así de vital importancia para el progreso de la economía en cualquier sociedad (Sankey, 2015). En consecuencia, las actividades relacionadas con su fabricación y conservación son fundamentales para el desarrollo de proyectos que mejoren la economía de una población.

El pavimento asfáltico corresponde a una de las opciones más comunes de las carreteras latinoamericanas como elemento estructural, es el motivo principal de esta investigación, donde es necesario comprender la innovación y los avances en materia al óptimo diseño y el mejoramiento del desempeño de la mezcla asfáltica en caliente para garantizar la vida útil de estas.

En nuestro país, el método Marshall es el método tradicional de diseño de mezclas asfálticas en caliente (MAC), mencionado por el Manual de Carreteras del Ministerio de Transportes y Comunicaciones. En Estados Unidos se desarrolló el método SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavements) que presenta una propuesta diferente del huso granulométrico convencional adicionando una línea de máxima rigidez y una zona de restricción plasmada en una gráfica Fuller de doble entrada.

En el Perú, la mezcla asfáltica más utilizada en la capa de rodadura son las mezclas asfálticas en caliente, que están compuestas por agregados pétreos y cemento asfáltico que se han calentado a una temperatura adecuada para su mezcla y colocación. Luego aparecieron las mezclas asfálticas en frío, donde se reemplazó el cemento asfáltico y en su lugar se empezó a hacer uso de las emulsiones asfálticas como ligante para formar la mezcla. La ventaja de estas mezclas en frío es que se pueden realizar sin la necesidad de calentar los componentes a altas temperaturas, pues el uso de la emulsión se puede realizar a temperatura ambiente, aunque sus principales inconvenientes han sido no poder utilizarse para condiciones de alto tráfico, a la vez que requieren mayores tiempos para la apertura al tránsito después de colocada y compactada.

En la ciudad de Abancay, se puede observar que el estado situacional de los pavimentos flexibles que se ubican en las vías de acceso, avenidas y calles, presentan ciertas patologías como deformaciones permanentes (roderas o ahuellamientos), fallas por fatiga (piel de cocodrilo) y desprendimientos (agregado – asfalto), que en conjunto con las precipitaciones pluviales ocasionan un bajo desempeño de carácter estructural en la carpeta asfáltica afectando así directamente a la vida útil del pavimento y al tránsito vehicular. Estas patologías dependen directamente de la granulometría de los agregados de tal manera que ante esta problemática consideramos necesario realizar mejoras en cuanto a la producción de las mezclas asfálticas y

sus componentes primarios que son los agregados pétreos por medio de la incorporación de nuevas tecnologías que se vienen empleando en el Perú y otros países.

Se plantea elaborar dos diseños de mezclas asfálticas en caliente mediante la metodología Marshall empleando el huso granulométrico MAC-02 y Superpave con el fin de analizar la influencia en las características físicas, mecánicas y volumétricas de la mezcla asfáltica en caliente y así determinar cambios significativos entre ambas.

Lo anteriormente detallado nos motiva a dejar un precedente del análisis de la granulometría de los agregados de la cantera El Pedregal y su influencia en las mezclas asfálticas en caliente en la ciudad de Abancay para que se emplee con la viabilidad correspondiente y sirva como base a estudios posteriores relacionados al tema.

1.2. Planteamiento del problema

1.2.1. Formulación de problema

Para mitigar los problemas que usualmente se presentan en los pavimentos de la ciudad de Abancay, se plantea analizar la granulometría de los agregados producidos en la cantera El pedregal considerando sus características físicas y mecánicas para luego evaluar su influencia como componentes de la mezcla asfáltica en caliente.

1.2.2. Problema general

¿De qué manera la granulometría de los agregados de la cantera El Pedregal influye en las mezclas asfálticas en caliente en la ciudad de Abancay, 2019?

1.2.3. Problemas específicos:

- a) ¿De qué manera la granulometría Superpave en comparación con la granulometría MAC-02 de los agregados de la cantera El Pedregal influirá en la estabilidad de las mezclas asfálticas en caliente?
- b) ¿De qué manera la granulometría Superpave en comparación con la granulometría MAC-02 de los agregados de la cantera El Pedregal influirá en el flujo de las mezclas asfálticas en caliente?
- c) ¿De qué manera la granulometría Superpave en comparación con la granulometría MAC-02 de los agregados de la cantera El Pedregal influirá en la relación estabilidad/flujo de las mezclas asfálticas en caliente?
- d) ¿De qué manera la granulometría Superpave en comparación con la granulometría MAC-02 de los agregados de la cantera El Pedregal influirá en el % de vacíos en el agregado mineral de las mezclas asfálticas en caliente?

1.3. Justificación de la investigación

Debido al poco mantenimiento de la red vial urbana de Abancay, así como las condiciones climáticas agrestes de las distintas zonas y el incremento acelerado del flujo vehicular que desfavorecen la vida útil de los pavimentos, se realiza esta investigación con el fin de determinar la mejora en la granulometría de los agregados y su influencia en las mezclas asfálticas en caliente. Este análisis permitirá determinar las propiedades óptimas de las mezclas asfálticas en caliente para el buen desempeño de las vías pavimentadas y servirá como precedente para los proyectos de pavimentación flexible en los gobiernos locales y la población, ya que estos se beneficiarán por el incremento del comercio en las zonas contiguas a las vías lo que generará mayor trabajo e ingresos a los habitantes y vecinos del lugar.

También, se justifica económicamente esta investigación ya que al tener una óptima mezcla asfáltica en caliente se obtendrá un mejor desempeño de los pavimentos flexibles lo que generará un menor costo de mantenimiento y mayor durabilidad con el tiempo.

De la misma manera, el presente estudio pretende determinar la influencia de la granulometría de los agregados de la cantera El Pedregal en las propiedades de la mezcla asfáltica en caliente (estabilidad, flujo, relación estabilidad/flujo y % de vacíos en el agregado mineral) para su uso, obteniendo como resultado una mezcla asfáltica que tenga buen comportamiento mecánico acorde a las especificaciones técnicas generales EG-2013. En concordancia con lo anterior, permitirá generar conocimientos para investigaciones posteriores relacionadas al tema.

En este sentido, es vital conocer las características físicas y mecánicas de los agregados que se utilizan en pavimentos flexibles, así poder elaborar mezclas asfálticas en caliente con excelentes propiedades y en óptimas condiciones que garanticen sus especificaciones de diseño y evitando su temprano deterioro, finalmente exigir el cumplimiento de las normas EG-2013 y EM-2016 del MTC para satisfacer las necesidades en lo que respecta a proyectos viales en la ciudad de Abancay.

1.4. Objetivos de la investigación

1.4.1. Objetivo general

Determinar la influencia de la granulometría de los agregados de la cantera El Pedregal en las mezclas asfálticas en caliente en la ciudad de Abancay, 2019.

1.4.2. Objetivos específicos:

- a) Determinar si la granulometría Superpave en comparación con la granulometría MAC-02 de los agregados de la cantera El Pedregal influye en la estabilidad de las mezclas asfálticas en caliente.
- b) Determinar si la granulometría Superpave en comparación con la granulometría MAC-02 de los agregados de la cantera El Pedregal influye en el flujo de las mezclas asfálticas en caliente.
- c) Determinar si la granulometría Superpave en comparación con la granulometría MAC-02 de los agregados de la cantera El Pedregal influye en la relación estabilidad/flujo de las mezclas asfálticas en caliente.
- d) Determinar si la granulometría Superpave en comparación con la granulometría MAC-02 de los agregados de la cantera El Pedregal influye en el % de vacíos en el agregado mineral de las mezclas asfálticas en caliente.

1.5. Delimitación de la investigación

1.5.1. Delimitación espacial

El estudio se realizó en la cantera El Pedregal de la ciudad de Abancay correspondiente al año 2019.

1.5.2. Delimitación conceptual

El presente estudio consiste en el análisis de la granulometría de los agregados y su influencia en las mezclas asfálticas en caliente.

1.5.2. Delimitación social

El estudio se realizó a los agregados pétreos provenientes de la cantera El Pedregal ubicada en el distrito de Abancay, provincia de Abancay.

1.5.3. Delimitación científica

El presente estudio se basa en el análisis de la granulometría de los agregados empleando los husos granulométricos MAC-02 y Superpave para su uso en las mezclas asfálticas en caliente respetando las especificaciones técnicas generales EG-2013.

1.5.4. Delimitación económica

Para la presente tesis, el financiamiento de todos los ensayos realizados y demás fueron cubierto por los investigadores.

1.6. Viabilidad de la investigación

1.6.1. Viabilidad técnica

Con la ayuda de expertos (asesor, docentes y dictaminantes de la E.P. Ing. Civil) con amplia experiencia en pavimentos flexibles, así como los laboratorios GEOMAT SERV E.I.R.L. y HRUIZ GEOPAV INGENIEROS S.A.C. que cuentan con el equipamiento especializado con la certificación correspondiente para ensayo de suelos y pavimentos, fue posible llevar a cabo la tesis.

1.6.2. Viabilidad económica

Todo el recurso económico invertido en el desarrollo de la tesis se financió con el propio dinero de los investigadores, se llegó a un acuerdo con los laboratorios GEOMAT SERV

E.I.R.L. y HRUIZ GEOPAV INGENIEROS S.A.C, los cuales con fines de investigación accedieron a precios especiales.

1.7. Limitaciones

Las limitaciones analizadas en los distintos ámbitos para el presente tema de investigación serán las siguientes:

En el ámbito tecnológico, la ausencia de un laboratorio especializado en pavimentos asfálticos dentro de la región debidamente implementado para realizar la metodología Marshall y Superpave.

En el ámbito científico, no existe antecedentes locales ni regionales con respecto a la investigación en mezclas asfálticas en caliente.

En el ámbito económico y social, la ausencia de un laboratorio de pavimentos en la Universidad Tecnológica de los Andes, obligó a recurrir a laboratorios externos (Abancay – Cusco); en lo social, la planta de producción de mezcla asfáltica en caliente de la Municipalidad de Abancay se encuentra inoperativa por tal motivo no se planteó un tramo de prueba y se limitó la investigación al diseño de la mezcla asfáltica en caliente.

Y por último en el aspecto tiempo, la demanda en el laboratorio de la Universidad Tecnológica de los Andes, retrasaría el cronograma de ensayos propuesto, por lo que se optó laboratorios externos.

Capítulo II

Marco teórico

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. A nivel internacional.

Fernández (2018), en su investigación de grado: “Diseño volumétrico de una mezcla asfáltica en caliente destinada a la conservación de una pista para el aeropuerto Arturo Merino Benítez mediante metodología Superpave”, tuvo como objetivo general el de establecer los parámetros de diseño de la MAC en base a las especificaciones técnicas presentadas en el proyecto de conservación de pista del aeropuerto Arturo Merino Benítez. La metodología empleada en la investigación fue de diseño experimental. Los resultados de la investigación mostraron que la metodología Superpave recomienda que la mezcla deba tener un porcentaje de un 4 por ciento de vacíos de aire para poseer un buen comportamiento estructural en terreno. Finalmente, como conclusión que la producción y diseño en laboratorio involucra procedimientos minuciosos y/o detallados para conseguir las exigencias de la metodología y

las especificaciones técnicas. Esto es difícil reproducirlo en terreno, cuando las cantidades de producción son de alto volumen; bajo estas condiciones pueden descuidarse los detalles. Complementario a lo anterior, los ensayos donde se evalúa la susceptibilidad a la humedad y los de desempeño, asemejan condiciones ambientales y cantidades de carga por tráfico una vez que el pavimento este en servicio; aun así, estos ensayos no son totalmente fiables para corroborar el desempeño a futuro de la mezcla, por lo cual se hace recomendable hacer un seguimiento del pavimento durante el tiempo de servicio para recopilar información y mejorar el sistema de diseño.

Rojas (2017), en su investigación de postgrado: “Caracterización de concretos asfálticos y sus agregados con la aplicación de técnicas de análisis de imagen”, el objetivo principal fue profundizar en el conocimiento de las propiedades de la micro y macro estructura de mezclas asfálticas, usando herramientas petrográficas y de análisis de imagen, el investigador trató de identificar aspectos relacionados con la estructura interna, que puedan tener un impacto negativo en el comportamiento a mediano y largo plazo en mezclas asfálticas compactadas. Para el desarrollo en esta investigación, se utilizaron microfotografías de secciones delgadas y bloques pulidos de hormigón asfálticos, tomadas en una investigación previa, se seleccionaron en total 40 imágenes tomadas sobre muestras en bloques de concretos asfálticos pulidos, las cuales se analizaron mediante el Software Motic 2.0, a nivel micro y macroscópicos. El investigador pudo identificar aspectos como problemas de separación e interacciones entre agregados y asfalto en concreto asfáltico, evidenciados mediante falta de cubrimiento y adherencia, tamaño y distribución de vacíos con aire entre otros. Igualmente, cerca de 400 partículas de agregados observadas, se identificaron y cuantificaron aspectos relevantes, tales como tamaños de partículas, proporción de partículas alargadas, características de forma: esfericidad y redondez, textura superficial, angulosidad, porosidad

y micro fisuras. Los resultados del estudio muestran que, en la mayoría de los casos, una imagen no es representativa de cada bloque pulido por lo que las mediciones no se pueden tomar por separado, pero es necesario tener en cuenta todas las microfotografías de una misma área. Una valiosa contribución es el avance hacia la determinación cada vez más cuantitativa de rasgos micro y macro estructurales de agregados y concretos asfálticos, considerados nocivos para su buen funcionamiento durante su vida útil en una obra vial. Finalmente, como conclusión presentó un método que resume los pasos seguidos para analizar las imágenes de bloques pulidos; este método puede seguirse con confianza para evaluaciones similares de concretos asfálticos y sus materiales constitutivos, tanto en procesos de producción de mezclas, de construcción en obra o en evaluaciones de pavimentos en servicio.

Chiquito y Torres (2015), en su investigación de grado: “Diseño de mezcla asfáltica en caliente empleando agregados de la cantera San Vicente de Colonche y del río San Rafael de la provincia de Santa Elena utilizando el método Marshall”, su objetivo era lograr una ejecución de mezcla asfáltica en caliente empleando el método Marshall y haciendo uso de los agregados pétreos locales. Para su desarrollo realizaron ensayos para determinar las propiedades de los materiales utilizados de acuerdo a la normativa ASTM y especificaciones de la NEVI-2012 (Norma Ecuatoriana Vial), efectuaron varios ensayos de mezcla asfáltica compactada con distintos porcentajes de cemento asfáltico con la finalidad de obtener el porcentaje óptimo de asfalto basado en el método del Instituto del Asfalto, una vez que se obtuvieron los porcentajes óptimos de todas las componentes de la mezcla asfáltica procedieron a realizar ensayos de rotura, tracción directa y extracción del asfalto para la comprobación del diseño. Finalmente llegaron a la conclusión que los agregados de la cantera San Vicente de Colonche y Cantera de río San Rafael están en un rango de aceptabilidad a pesar de que los ensayos de terrones de arcilla, partículas deleznable, índice de aplanamiento y alargamiento y durabilidad exceden en

un 2% al máximo estipulado en las normas; de acuerdo a las propiedades de los agregados analizadas por los tesisistas lograron establecer las proporciones de una gradación densa para mezclas asfálticas en caliente, que son 45% de agregado grueso, 35% de arena triturada y 20% de arena de río, con un porcentaje óptimo de cemento asfáltico de 6,6%, así también llegaron a la conclusión de que comparando costos por metro cúbico de la mezcla asfáltica usando material pétreo importado versus el costo empleado en agregados pétreos locales se determinó una existencia de reducción de 7%, aproximadamente.

Terán y Morales (2015), en su investigación: “Diseño de mezclas asfálticas en caliente utilizando agregados de la Mina Cashapamba con metodología Marshall”, tuvieron como objetivo determinar una granulometría de los agregados y la adecuada proporción de cemento asfáltico en laboratorio para el diseño óptimo de las mezclas asfálticas en caliente. La metodología empleada por los investigadores fue de carácter exploratorio y descriptivo, para lo cual en su desarrollo se realizó la caracterización de los agregados para determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico a utilizar, luego se procedió a realizar el ensayo Marshall para el diseño de mezclas asfálticas en caliente. Los resultados de la investigación mostraron una dosificación óptima llamada fórmula maestra: agregado grueso 33.02%, agregado fino 61.34% y asfalto AC-20 5.63%. Finalmente, como conclusión determinaron que luego de realizar todas las pruebas necesarias se encontró que con los materiales de la mina Cashapamba son aptos para su uso en el diseño y producción de mezclas asfálticas en caliente, debido que cumple con la abrasión, índice de plasticidad, desgaste por sulfatos, porcentaje de caras fracturadas y achatadas, equivalente de arena.

Rangel (2015), en su investigación “Determinación de la resistencia a la tensión indirecta del concreto asfáltico variando la granulometría y el contenido de ligante”, tuvo como objetivo analizar el efecto que tienen las variaciones de la granulometría y del ligante en el

comportamiento mecánico a tensión indirecta del concreto asfáltico. La metodología empleada es de diseño experimental. Los resultados de la investigación indican que los valores de vacíos de aire (V_a) y vacíos en el agregado mineral (VAM), de los especímenes de concreto asfáltico disminuyen y los valores de vacíos llenos de asfalto (VAF) aumentan en la medida que las granulometrías se acercan a la línea de Fuller y el contenido de cemento asfáltico aumenta. Finalmente, como conclusión que, en el caso de las granulometrías densas, se determinó que la propuesta 7 resulta tener la más alta resistencia a la tensión indirecta, sin embargo, la relación de vacíos de aire más baja y con una buena resistencia mecánica le corresponden a la propuesta 5. La propuesta 8 también tiene una buena resistencia a la tensión indirecta, pero con mayores vacíos de aire. Estas granulometrías son adecuadas principalmente para su aplicación en estructuras hidráulicas.

2.1.2. A nivel nacional

Aguilar y Valer (2021), en su tesis de grado: “Análisis del comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica convencional frente a una mezcla asfáltica adicionada con botellas de plástico trituradas recicladas (BPTR) y granos de neumáticos reciclados (GNR) con agregados de la región del Cusco”, tuvieron como objetivo analizar comparativamente el comportamiento mecánico y la resistencia a la deformación permanente de una mezcla asfáltica convencional frente a una mezcla asfáltica adicionada con Botellas de plástico trituradas recicladas (BPTR) y Granos de neumáticos reciclados (GNR) , haciendo uso de agregados y cemento asfáltico (PEN 120/150) provenientes de la planta de asfalto de COPESCO de la región del Cusco. La metodología de diseño fue experimental. Los resultados de la investigación mostraron que los ensayos realizados en laboratorio al agregado grueso (piedra chancada de Morro Blanco-San Salvador-Pisac) cumplen con los requerimientos indicados en el Manual de carreteras “Especificaciones técnicas generales de construcción EG-2013” dispuesto por el Ministerio de

Transportes y Comunicaciones (MTC), así como también con la Norma Técnica CE.010 de pavimentos urbanos indicados en el Reglamento Nacional de Edificaciones del Perú (RNE). Finalmente llegaron a la conclusión ó que la mezcla asfáltica adicionada con BPTR y GNR presenta mejoras en las propiedades mecánicas y frente a la mezcla asfáltica convencional ya que, respecto a la estabilidad Marshall tiene una mejora de 66.58 kg, respecto al daño inducido por humedad presenta una mejora de 2.37% en el porcentaje de TSR, así como también se tiene una mejora en el ahuellamiento en 3.43 mm. Sin embargo, respecto al flujo Marshall se presenta un incremento de flujo en 0.02 mm.

Iberico (2019), en su tesis de grado: “Diseño de mezcla asfáltica en caliente mediante el ensayo Marshall adicionando fibra de acero en la ciudad de Yurimaguas – 2019”, tuvo como objetivo diseñar una mezcla asfáltica en caliente con la adición de fibra de acero, haciendo una comparación con el diseño de mezcla convencional. La metodología empleada fue aplicada – experimental. Para su desarrollo, se realizaron un total de 48 ensayos (briquetas) con 3 muestras por 4 diferentes porcentajes de concreto asfáltico, adicionando el 0%, 5%, 10% y 12% de fibra de acero. Los resultados de la investigación mostraron que al realizar el diseño MAC-02, el diseño convencional la estabilidad Marshall fue de 1192 kgf, y al incorporar la fibra de acero al diseño de mezclas al 5%, se tuvo una estabilidad de 1199 kgf, al 10% una estabilidad de 1259 kgf y al 12% de fibra de acero la estabilidad marshall resultó 1257 kgf. Finalmente, llegó a la conclusión que, para las características físicas y químicas de los agregados y la fibra de acero, se ha realizado varios ensayos de laboratorio, llegándose a comprobar que los agregados seleccionados cumplen de manera satisfactoria lo que exige la norma técnica, así mismo la fibra de acero tiene propiedades físicas que aportan resistencia al diseño de mezclas.

Ñahui y Sedano (2018), en su tesis de grado: “Estudio de la calidad de los agregados de la cantera de Ocopa para la elaboración de la mezcla asfáltica para pavimento flexible en

el distrito de Lircay – Angaraes – Huancavelica”, tuvieron como principal objetivo determinar la calidad de los agregados de la cantera de Ocopa para la elaboración de la mezcla asfáltica para pavimento flexible en el distrito de Lircay – Angaraes – Huancavelica, también determinaron la granulometría de los agregados, el porcentaje de caras fracturadas y el porcentaje de terrones de arcilla del agregado. Finalmente, llegaron a la conclusión de que la curva granulométrica del agregado fino y grueso de la cantera de Ocopa es el más adecuado para el procesamiento de mezclas asfálticas. Para determinar las partículas fracturadas del agregado grueso se han realizado diferentes tipos de diseño tanto para los porcentajes mayores y menores de 50%, del porcentaje de terrones de arcillas y partículas desmenuzables se concluyó que el agregado fino y grueso son limpios de terrones de arcilla porque pasaron los límites permitidos por tanto son óptimos para la elaboración de mezclas asfálticas.

Pinchi (2017) en su tesis de grado: “Diseño de pavimento flexible con carpeta asfáltica en caliente tramo banda de Shilcayo – Las Palmas”, tuvo como objetivo efectuar el diseño del pavimento flexible con carpeta asfáltica en Caliente tramo Banda de Shilcayo – Las Palmas, en el distrito de la Banda de Shilcayo, Provincia y Región San Martín. La metodología empleada fue de diseño experimental. Los resultados de la investigación mostraron la importancia de los agregados en el proceso de diseño de las mezclas asfálticas en caliente. Finalmente, como conclusión se determinaron los principales parámetros que se requieren para efectuar el diseño del pavimento asfáltico de un pavimento, que para el caso se trata del espesor de un pavimento flexible en caliente.

De la Cruz y Porras (2015), en su trabajo de investigación “Evaluación de desempeño de mezclas asfálticas en caliente diseñadas por la metodología Marshall con el ensayo de la rueda cargada de Hamburgo para el proyecto de rehabilitación de la carretera dv Imperial-Pampas”, tuvieron como objetivo evaluar la calidad de la carpeta asfáltica mediante el análisis

de la rueda cargada de Hamburgo, usando el Método Marshall en la rehabilitación de la carretera de Imperial Pampas. El método de la investigación es de tipo cualitativo-cuantitativo. El problema consistió en determinar de qué manera el análisis de la rueda cargada de Hamburgo permite comprobar si la carpeta asfáltica usada en la rehabilitación de la carretera Imperial Pampas cumple con los estándares de calidad de acuerdo al método de Marshall. La hipótesis planteada es que la Rueda de Hamburgo permite comprobar que la carpeta asfáltica usada en la rehabilitación de la carretera Imperial pampas cumple con los estándares de calidad de acuerdo al método Marshall. Finalmente, llegaron a la conclusión que el método Marshall mostró buen performance en condiciones extremas, por cuanto se obtuvo en el umbral de aprobación.

Boza y Sinchi (2015), en su tesis de grado: “Evaluación comparativa del módulo dinámico y las propiedades volumétricas de la mezcla en caliente diseñada por el método de Marshall con granulometrías EG-2013 y Superpave para la carretera tramo Cusco – Occopata”, tuvieron como objetivo principal evaluar la comparativa del módulo dinámico y las características volumétricas de la mezcla asfáltica en caliente diseñada por la metodología Marshall empleando las granulometrías EG-2013 y Superpave para la vía tramo Cusco – Occopata y así demostrar que la mezcla asfáltica con granulometría Superpave empleada en el pavimento flexible tiene mayor rendimiento en los años de vida evaluando así las características volumétricas y el módulo dinámico. Para su desarrollo las autoras realizaron dos tipos de granulometrías (Superpave y EG-2013) donde ambas cumplieron las especificaciones técnicas, sin embargo, solo se utilizó la metodología Marshall para el diseño de mezcla asfáltica en caliente con diferentes porcentajes de asfalto (4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0), en total las autoras realizaron 33 unidades de prueba de las cuales se determinó el módulo dinámico mediante la metodología SHELL. Los resultados de la investigación mostraron que el agregado de

Piñipampa con granulometría Superpave dieron un valor de $9.8 \times 10^8 \text{ N/m}^3$ mientras el agregado de Amarupampa más Combapata con granulometría Superpave y EG-2013 dieron valores de $0.2 \times 10^8 \text{ N/m}^3$ y $0.5 \times 10^8 \text{ N/m}^3$ respectivamente. Finalmente llegaron a la conclusión que el módulo dinámico no cumplió con lo establecido en la hipótesis puesto que la granulometría EG-2013 es de alta rigidez y la granulometría Superpave es de baja rigidez, en cuanto a las propiedades volumétricas ambas cumplen la hipótesis planteada por que la granulometría Superpave tiene mejores características respecto a la granulometría EG-2013.

Ramírez (2015), en su investigación de postgrado: “Evaluación de compatibilidad de mezclas asfálticas utilizando agregados de la cantera San Martín con cemento asfáltico PEN 60/70 y emulsión asfáltica CSS-1HP”, tuvo como objetivo principal determinar el grado de compatibilidad de los agregados de la cantera San Martín en la preparación de mezclas asfálticas en caliente con cemento asfáltico tipo PEN 60/70 y de mezclas asfálticas en frío con emulsión asfáltica CSS-1HP en Trujillo. Para su desarrollo determinaron las propiedades físicas mecánicas de los agregados teniendo en cuenta las normas MTC, ensayos de cemento asfáltico tipo PEN 60/70 para una mezcla asfáltica en caliente, ensayos de emulsión asfáltica tipo CSS-1HP para una mezcla asfáltica en frío y diseñar mezclas de pruebas con una dosificación óptima a través de ensayos de laboratorio que cumplan los requisitos establecidos por el método Marshall modificado. Los resultados de la investigación mostraron que los ensayos realizados para la emulsión asfáltica CSS-1HP si cumplieron con la NTP 321.141 y para el cemento asfáltico PEN 60/70 cumplió lo establecido en la NTP 321.051. El diseño de mezcla óptima en caliente y en frío es 6% de cemento asfáltico, 55% de agregado grueso y 45% de agregado fino. Finalmente, como conclusión se determinó que los agregados gruesos de la cantera San Martín presentan características físicas angulares y/o alargadas teniendo una resistencia al desgaste de 18.06% siendo su máxima resistencia de 40% cumpliendo lo

establecido en las especificaciones del MTC, asimismo, el comportamiento de estabilidad de la mezcla asfáltica en caliente tuvo un valor de 11.82 KN teniendo un incremento de 47.6% de lo normado, y la estabilidad en mezcla asfáltica en frío tuvo un valor de 10.96 KN con un incremento de 37% del parámetro establecido por el Instituto del Asfalto Americano.

2.1.3. A nivel regional y local

No se cuenta con antecedentes regionales o locales relacionados al tema central de la tesis.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Granulometría de los agregados

La granulometría es la distribución de los tamaños de las partículas de un agregado, que se determinan por medio de tamices de alambre de acuerdo con la norma ASTM C136. Según el MTC E 204 se aplica para determinar la gradación de materiales propuestos para su uso como agregados o los que están siendo usados como tales.

2.2.1.1. Ensayo de muestreo para materiales de construcción (MTC E201)

El muestreo es importante, por lo tanto, el operador deberá tener siempre la precaución de obtener muestras que denoten la naturaleza y condiciones del material al cual representan.

El número y masa de las muestras deberá ser suficiente como para otorgar la confianza deseada en los resultados de los ensayos. Una guía para determinar la cantidad de muestra requerida para obtener el nivel de confianza en los resultados de ensayo es la siguiente:

Tabla 1*Medida de muestras*

Tamaño máximo nominal del agregado (mm)	Masa mínima aproximada para la muestra de campo (kg)
	Agregado fino
2.36	10
4.76	10
	Agregado grueso
9.50	10
12.50	15
19.00	25
25.00	50
37.50	75
50.00	100
63.00	125
75.00	150
90.00	175

Nota: Tomado del Manual de ensayo de materiales EM-2016 del Ministerio de Transportes y Comunicaciones

Los resultados de un análisis granulométrico será para determinar el cumplimiento de la distribución del tamaño de partículas con los requisitos exigidos en la especificación técnica de la obra y proporcionar datos necesarios para el control de producción de agregados.

2.2.1.2. Análisis Granulométrico de agregados gruesos y finos (MTC E204)

Se aplica con la finalidad de determinar por medio de una serie de tamices de abertura cuadrada la distribución de partículas de agregados gruesos y finos en una muestra seca de peso conocido.

De acuerdo al MTC E 201. El tamaño de la muestra de campo debe ser la cantidad indicada en ese método, el análisis granulométrico se inicia con la mezcla completamente de la muestra y se reduce por cuarteo manual o mecánico, al realizar este procedimiento se debe homogenizar completamente el agregado para garantizar su contenido de humedad y así evitar la segregación y pérdida de finos.

La cantidad de la muestra del agregado fino después de secado, debe ser de 300 gr. mínimo y la cantidad de muestra de agregado grueso después de secado, debe ser de acuerdo a lo establecido en la Tabla 2.

Tabla 2

Cantidad mínima de muestra para granulometría del agregado grueso

Tamaño máximo nominal abertura cuadrada mm.	(pulg)	Cantidad mínima de muestra de ensayo Kg
9.5	(3/8)	1
12.5	(1/2)	2
19.0	(3/4)	5
25.0	(1)	10
37.5	(1 1/2)	15
50	(2)	20
63	(2 1/2)	35
75	(3)	60
90	(3 1/2)	100
100	(4)	150
125	(5)	300

Nota: Tomado de Manual de ensayo de materiales EM-2016 del Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

2.2.2. Granulometría MAC-02

Según las especificaciones técnicas generales para la construcción del MTC (EG-2013): “La gradación de los agregados pétreos para la producción de la mezcla asfáltica en caliente deberá responder a algunos de los husos granulométricos, especificados en la tabla 3, de manera alterna puede emplearse las gradaciones especificadas en la norma ASTM D3515 e Instituto del Asfalto”. Según el Instituto del Asfalto estas gradaciones estarían clasificadas como gradaciones densas.

Tabla 3

Gradaciones para mezclas asfálticas en caliente

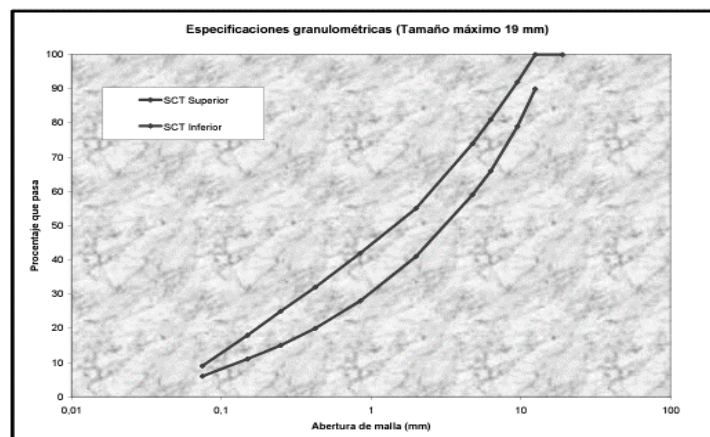
<i>Tamiz</i>	<i>Porcentaje que pasa</i>		
	<i>Mac-01</i>	<i>MAC-02</i>	<i>Mac-03</i>
25,0 mm (1")	100		
19,0 mm (3/4")	89-100	100	
12,5 mm (1/2")	67-85	89-100	
9,5 mm (3/8")	60-77	70-88	100
4,75 mm (N°4)	43-54	51-68	65-87
2,00 mm (N°10)	29-45	38-52	43-61
425 um (N°40)	14-25	17-28	16-29
180 um (N°80)	8-17	8-17	9-19
75 um (N°200)	4-8	4-8	5-10

Nota: Tomado de Especificaciones técnicas generales para la construcción EG-2013 – Ministerio de Transportes y Comunicaciones

En estos husos granulométricos, se utilizan gráficas semilogarítmicas para definir las granulometrías permitidas, en las ordenadas se encuentran los porcentajes de material que pasan por las diferentes mallas según el tamaño nominal del material pétreo y en las abcisas se encuentran las aberturas de las mallas en mm, graficadas en forma logarítmica. La selección de una curva granulométrica para el diseño de una mezcla asfáltica cerrada o densa, está en función de dos parámetros: el tamaño nominal del material y las líneas de control (superior e inferior). Las líneas de control son puntos de paso obligado para la curva granulométrica.

Figura 1

Gráfica Semilogarítmica Marshall MAC-02



Nota: Tomado de Análisis comparativo de los métodos Marshall y Superpave para compactación de mezclas asfálticas, Publicación técnica N° 299, por Garnica, Delgado y Sandoval, 2005, SCT IMT

2.2.3. Granulometría Superpave

Forma parte de la metodología Superpave, como criterio propuesto por el Programa Estratégico de Investigación en Carreteras (Strategic Highway Research Program, SRHP) que tiene por fin la mejora del desempeño y la ampliación de la vida útil de la carpeta asfáltica en carreteras.

2.2.3.1. Exponente 0.45 en la gráfica Superpave

Con el fin de especificar de mejor forma la granulometría, la metodología Superpave hizo variaciones en el enfoque de la granulometría Marshall, considerando recomendaciones hechas por la Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos (FHWA) que es el empleo del exponente 0.45 para definir la granulometría mediante una única gráfica que permite evaluar la distribución de tamaños acumulados de partículas en una mezcla de agregados, en la gráfica las ordenadas son los porcentajes que pasan las partículas de agregado en escala aritmética y las abscisas están representadas por los tamaños de las aberturas de tamices en mm elevadas a una potencia 0.45.

2.2.3.2. Gráfica Fúller

Con el fin de representar las condiciones de máxima densidad y mínima de vacíos en una distribución granulométrica de material grueso no uniforme, se emplea la gráfica Fúller que tiene origen en la ecuación con el mismo nombre descrita a continuación:

$$P_i = \left(\frac{D_i}{D_{max}} \right)^n \quad (EC- 1)$$

Donde:

P_i = Acumulado que pasa en decimal, para un diámetro de la partícula D_i .

D_i = Diámetro de la partícula.

D_{max} = Tamaño máximo del material.

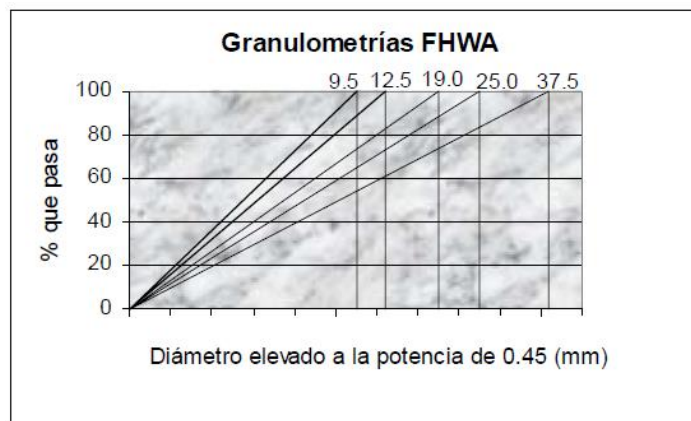
n = Valor asociado a la forma de la curva.

Mediante la gráfica Füller se puede expresar la gradación de agregados de una mezcla asfáltica por un par de números que son, un coeficiente de forma (n) y el valor del tamaño máximo del material (D_{max}), la teoría sugiere para un factor de forma con valor de 0.45 la mezcla alcanza máximas densidades al momento de ser compactada.

La siguiente figura representa el empleo del diámetro del tamaño máximo del material elevado a la potencia de 0.45, que permite visualización de la línea de máxima densidad con el fin de evitar que la curva de la gradación pase por encima de esta ya que, si ese es el caso produciría bajos valores de vacíos en el agregado mineral (VMA).

Figura 2

Representación de Granulometrías según la FHWA



Nota: Tomado de Análisis comparativo de los métodos Marshall y Superpave para compactación de mezclas asfálticas, Publicación técnica N° 299, por Garnica, Delgado y Sandoval, 2005, SCT IMT

Un aspecto importante a resaltar en esta gráfica es que la línea recta de máxima densidad se extiende desde la abscisa del tamaño máximo del material y ordenada al 100% hasta el punto de origen (0%, 0 mm).

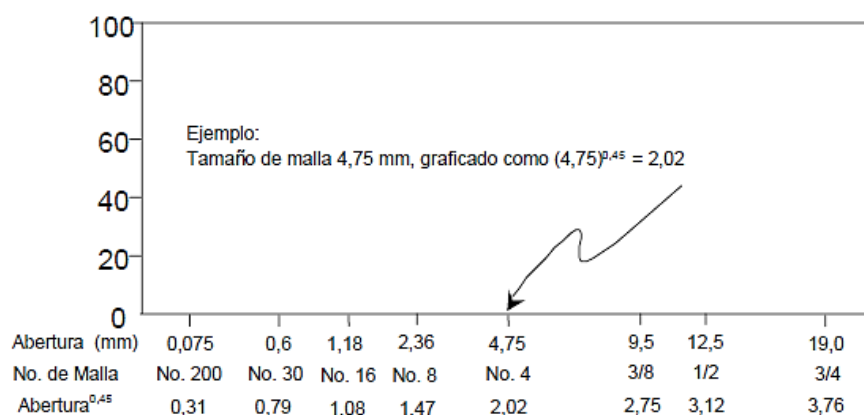
2.2.3.3. Importancia de la gráfica Füller

El empleo del coeficiente de forma (n) y el tamaño máximo nominal del agregado (D_{max}) facilita el manejo de la gradación, la expresión de las especificaciones técnicas de granulometría y la densificación de la mezcla. Pero también, puede servir para el control de la variación diaria de la mezcla en planta.

Esta gráfica toma ventaja en comparación con la tradicional (gráfica logarítmica) de valores máximos y mínimos pues para la evaluación de variación de la granulometría, considera a la gradación de manera integral, se puede apreciar una influencia igualitaria en la del tamaño máximo y el coeficiente de forma en la trabajabilidad. Se facilita la colocación y manejo cuando se emplea tamaños máximos pequeños y estructuras de mezclas densas, entre en una mezcla densa y abierta existen diferentes trabajabilidades considerando un mismo tamaño máximo, la siguiente figura detalla el cálculo del valor de la abscisa tomando como ejemplo la malla con abertura de 4.75mm (N°4)

Figura 3

Ilustración de como graficar las abscisas en la metodología Superpave



Nota: Tomado de Análisis comparativo de los métodos Marshall y Superpave para compactación de mezclas asfálticas, Publicación técnica N° 299, por Garnica, Delgado y Sandoval, 2005, SCT IMT

2.2.3.4. Mecanismos de control de la granulometría

Las granulometrías históricamente siempre consideraron límites superiores e inferiores especificando porcentajes máximos y mínimos de material pasante por cada malla. las mezclas asfálticas pueden cumplir estas especificaciones, pero tener un desempeño no deseado a lo largo de su vida útil, en particular las que cuentan con una estructura de agregado pobre y son susceptibles a sufrir una deformación permanente (roderas), como también pueden diseñarse con alta densidad lo cual trae consigo problemas de durabilidad reduciendo el contenido de asfalto.

En la granulometría Superpave, se emplea dos conceptos que son la zona restringida y puntos de control obligatorios para el paso de la curva granulométrica, para el tamaño máximo nominal, tamaño intermedio y tamaños finos.

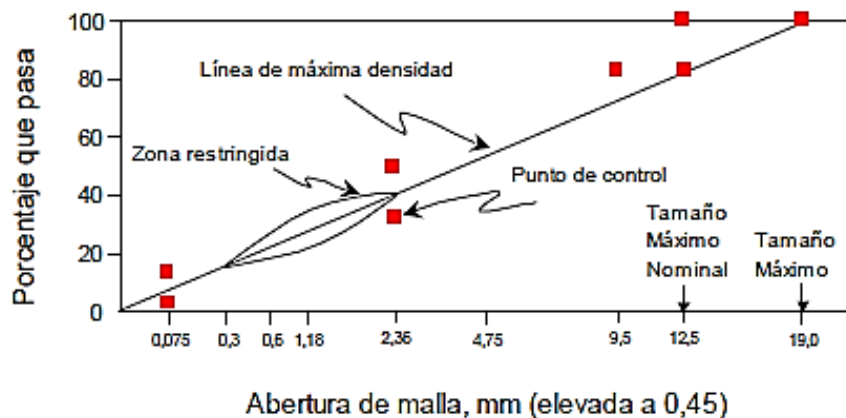
Los cuatro puntos de control superiores se utilizan para verificar el tamaño máximo y tamaño máximo nominal de las partículas, los cuatro puntos de control inferiores tienen propósitos diferentes, los requerimientos máximos y mínimos en la malla N° 200 son empleados con frecuencia en mezclas asfálticas de granulometría cerrada, las mezclas de tipo SMA (Stone Mastic Asphalt) no cumplen con esta especificación, los puntos de control en la malla N° 8 se utilizan frecuentemente para el control de partículas con tamaño de arena en la mezcla, el requerimiento máximo limita la cantidad de arena para que no se generen mezclas asfálticas arenosas, el requerimiento mínimo asegura la cantidad de arena adecuada en la mezcla para cumplir con la propuesta de una granulometría densa, una granulometría de tipo Open Graded (granulometría abierta) no cumplirá con estos puntos de control.

La zona limitada asegura la adecuada estructura la mezcla asfáltica comprendida entre los tamaños de 0.3 mm y 2.36 mm la cual no deberá cruzar la curva granulométrica, las granulometrías deberán pasar por debajo o encima de esta zona, la combinación de agregados que pase por encima de esta zona tenderán a ser más arenosas y tener estructuras de agregado

débiles en comparación con las que pasan por debajo, por otro lado las que pasan a través de esta desde abajo se identifican como gradaciones con joroba o humped graduations que tienen por característica especial la joroba que se forma al pasar por aquella zona, esto indica en muchos casos mucha arena fina en relación con el total de arena en la mezcla a su vez poseen un esqueleto mineral débil dejando la dependencia a la rigidez del cemento asfalto empleado para alcanzar una adecuada resistencia al corte, en la siguiente grafica muestra los límites para una mezcla con tamaño máximo de agregado de 19 mm.

Figura 4

Límites para las granulometrías Superpave



Nota: Tomado de Análisis comparativo de los métodos Marshall y Superpave para compactación de mezclas asfálticas, Publicación técnica N° 299, por Garnica, Delgado y Sandoval, 2005, SCT IMT

La combinación de agregados o el diseño de la estructura de agregados que pasa entre los puntos de control evitando la zona limitada satisfacen los requerimientos granulométricos de la metodología Superpave.

A continuación, se presenta las especificaciones propuestas por la metodología Superpave para un tamaño máximo nominal de 12.5 mm.

Tabla 4*Especificación para un tamaño máximo nominal de 12,5mm*

Malla (mm)	Puntos de control		Zona restringida	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
19,0		100,0		
12,5	90,0	100,0		
9,5		90,0		
4,75				
2,36	28,0	58,0	39,1	39,1
1,18			25,6	31,6
0,600			19,1	23,1
0,300			15,5	15,5
0,075	2,0	10,0		

Nota: Tomado de Influencia de la granulometría en las características volumétricas de la mezcla asfáltica SCT-PT 299.

2.2.4. Mezclas asfálticas en caliente

Las mezclas asfálticas se definen como una combinación exacta de agregados pétreos aglomerados entre si mediante un ligante asfáltico, de tal forma que cada partícula de agregado quede cubierta por una película de asfalto uniformemente, generando así un material homogéneo de gran resistencia. Se puede tipificar a una mezcla asfáltica como una mezcla asfáltica en caliente debido al calentamiento de los materiales que la conforman (ligante asfáltico y agregado pétreo) previo al mezclado. Este tipo de mezcla se caracteriza por estar compuesta entre un rango de 93 a 97% de agregado pétreo y 7 a 3 % de asfalto con respecto al peso total de la mezcla.

2.2.4.1. Características de la mezcla asfáltica en caliente

La mezcla asfáltica en caliente se caracteriza por su densidad, vacíos de aire (VA), vacíos en el agregado mineral (VMA) y contenido de asfalto. Estas características son analizadas para saber la influencia que pueden tener en el comportamiento de la mezcla.

A. Densidad de la mezcla. Es la relación entre el peso y volumen específico de la mezcla. Esta característica indispensable para realizar el diseño de la mezcla por lo que especialmente se utiliza para realizar los controles de compactación in situ. Las especificaciones técnicas de cada proyecto requieren usualmente que la densidad del pavimento flexible compactado sea un porcentaje de la densidad obtenida en el laboratorio.

B. Vacíos de aire. Son los vacíos conformados por el aire atrapado en la mezcla asfáltica compactada, si el porcentaje de vacíos de aire es menor la mezcla será menos permeable, cuando se diseñan mezclas asfálticas convencionales en el laboratorio, los vacíos de aire se presentan en un 3 al 5% máximo, pero en campo no se permite tener vacíos de aire mayores a 8%, permitiendo así la compactación bajo las cargas de tránsito.

Una mezcla es mucho más densa si tiene menor porcentaje de vacíos, un alto porcentaje de vacíos determina una mezcla porosa, estas mezclas son propensas al deterioro ya que permiten el paso de agua y aire, siendo este último mencionado anteriormente como el principal causante de la oxidación del asfalto, por otra parte un bajo porcentaje de vacíos de aire también es perjudicial debido a que cuando la mezcla se comprime por acción de la carga de tránsito el asfalto tiende a acomodarse en los vacíos atrapados, si el porcentaje de vacíos es pequeño el asfalto no podrá acomodarse en el interior produciendo su salida a la superficie generando el fenómeno de exudación.

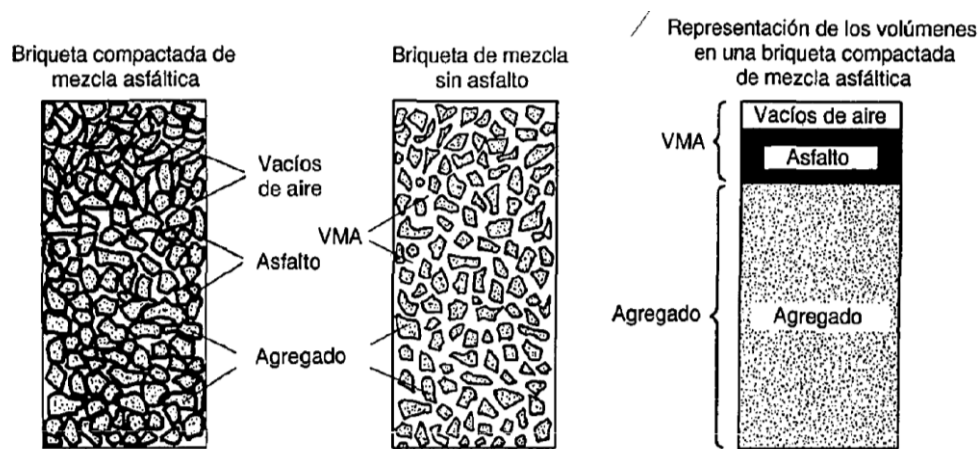
C. Vacíos en el agregado mineral (VMA). Es el volumen que ocupan los vacíos de aire y la película de asfalto que rodea al agregado, cuando mayor sea el porcentaje del VMA mayor será la película de asfalto que recubrirá a la partícula de agregado haciendo la mezcla más durable, un caso contrario sucede si la película de asfalto es delgada, dejaría la mezcla asfáltica expuesta a la oxidación.

Un incremento en la densidad de la gradación del agregado llegando a obtener valores de VMA inferiores a los valores mínimos de las especificaciones con el fin de economizar el contenido de asfalto, podría ser perjudicial debido a que produce películas delgadas de asfalto y mezclas de apariencia seca con baja durabilidad afectando así la calidad del pavimento.

D. Contenido de asfalto. es el volumen de asfalto en porcentaje que se agrega a la mezcla, se determina exactamente en el laboratorio, una parte de este volumen es absorbido por el agregado mientras que el resto forma una película que recubre a las partículas del agregado.

Figura 5

Ilustración del VMA en una probeta de mezcla compactada



Nota: Tomado de Diseño moderno de pavimentos asfálticos, por Minaya y Ordóñez, 2006, ICG.

El Instituto del asfalto MS-22 (1992) afirma que:

El mejor contenido de asfalto en una mezcla depende, en gran parte, de las propiedades del agregado, tales como la granulometría y la capacidad de absorción. La granulometría del agregado está directamente relacionada con el contenido óptimo de asfalto. Entre más finos, contenga la graduación de

la mezcla, mayor será el área superficial total, y mayor será la cantidad de asfalto requerida para cubrir, uniformemente, todas las partículas. Por otro lado, las mezclas más gruesas (agregados más grandes) exigen menos asfalto debido a que poseen menos área superficial total. (p.60)

Del mismo modo, las mezclas con un alto contenido de filler (SMA), necesitarán un mayor contenido de asfalto para cubrir una mayor superficie específica.

2.2.4.2. Parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica

Los parámetros volumétricos en una mezcla es un factor que se debe tomar en cuenta en el comportamiento de la mezcla asfáltica ya que es de mucha incidencia en el diseño de la misma.

Las proporciones volumétricas de una mezcla asfáltica proporcionan información sobre su probable funcionamiento, por lo cual es necesario comprender los procedimientos analíticos para calcular cada una de estas, a continuación, se define cada una de estas:

Generalidades sobre el agregado

El agregado pétreo es un material poroso, que puede absorber líquidos (agua o asfalto) a porcentajes variables en cada una de las partículas que lo componen, existen tres métodos para determinar la gravedad específica del agregado que son:

A. Gravedad específica neta o bulk (G_{sb}). Es el peso en el aire de un material permeable incluyendo vacíos permeables e impermeables a una temperatura establecida sobre el volumen del agregado con inclusión de vacíos permeables.

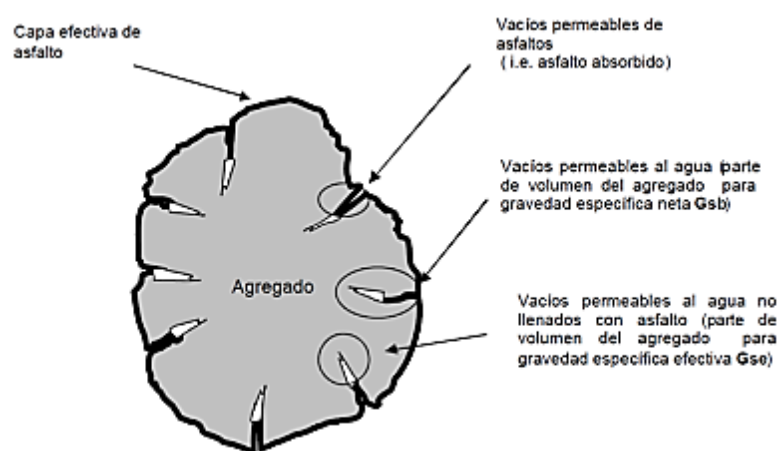
B. Gravedad específica aparente (G_{sa}). Es la relación entre el peso en el aire de un material impermeable y el volumen del agregado incluyendo vacíos impermeables.

C. Gravedad específica efectiva (G_{se}). Es el peso en el aire de un material permeable con la inclusión de vacíos permeables al asfalto, sobre el volúmen del agregado con los vacíos permeables e impermeables que no absorbieron asfalto.

Para una explicación más didáctica de se presenta la siguiente imagen:

Figura 6

Esquema de gravedad específica



Nota: Tomado de análisis comparativo de los métodos Marshall y Superpave para compactación de mezclas asfálticas, Publicación técnica N° 271, por Garnica, Delgado y Sandoval, 2005, SCT IMT

D. Vacíos en el agregado mineral (V_{ma}). Es el volúmen de vacíos entre las partículas de agregado en una mezcla compactada, está comprendido por los vacíos de aire y el contenido de asfalto efectivo, expresado en un porcentaje del volúmen total de la muestra.

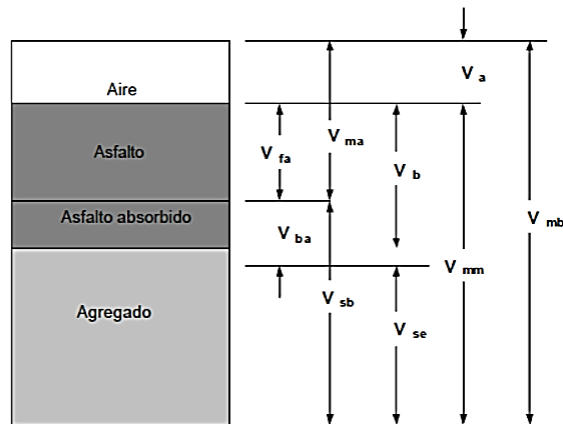
E. Contenido de asfalto efectivo (P_{be}). Es la diferencia entre el contenido de asfalto total en la mezcla y la porción de asfalto absorbido por las partículas del agregado.

F. Vacíos de aire (V_a). Volúmen total de los vacíos generados entre las partículas de agregado cubiertas por asfalto en una mezcla asfáltica compactada, se expresa como un porcentaje del volúmen neto de la mezcla asfáltica.

G. Vacíos llenos con asfalto (Vfa). Es una porción del porcentaje del volumen de espacio vacío intergranular en las partículas del agregado que está ocupado por el asfalto absorbido o efectivo, se puede expresar como la relación $(V_{ma}-V_a) / V_{am}$.

Figura 7

Diagrama de compactación de una mezcla asfáltica en caliente



- V_{ma} = volumen de vacíos en agregado mineral
- V_{mb} = volumen total de la mezcla asfáltica
- V_{mm} = volumen de la mezcla asfáltica sin vacíos
- V_{fa} = volumen de vacíos llenados con asfalto
- V_a = volumen de vacíos de aire
- V_b = volumen de asfalto
- V_{ba} = volumen de asfalto absorbido
- V_{sb} = volumen de agregado mineral (gravedad específica de la masa)
- V_{se} = volumen de agregado mineral (gravedad específica efectiva)

Nota: Tomado de análisis comparativo de los métodos Marshall y Superpave para compactación de mezclas asfálticas, Publicación técnica N° 271, por Garnica, Delgado y Sandoval, 2005, SCT IMT

De acuerdo al esquema anterior, el vacío del agregado mineral (V_{ma}) y los vacíos de aire (V_a), se pueden expresar como un porcentaje del volumen total de la mezcla asfáltica, mientras los vacíos llenos de asfalto (V_{fa}), representan un porcentaje del vacío del agregado mineral ocupado por el asfalto efectivo.

El asfalto efectivo, se puede expresar como un porcentaje de la masa total de la mezcla asfáltica pero también puede expresarse como un porcentaje solo de la masa del agregado utilizado en la mezcla asfáltica.

Gravedad específica neta del agregado

Cuando las fracciones del agregado total están separadas en: agregado grueso, agregado fino y filler, todos cuentan con distintas gravedades específicas. Para calcular la gravedad específica neta del agregado total, se utiliza la siguiente fórmula:

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_N}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_N}{G_N}} \quad (EC- 2)$$

Donde:

G_{sb} = Gravedad específica neta del agregado total.

P_1, P_2, P_N = Porcentajes individuales de cada masa de agregado.

G_1, G_2, G_N = Gravedad específica neta individual del agregado.

Gravedad específica efectiva del agregado

La gravedad específica efectiva del agregado se calcula con la gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica (RICE) en la siguiente expresión:

$$G_{se} = \frac{P_{mm}}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} + \frac{P_b}{G_b}} \quad (EC- 3)$$

Donde:

G_{se} = Gravedad específica efectiva del agregado.

G_{mm} = Gravedad específica teórica máxima (RICE) de la mezcla asfáltica (sin vacíos de aire).

P_{mm} = Porcentaje en peso total de la mezcla suelta = 100%.

P_b = Porcentaje de asfalto para el peso total de la mezcla.

G_b = Gravedad específica del asfalto.

El volúmen de asfalto absorbido por los agregados es casi siempre menor que la cantidad de agua absorbida, por lo tanto, el valor de la gravedad específica efectiva de un agregado estaría entre su gravedad específica neta (bulk) y su gravedad específica aparente. Cuando la gravedad específica efectiva no se encuentra en estos límites, su valor se debe asumir como incorrecto y volver a inspeccionar para encontrar la causa del error.

Gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica

Cuando se requiere diseñar una mezcla con un agregado dado, se requiere el valor de la gravedad específica teórica máxima (G_{mm}) con diferentes contenidos de asfalto con el fin de calcular el porcentaje de vacíos de aire para cada contenido de asfalto.

Luego de calcular la gravedad específica efectiva del agregado para cada gravedad específica máxima medida y promediando los resultados de G_{se} , la gravedad específica teórica máxima para algún otro contenido de asfalto se puede obtener con la siguiente expresión, la cual supone que el valor de la gravedad específica del agregado es constante, esta suposición es válida debido a que la absorción del asfalto no varía aparentemente con los cambios en el contenido de asfalto en la mezcla.

$$G_{mm} = \frac{P_{mm}}{\frac{P_s}{G_{se}} + \frac{P_b}{G_b}} \quad (EC- 4)$$

Donde:

G_{mm} = Gravedad específica teórica máxima (RICE) de la mezcla asfáltica (sin vacíos de aire).

P_{mm} = Porcentaje en peso total de la mezcla suelta = 100%.

P_s = Contenido de agregado, porcentaje en peso total de la mezcla.

P_b = Porcentaje de asfalto para el peso total de la mezcla.

G_{se} = Gravedad específica efectiva del agregado.

G_b = Gravedad específica del asfalto.

Absorción del asfalto

La absorción del asfalto se expresa como el porcentaje en peso del agregado más que el porcentaje del peso total de la mezcla, la absorción del asfalto (P_{ba}) se determina mediante:

$$P_{ba} = 100 \times \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{sb} \times G_{se}} \times G_b \quad (EC- 5)$$

Donde:

P_{ba} = Asfalto absorbido, porcentaje del peso del agregado.

G_{se} = Gravedad específica efectiva del agregado.

G_{sb} = Gravedad específica neta del agregado.

G_b = Gravedad específica del asfalto.

Contenido de asfalto efectivo de la mezcla

Es el contenido de asfalto total menos la cantidad absorbida por las partículas de agregado, el contenido de asfalto efectivo de la mezcla es la porción del contenido de asfalto total que recubre a las partículas de agregado y se calcula mediante:

$$P_{be} = P_b - \frac{P_{ba}}{100} \times P_s \quad (EC- 6)$$

Donde:

P_{be} = Contenido de asfalto efectivo, porcentaje del peso total de la mezcla.

P_b = Contenido de asfalto, porcentaje del peso total de la mezcla.

P_{ba} = Asfalto absorbido, porcentaje del peso de agregado.

P_s = Contenido de agregado, porcentaje en peso total de la mezcla.

Porcentaje de vacíos del agregado mineral en la mezcla compactada

Los vacíos en el agregado mineral (Vma), se definen como los vacíos entre las partículas de agregado de la mezcla compactada, se incluye el contenido de asfalto efectivo y los vacíos de aire, el Vma, se calcula con la gravedad específica bulk del agregado y se expresa como un porcentaje del volumen bulk de la mezcla compactada, consecuentemente, si la composición de la mezcla se determina como porcentaje por peso de la mezcla total se tiene la siguiente fórmula:

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb}}{G_{sb}} \times P_s \quad (EC- 7)$$

Donde:

VMA = Vacíos en el agregado mineral, porcentaje del volumen neto o bulk.

G_{sb} = Gravedad específica neta o bulk del agregado total.

G_{mb} = Gravedad específica neta o bulk de la mezcla compactada.

P_s = Contenido de agregado, porcentaje en peso total de la mezcla.

Porcentaje de vacíos de aire en la mezcla compactada

Son los pequeños espacios de aire entre las partículas de los agregados recubiertos. El porcentaje de vacíos de aire en la mezcla compactada, se determina usando la siguiente fórmula:

$$Va = 100 - \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \quad (EC- 8)$$

Donde:

Va = Vacíos de aire en la mezcla compactada, porcentaje del volumen total.

G_{mm} = Gravedad específica teórica máxima (RICE) de la mezcla asfáltica (sin vacíos de aire).

G_{mb} = Gravedad específica neta o bulk de la mezcla compactada.

Porcentaje de vacíos llenos con asfalto en la mezcla compactada

Es el porcentaje de vacíos entre las partículas (V_{ma}) que se llenan con asfalto, se denomina V_{fa} y no incluye el valor del asfalto absorbido, es determinado usando la siguiente fórmula:

$$VFA = 100 - \frac{(VMA - V_a)}{VMA} \quad (EC- 9)$$

Donde:

VFA = Vacíos llenados con asfalto, porcentaje de VMA.

VMA = Vacíos en el agregado mineral, porcentaje del volumen neto o bulk.

V_a = Vacíos de aire en la mezcla compactada, porcentaje del volumen total.

2.2.4.3. Ensayos necesarios para el empleo de agregados en mezclas asfálticas

Ensayo de abrasión los Ángeles (L.A.) al desgaste de los agregados de tamaños menores a 37.5mm (1 1/2") (MTC E207).

Este ensayo es una medida de la degradación de agregados minerales de gradaciones normalizadas resultantes de una combinación de acciones, las cuales incluyen abrasión o desgaste, impacto y trituración, en un tambor de acero en rotación que contiene un número especificado de esferas de acero, dependiendo de la gradación de la muestra de ensayo. Al rotar el tambor, la muestra y las bolas de acero son recogidas por una pestaña de acero transportándolas hasta que son arrojadas al lado opuesto del tambor, creando un efecto de trituración por impacto

Para realizar este ensayo, se utilizó los siguientes equipos y herramientas:

- Balanza con sensibilidad de 0.1 gr.
- Juego de tamices.

- Horno de secado.
- Envases, tazones, etc.
- Máquina de los ángeles.

Tabla 5

Gradación de las muestras de ensayo

Medida del tamiz (abertura cuadrada)		Masa de tamaño indicado, g			
Que pasa	Retenido sobre	Gradación			
		A	B	C	D
37.5 mm (1 ½")	25.0 mm (1")	1250 ± 25	-.-	-.-	-.-
25.0 mm (1")	19.0 mm (¾")	1250 ± 25	-.-	-.-	-.-
19.0 mm (¾")	12.5 mm (½")	1250 ± 10	2500 ± 10	-.-	-.-
12.5 mm (½")	9.5 mm (3/8")	1250 ± 10	2500 ± 10	-.-	-.-
9.5 mm (3/8")	6.3 mm (¼")	-.-	-.-	2500 ± 10	-.-
6.3 mm (¼")	4.75 mm (N° 4)	-.-	-.-	2500 ± 10	-.-
4.75 mm (N° 4)	2.36 mm (N° 8)	-.-	-.-	-.-	5000
TOTAL		5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10

Nota: Tomado de Manual de ensayo de materiales EM-2016 del Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

Ensayo de partículas chatas y alargadas en agregados (MTC E223)

Mide el porcentaje de partículas chatas o alargadas en el agregado grueso. Las partículas chatas o alargadas pueden interferir con la consolidación y dificultar la colocación de los materiales. Este método provee el medio para verificar si se cumple con las especificaciones que limitan tales partículas ó, para determinar la forma característica del agregado grueso. Para realizar este ensayo, se utilizó las siguientes herramientas:

- Balanza con sensibilidad de 0.1 gr.
- Dispositivo calibrador proporcional.
- Juego de tamices.
- Bandejas, espátula.

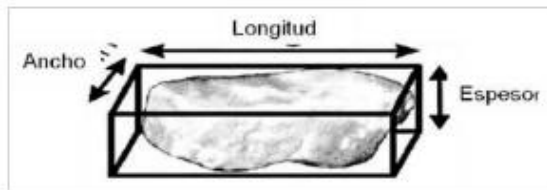
Para este ensayo, se realizó el siguiente procedimiento:

- Tamizar el agregado con el juego de tamices, seguidamente registrar el peso retenido en cada tamiz.

- Utilizar el calibrador para cada partícula de cada fracción según los tres grupos: chatas, alargadas o ni chatas ni alargadas.
- Clasificar en los grupos descritos anteriormente para determinar la proporción de cada grupo.

Figura 8

Caracterización de partículas chatas y alargadas.



Nota: Tomado de Manual de ensayo de materiales MTC EM-2016

Tabla 6

Ensayo de partículas chatas y alargadas

Tamaño máximo nominal malla cuadrada mm – (pulgada)	Peso mínimo de la muestra de ensayo kg – (lb)
9.5 – (3/8)	1 – (2)
12.5 – (1/2)	2 – (4)
19.0 – (3/4)	5 – (11)
25.0 – (1)	10 – (22)
37.5 – (1.1/2)	15 – (33)
50 – (2)	20 – (44)
63 – (2.1/2)	35 – (77)
75 – (3)	60 – (130)
90 – (3.1/2)	100 – (220)
100 – (4)	150 – (330)
112 – (4.1/2)	200 – (440)
125 – (5)	300 – (660)
150 – (6)	500 – (1100)

Nota: Tomado del Manual de ensayo de materiales EM-2016 del Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

Ensayo estándar para la determinación del porcentaje de partículas fracturadas en el agregado grueso (MTC E210).

Se utiliza este ensayo para determinar el porcentaje en cantidad de una muestra de agregado grueso que contiene partículas fracturadas que satisfacen las especificaciones. Para realizar este ensayo, se utilizó las siguientes herramientas:

- Balanza con sensibilidad de 0.1 gr.
- Juego de tamices 1/2" (12.5mm) y 3/8" (9.5mm)
- Bandejas, espátula.

Para realizar este ensayo, se siguió el siguiente procedimiento:

- Tamizar el agregado con el juego de tamices, seguidamente registrar el peso retenido en cada tamiz.
- Extender la muestra en una superficie plana, luego, realizar la inspección visual de cada partícula verificando el criterio de fractura.
- Seleccionar las partículas de manera que cumplan con los requisitos de una cara de fractura o dos a más caras de fractura.
- Registrar el peso de las partículas que cumplen con el criterio de caras de fractura, para su posterior cálculo.

Tabla 7

Cantidad mínima de muestra para el ensayo de partículas fracturadas

Tamaño máximo nominal muestra de ensayo mínima mm (pulg.)	Abertura cuadrada, mm (pulg.) masa, g (aprox. Lb.)
9.5 mm (3/8")	200 (0.5)
12.5 mm (1/2")	500 (1)
19.0 mm (3/4")	1500 (3)
25.0 mm (1")	3000 (6.5)
37.5 mm (1 1/2")	7500 (16.5)
50.0 mm (2")	15000 (33)
63.0 mm (2 1/2")	30000 (66)
75.0 mm (3")	60000 (132)
90.0 mm (3 1/2")	90000 (198)

Nota: Tomado del Manual de ensayo de materiales EM-2016 del Ministerio de Transportes y Comunicaciones

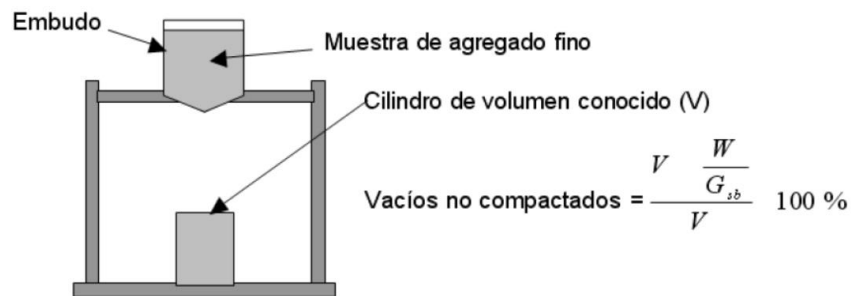
Ensayo de angularidad del agregado fino (MTC E222).

Este ensayo se realiza para determinar mediante el cálculo de vacíos de aire la angularidad del agregado fino, teniendo como definición de la angularidad del agregado fino al porcentaje de vacíos presentes en las partículas menores de 2.36 mm (tamiz N° 8). Para realizar este ensayo, se utilizó las siguientes herramientas descritas a continuación:

- Tamices: N° 8, N°200 (2.36 y 75µm respectivamente).
- Cilindro metálico de volúmen conocido.
- Marco metálico.
- Embudo metálico.

Figura 9

Diagrama de equipo para el ensayo de angularidad del agregado fino.



Nota: Tomado del Manual de ensayo de materiales MTC EM-2016

Ensayo de gravedad específica y absorción de los agregados gruesos (MTC E 206).

Establece los procedimientos para calcular los diferentes pesos específicos como son: el peso específico seco, saturado con superficie seca, aparente y la absorción, después de 24 horas de inmersión para saturar completamente los poros.

Para la realización de este ensayo, se utilizó las siguientes herramientas:

- Balanza sensible a 0,5g con una capacidad de 5000g a más.
- Malla de alambre con abertura correspondiente al tamiz N° 6 o menor.
- Depósito de agua para sumergir la cesta de alambre.
- Tamiz N° 4
- Estufa capaz de mantener una temperatura constante de 110 °C.

Los pesos mínimos de muestra a utilizar en los ensayos se detallan en el siguiente cuadro:

Tabla 8

Peso mínimo de la muestra para el ensayo de G. E. y absorción

Tamaño máximo nominal mm (pulgada)	Peso mínimo de la muestra de ensayo kg – (lb)
12.5 – (1/2) o menos	2 – (4.4)
19.0 – (3/4)	3 – (6.6)
25.0 – (1)	4 – (8.8)
37.5 – (1.1/2)	5 – (11)
50 – (2)	8 – (18)
63 – (2.1/2)	12 – (26)
75 – (3)	18 – (40)
90 – (3.1/2)	25 – (55)
100 – (4)	40 – (88)
112 – (4.1/2)	50 – (110)
125 – (5)	75 – (165)
150 – (6)	125 – (276)

Nota: Tomado del Manual de ensayo de materiales EM-2016 del Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

Ensayo de durabilidad al sulfato de sodio y sulfato de magnesio (MTC E 209).

Mediante este ensayo se determina la resistencia de los agregados a la desintegración por medio de soluciones saturadas de sulfato de sodio o magnesio durante no menos de 16 horas ni más de 18 cubriendo toda la muestra. Después de un periodo de inmersión, se retira la solución de la muestra y se coloca al horno para secar, se repite el mismo procedimiento para los 5 ciclos. Para la realización de este ensayo, se utilizó las siguientes herramientas:

- Envases para sumergir las muestras.
- Balanzas con capacidad no menor a 500 g y sensibilidad de por lo menos 0.1g.
- Horno de secado con capacidad de calentamiento continuo de 105°C a 110°C.
- Medida de peso específico para las soluciones y reactivos.
- Juego de tamices.

La muestra del agregado fino pasará por el tamiz normalizado 3/8” y deberá quedar por lo menos 100g en cada tamiz detallado a continuación.

Tabla 9

Cantidad mínima de muestra para el ensayo de durabilidad al $MgSO_4$ - AF

Pasa el tamiz normalizado	Retenido sobre el tamiz normalizado
600 μm (N° 30)	300 μm (N° 50)
1.18 mm (N° 16)	600 μm (N° 30)
2.36 mm (N° 8)	1.18 mm (N° 16)
4.75 mm (N° 4)	2.36 mm (N° 8)
9.50 mm (3/8")	4.75 mm (N° 4)

Nota: Tomado del Manual de ensayo de materiales EM-2016 del Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

Para el agregado grueso, se ensayará el material que se detalla a continuación con las siguientes cantidades por distintos tipos de tamaño:

Tabla 10

Cantidad mínima de muestra para el ensayo de durabilidad al $MgSO_4$ - AG

Tamaño (tamices normalizados de abertura cuadrada)	Peso en g
Consistiendo de: 9.5 mm (3/8") a 4.75 mm (N° 4)	300 \pm 5
19.0 mm (3/4") a 9.5 mm (3/8")	1000 \pm 10
Consistiendo de: Material de 12.5 mm (1/2") a 9.5 mm (3/8")	300 \pm 5
Material de 19.0 mm (3/4") a 12.5 mm (1/2")	670 \pm 10
37.5 mm (1 1/2") a 19.0 mm (3/4")	1500 \pm 50
Consistiendo de: Material de 25.0 mm (1") a 19.0 mm (3/4")	500 \pm 30
Material de 37.5 mm (1 1/2") a 25.0 mm (1")	1000 \pm 50
63.0 mm (2 1/2") a 37.5 mm (1 1/2")	5000 \pm 300
Consistiendo de: Material de 50.0 mm (2") a 37.5 mm (1 1/2")	2000 \pm 200
Material de 63.0 mm (2 1/2") a 50.0 mm (2")	3000 \pm 300
Para tamaños mayores se aumentará el tamaño del tamiz en incrementos de 25.0 mm (1") para cada fracción.	7000 \pm 1000

Nota: Tomado del Manual de ensayo de materiales EM-2016 del Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

Ensayo de sales solubles totales en agregados para pavimentos flexibles (MTC E 219).

Tiene por objetivo determinar por medio de la cristalización el contenido de cloruros y sulfatos solubles en agua que contienen los agregados pétreos empleados en mezclas asfálticas.

Para la realización de este ensayo, utilizó las siguientes herramientas:

- Balanza con sensibilidad de 0.01g.
- Estufa capaz de mantener temperaturas entre $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Plancha de calentamiento.

La muestra y la cantidad de agua o aforo se indican en la siguiente tabla:

Tabla 11

Cantidad de agua para el ensayo de sales solubles

Agregado pétreo	Cantidad mínima (g)	Aforo mínimo (ml)
Grava 50 – 20 mm	1000	500
Grava 20 – 5 mm	500	500
Arena 20 mm	100	500

Nota: Tomado del Manual de ensayo de materiales EM-2016 del Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

Ensayo de valor de azul de metileno en agregados finos (AASHTO TP 57).

El procedimiento de este ensayo sirve para determinar la cantidad de material potencialmente dañino incluyendo arcilla y material orgánico que presenta la fracción fina de un agregado mediante la determinación del valor de azul de metileno. Para este ensayo, necesitaron las siguientes herramientas:

- Una bureta con capacidad mínima de 50 ml con graduaciones de 01 ml.
- Agitador magnético.
- Balanza de 200g con sensibilidad de 0.001g.
- Varilla de vidrio, cronometro.
- Matraz volumétrico con capacidad de 1000 ml.
- Papel filtro Whatman No. 2.
- Tres vasos de precipitado de 500 ml. Tipo Griffin.

- Tamiz N° 200.

La muestra representativa del agregado fino se seca a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$. hasta obtener un peso constante y se tamiza por la malla N° 200 del cual se utiliza el pasante y se descarta el retenido.

Para realizar este ensayo, se siguió el siguiente procedimiento:

- La solución de azul de metileno fue vertida en pequeños incrementos en un recipiente que contiene agua destilada y la muestra de material pasante de la malla N° 200 ($75\mu\text{m}$).
- Después de cada incremento y agitación, se retiró del recipiente una pequeña cantidad de agua empleando una varita agitadora de vidrio y se dejó caer en forma de gota sobre el papel filtro.
- Cuando la muestra de agregado no puede absorber más azul de metileno se forma un anillo o halo azul alrededor de la gota en el papel filtro. En este momento, procedió a cuantificar la cantidad de solución de azul de metileno añadida y calcular el valor de azul de metileno (mg/g – miligramos de azul por gramo de suelo).

A continuación, se presenta una tabla con el valor de azul de metileno y el comportamiento esperado de la mezcla asfáltica.

Tabla 12

Valor de azul de metileno y el comportamiento esperado

Valor de Azul de metileno (mg/g)	Desempeño anticipado
≤ 6	Excelente
7 – 12	Marginalmente aceptable
13 – 19	Problemas / posible falla
≥ 20	Fallado

Nota: Tomado de AASHTO TP 57.

Ensayo de límite plástico e índice de plasticidad (MTC E 111).

Determina el límite plástico a la humedad más baja con la que pueden formarse barritas de suelo de 1/8” (3.2 mm) de diámetro rolando dicho suelo entre la palma de la mano y una

superficie lisa de preferencia vidrio esmerilado, teniendo en cuenta que dichas barritas no se desmoronen, es comúnmente utilizado en sistemas de clasificación de suelo en la ingeniería como también para determinar la compresibilidad, permeabilidad, compactibilidad, contracción-expansión y resistencia al corte en compañía del límite líquido e índice de plasticidad. Para este ensayo, se necesitaron las siguientes herramientas:

- Espátula de hoja flexible de 3" o 4" de longitud por 3/4" de ancho.
- Recipiente de porcelana de 115 mm (4 1/2") de diámetro.
- Balanza con aproximación a 0.01 g.
- Estufa termostáticamente controlada regulable de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Tamiz N° 40 y Tamiz N° 200.
- Agua destilada.
- Capsulas o recipientes para la determinación de humedades y superficie de rodadura, comúnmente se utiliza vidrio grueso esmerilado.

La muestra necesaria consistió en 20 g de la muestra que pase por el tamiz N°40 y 20 g del tamiz N° 200 preparado para el ensayo de límite líquido. Se procedió a amasar con adición de agua destilada una esfera de masa de suelo, se tomó una porción de 1.5 g a 2.0 g de dicha esfera como muestra para el ensayo.

Para la determinación del índice de plasticidad, se utilizará la siguiente fórmula:

$$IP = LL - LP \quad (EC- 10)$$

Donde:

LL = Límite líquido.

LP = Límite plástico.

IP = Índice de plasticidad.

El índice de plasticidad será no plástico (NP) cuando el límite líquido o límite plástico no puedan determinarse, de la misma forma el límite plástico resulto mayor que el límite líquido.

Los ensayos de la caracterización de los agregados de procedencia mineral deberán cumplir los requerimientos detallados a continuación en las tablas 13 y 14:

Tabla 13

Caracterización del agregado grueso

Ensayos	Norma
Durabilidad (al sulfato de magnesio)	MTC E 209
Abrasión los Ángeles	MTC E 207
Adherencia	MTC E 517
Índice de durabilidad	MTC E 214
Partículas chatas y alargadas	ASTM 4791
Caras fracturadas	MTC E 210
Sales solubles totales	MTC E 219
Absorción	MTC E 206

Nota: Tomado del Manual de ensayo de materiales EM-2016 del Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

Tabla 14

Caracterización del agregado fino

Ensayos	Norma
Equivalente de arena	MTC E 114
angularidad del agregado fino.	MTC E 222
Azul de metileno.	AASHTO TP 57
Índice de plasticidad (malla N° 40)	MTC E 111
Durabilidad (al sulfato de magnesio)	MTC E 209
Índice de durabilidad	MTC E 214
Índice de plasticidad (malla N° 200)	MTC E 111
Sales solubles totales	MTC E 219

Nota: Tomado del Manual de ensayo de materiales EM-2016 del Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

Con referencia a los ensayos de caracterización, se deben de realizar sobre la combinación de agregados, para verificar su cumplimiento, en caso que el agregado ya sea fino o grueso no cumpla con la especificación en uno o más ensayos no se descartará hasta ver su desempeño en las características mecánicas de la mezcla asfáltica.

Por otro lado, el porcentaje de absorción para ambos agregados tanto grueso como fino es de importancia ya que de esto dependerá el empleo de mayor o menor contenido de asfalto.

2.2.5. Diseño de mezclas asfálticas en caliente.

La metodología de diseño Marshall uno de los más tradicionales en mezclas asfálticas en caliente, fue desarrollado por Bruce Marshall (Ingeniero de Bitúmenes de Carreteras del Estado de Mississippi). El ensayo Marshall surgió de una gran investigación en el año 1943, realizada por el cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE.UU. en donde, varios métodos fueron evaluados y comparados para un buen diseño y control de mezclas asfálticas de esa manera se consiguió el desarrollo el método más simple.

El Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE.UU. adopto el Método Marshall de esa manera adaptarlo y desarrollarlo en el control y diseño de las mezclas asfálticas en pavimentos bituminosos en campo ya que el Método Marshall usaba un equipo portátil. Posteriormente, el cuerpo de ingenieros hizo mejoras agregando algunos detalles al diseño Marshall basándose en pruebas de tránsito y estudios seguidos en laboratorio para que finalmente lograran desarrollar criterios de diseños de mezclas.

2.2.5.1. Propósitos de la metodología Marshall

El método Marshall tiene como objetivo determinar el óptimo contenido de asfalto para una combinación específica de agregados. Otro de sus propósitos también es obtener información de las características de la mezcla asfáltica en caliente, establecer densidades y óptimos contenidos de vacíos que deberán ser cumplidas durante el proceso de construcción del pavimento asfáltico.

Como se mencionó anteriormente el método Marshall solo se aplica a las mezclas asfálticas en caliente de pavimentación las cuales usan asfalto clasificado por su viscosidad y

penetración, como también en mezclas asfálticas en caliente que contienen agregados de tamaños máximos de 1 pulg. (25.0 mm) o menos. Este método se puede usar para el diseño de la mezcla en laboratorio y para su debido control en campo.

En el método Marshall se realizan briquetas cilíndricas normalizadas de 4 pulg. (102 mm) de altura y/o espesor y 2.5 pulg. (63.5 mm) de diámetro, las briquetas se hacen con una misma combinación de agregados previamente ensayados, pero con diferentes contenidos de asfalto, su preparación consiste en procedimientos específicos en calentar, mezclar y compactar mezclas de agregado y asfalto. Los aspectos más importantes en el diseño de las mezclas asfálticas con el método Marshall a considerar son: la prueba de estabilidad y flujo de las muestras compactadas y el análisis de la relación densidad – vacíos.

El método Marshall exige cumplir requisitos correspondientes a la granulometría y parámetros volumétricos de una mezcla, y los requisitos de calidad del agregado y del asfalto como componentes de la mezcla asfáltica en caliente los fijan en nuestro país el MTC en su publicación Especificaciones Generales (EG-2013) las que deben ser estrictamente cumplidas.

2.2.5.2. Especificaciones de la metodología Marshall.

A. Especificaciones del agregado pétreo. Se llama agregado grueso a la porción retenida en el tamiz N°4, agregado fino a la porción que se encuentra entre los tamices N°4 y N°200 y polvo mineral a la que pase el tamiz N°200. El agregado grueso deberá ser proveniente de la trituración de grava o roca o de la combinación de ambas, deberán ser resistentes, limpios que impidan buena adherencia con el asfalto y durables sin exceder las cantidades de partículas alargadas, planas, blandas o desintegrables.

De la misma manera, el agregado fino deberá ser conformado por arena de trituración o una combinación con arena natural, dichos finos deberán estar limpios, duros y con una superficie angular y rugosa, muy importante también que el agregado fino esté libre de

sustancias que no permitan la buena adhesión con el asfalto adicionalmente cumplir con las especificaciones de calidad.

El polvo mineral o también conocido como filler provendrá básicamente de la trituración de los agregados pétreos o de producto comerciales como la cal hidratada o cemento portland. Su uso será aceptable siempre y cuando el material no sea de plástico.

Finalmente, en la combinación de los agregados grueso, fino y filler en la mezcla deberán cumplir estrictamente sus granulometrías según las especificaciones para distintas altitudes detallados a continuación en las tablas 15 y 16.

Tabla 15

Requerimientos para los agregados gruesos

Ensayos	Norma	Requerimiento Altitud (msnm)	
		≤ 3000	>3000
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% min.	35% min.
Partículas Chatas y alargadas	ASTM 4791	10% máx.,	10% máx.,
Caras fracturadas	MTC E 210	85/50	90/70
Sales solubles totales	MTC E 219	0.5% máx.	0.5% máx.
Absorción *	MTC E 206	1.0% máx.	1.0% máx.

Nota. * En circunstancias especiales, solo se aceptará un porcentaje superior solo si se pueden garantizar las propiedades de durabilidad de la mezcla asfáltica.

- La adhesión de agregados gruesos para áreas mayores a 3000 msnm será evaluada por el desempeño de la mezcla asfáltica, como se describe en la Subsección 430.02.
- La notación “85/50” señala que el 85% del agregado grueso tiene una cara fracturada y el 50% tiene dos caras fracturadas.

Tomado de Especificaciones técnicas generales para la construcción EG-2013 – Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

Tabla 16

Requerimientos para los agregados finos

Ensayos	Norma	Requerimiento Altitud (msnm)	
		≤ 3000	>3000
Equivalente de Arena	MTC E 114	60	70
Angularidad del agregado fino	MTC E 222	30	40
Azul de metileno	AASHTO TP 57	8 máx.	8 máx.
Índice de plasticidad (malla N° 40)	MTC E 111	NP	NP

Durabilidad (al sulfato de magnesio)	MTC E 209	-	18 máx.
Índice de durabilidad	MTC E 214	35 mín.	35 mín.
Índice de plasticidad (malla N° 200)	MTC E 111	4 máx.	NP
Sales solubles totales	MTC E 219	0.5% máx.	0.5% máx.
Absorción**	MTC E 205	0.5% máx.	0.5% máx.

*Nota:** Como excepción, solo se aceptarán porcentajes mayores solo si se garantizan las características de durabilidad de la mezcla asfáltica.

- La adherencia de agregado grueso para áreas mayores a 3000 msnm será evaluada mediante la performance de la mezcla asfáltica según lo señalado en la Subsección 430.02.

Tomado de Especificaciones técnicas generales para la construcción EG-2013 – Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

Además de los requisitos de calidad que debe el árido, el material de la mezcla de los agregados deberá estar libre de terrones de arcilla, se acepta como máximo el 1% de partículas deleznales, y no deberá contener material orgánico y otros materiales deletéreos.

B. Especificaciones del cemento asfáltico. El cemento asfáltico a utilizar en las mezclas asfálticas en caliente será clasificado por su viscosidad absoluta y su penetración. Para la selección del cemento asfáltico primero se tomará en cuenta las condiciones climáticas del lugar donde se llevará a cabo su aplicación.

Tabla 17

Selección del tipo de cemento asfáltico

Temperatura media anual			
24°C o mas	24°C – 15°C	15°C – 5°C	Menos de 5°C
40-50 ó	60-70	85-100	Asfalto
60-70 ó modificado		120-150	modificado

Nota: Tomado de Especificaciones técnicas generales para la construcción EG-2013 – Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

Los requisitos de calidad del cemento asfáltico son los establecidos en las especificaciones del cemento asfáltico clasificados por penetración y las especificaciones del cemento asfáltico clasificado por viscosidad. El cemento asfáltico deberá mostrar un aspecto homogéneo sin presencia de agua, tampoco formar espuma al ser calentado a 175°C

Tabla 18*Especificaciones del cemento asfáltico por penetración*

Tipo		Grado de penetración									
Grado	Ensayo	PEN 40-50		PEN 60-70		PEN 85-100		PEN 120-150		PEN 200-300	
		min.	máx.	in.	áx.	in.	áx.	in.	áx.	in.	áx.
Pruebas sobre el material bituminoso											
Penetración a 25°C, 100g, 5 s, 0.1 mm	MTC E 304	40	50	0	0	5	00	20	50	00	00
Punto de inflamación, °C	MTC E 312	232		32		32		18		77	
Ductilidad, 25°C, 5cm/min, cm	MTC E 306	100		00		00		00		00	
Solubilidad en Tricloro-etileno, %	MTC E 302	99,0		9,0		9,0		9,0		9,0	
Índice de penetración (susceptibilidad térmica)	MTC E 304	-1	+1	1	1	1	1	1	1	1	1
Ensayo de la mancha (Oliensies)											
Solvente nafta – estándar		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo	
Solvente nafta – xileno, % xileno	AASHTO M 20	Negativo		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo	
Solvente heptano – xileno, % xileno		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo		Negativo	
Pruebas sobre la película delgada a 163°C, 3,2 mm, 5 h											
Pérdida de masa, %	ASTM D 1754		0,8		0,8		1,0		1,3		1,5
Penetración retenida después del ensayo de la partícula fina, %	MTC E 304	5+		2+		7+		2+		7+	
Ductilidad del residuo a 25°C, 5cm/min, cm	MTC E 306			0		5		00		00	

Nota: Tomado de especificaciones técnicas generales para la construcción EG-2013 – Ministerio de Transportes y Comunicaciones etc. UTM

C. Especificaciones del filler mineral. El filler, también conocido como polvo mineral (cemento Portland, polvo de roca, polvo de escoria, ceniza fina y cal), deberá cumplir con la NORMA ASTM D-242, donde se usa con la finalidad de complementar las granulometrías, como relleno de vacíos y mejorador de adherencia agregado – asfalto, donde las cantidades a utilizar se definirá en la fase de diseño de mezclas según el método Marshall.

Tabla 19*Requerimientos físicos de la cal*

Malla	Porcentaje que pasa del peso (%)
1.18 mm (N° 16)	100
600-µm (N° 30)	97 a 100
300-µm (N° 50)	95 a 100
75-µm (N° 200)	70 a 100

Nota: Tomado de Standard Specification for Mineral Filler for Asphalt Mixtures ASTM D-242

A. Especificaciones de la temperatura de aplicación del material bituminoso. De acuerdo con las especificaciones técnicas generales para la construcción del MTC (EG-2013): “Los materiales bituminosos para uso en diversas obras de acuerdo a la especificación respectiva, será obligatoriamente aplicado dentro de los rangos de la carta de viscosidad – temperatura (ASTM D341) establecidos en el proyecto y aprobado por el supervisor” se observará los rangos de temperatura de aplicación en la siguiente tabla:

Tabla 20

Rangos de temperatura de aplicación

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	
CMS2h, CSS-1, CSS-1h	20-70	.-	10-70	
Cemento asfáltico todos los grados		140 máx. (3)		140 máx. (4)

Nota:

- (1) Temperatura de la mezcla inmediatamente después de preparada.
- (2) La máxima temperatura deberá estar debajo de aquella en la que ocurren vapores o espuma.
- (3) En algunos casos la temperatura de aplicación puede estar por encima de la temperatura de inflamación. Por lo tanto, se deberá tener precaución para prevenir fuego o explosiones.
- (4) Se podrá variar esta temperatura de acuerdo a la carta viscosidad temperatura.

Fuente MS-16 Asphalt Institute

Tomado de especificaciones técnicas generales para la construcción EG-2013 – Ministerio de Transportes y Comunicaciones

B. Especificaciones volumétricas de la mezcla asfáltica en caliente. Las características volumétricas de la mezcla asfáltica están relacionadas con la calidad de la producción y deberán satisfacer las exigencias de las especificaciones para concreto asfáltico en caliente indicadas a continuación, según el tipo de mezcla que se produzca de acuerdo al diseño del proyecto.

Tabla 21

Requisitos para la mezcla de concreto bituminoso

Parámetro de diseño	Clase de mezcla		
	A	B	C
Marshall (MTC E 504)			
1. Compactación, número de golpes por lado	75	50	35
2. Estabilidad (mínimo)	8.15 kN (831kg)	5.44 kN (555kg)	4.53 kN (462kg)
3. Flujo 0.01" (0.25mm)	8-14	8-16	8-20
4. Porcentaje de vacíos con aire (1) (MTC E505)	3-5	3-5	3-5
5. Vacíos en el agregado mineral	Ver tabla 22	Ver tabla 22	Ver tabla 22
Inmersión – compresión (MTC E 518)			
1. Resistencia a la compresión Mpa min.	2.1	2.1	1.4
2. Resistencia retenida % (mín.)	75	75	75
Relación polvo – asfalto (2)	0.6 – 1.3	0.6 – 1.3	0.6 – 1.3
Relación			
Estabilidad/flujo (kg/cm) (3)	1700 – 4000	1700 – 4000	1700 – 4000
Resistencia conservada en la prueba de tracción indirecta AASHTO T283		80 mín.	

Nota:

- (1) A la fecha se tienen tramos efectuados en el Perú que tienen el rango de 2% a 4% (es deseable que tienda al menor 2%) con resultados satisfactorios en climas fríos por encima de 3000 msnm que se recomienda en estos casos.
- (2) Relación entre el porcentaje en peso del agregado más fino que el tamiz 0.075mm y el contenido de asfalto efectivo, en porcentaje en peso del total de la mezcla.
- (3) Para zonas de clima frío es deseable que la relación estabilidad/flujo sea de menor magnitud posible.
- (4) El índice de compactabilidad mínimo será 5.

El índice de compactabilidad se define como: $\frac{1}{GEB\ 50 - GEB\ 5}$

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

Tomado de especificaciones técnicas generales para la construcción EG-2013 – Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

Tabla 22*Vacíos mínimos en el agregado mineral (VMA)*

Tamiz	Vacíos mínimos en el agregado mineral %	
	Marshall	Superpave
2.36 mm (N° 8)	21	-
4.75 mm (N° 4)	18	-
9.50 mm (3/8")	16	15
12.5 mm (1/2")	15	14
19.0 mm (3/4")	14	13
25.0 mm (1")	13	12
37.5 mm (1 1/2")	12	11
50.0 mm (2")	11.5	10.5

Nota. Tomado de Especificaciones técnicas generales para la construcción EG-2013 – Ministerio de Transportes y Comunicaciones

2.2.5.3. Evaluación y ajustes de una mezcla de diseño.

Para desarrollar una mezcla de diseño, es necesario realizar mezclas de prueba hasta lograr una óptima que cumpla con las condiciones de diseño. Para el diseño de mezcla preliminar se aconseja iniciar con gradaciones muy próximas a la media de los límites establecidos ya que estas mezclas de prueba sirven para determinar la fórmula de trabajo y evaluar que la gradación de los agregados para producir mezclas en planta.

2.2.5.4. Evaluación y ajustes de la metodología Marshall.

Al momento de desarrollar una mezcla de diseño, siempre será necesario realizar mezclas de prueba de esa manera adoptar la más óptima cumpliendo así todos los requisitos y criterios de diseño. Cada una de las mezclas de pruebas obligatorias nos sirve para evaluar y realizar algunos ajustes a las mezclas de prueba siguientes.

Para un diseño de mezcla preliminar o exploratoria, se recomienda empezar con una gradación de agregado próximos a la medida de los parámetros establecidos donde las mezclas de prueba sirven para determinar la fórmula de trabajo y comprobar que la gradación del

agregado dentro de los parámetros establecidos pueda ser reproducida dentro de una planta mezcladora.

En caso se presente una deficiencia en la mezcla de diseño, una de las maneras más prácticas para rediseñar y obtener las propiedades requeridas es de cambiar la gradación del agregado variando los porcentajes utilizados. Existen lineamientos generales para hacer ajustes a las mezclas de prueba, aunque estas sugerencias no resultan en todos los casos.

A. Vacíos bajos y estabilidad baja. Los niveles de vacíos pueden incrementarse de distintas formas, donde una de ellas consiste en incrementar el VMA por medio del aumento de agregado grueso o agregado fino. El aumento de VMA brinda más espacio en la mezcla para una mayor cantidad de vacíos.

Otra manera de aumentar los vacíos es la de reducir el contenido de asfalto, pero esto solo se aplicará siempre y cuando si exista exceso de asfalto en la mezcla, y si no disminuye el contenido de asfalto por debajo del límite donde el espesor de la película y encontrándose en un nivel aceptable la durabilidad del pavimento.

El incremento de materiales triturados en la mezcla da formas angulares de partículas y texturas superficiales ásperas las que mejoran el VMA y el roce (fricción) entre partículas. Por otro lado, pasa que en agregados como el cuarzo y otros similares presentan caras fracturadas muy lisas por tal motivo no cumple las expectativas de aumento de estabilidad.

B. Bajo contenido de vacíos, estabilidad satisfactoria. Si presentamos un contenido bajo de vacíos en consecuencia se presentará la exudación en el pavimento después de que haya sido expuesto a su transitabilidad por un tiempo determinado. Por otra parte, un bajo contenido de vacíos puede causar también la inestabilidad y exudación cuando haya degradación en el agregado.

Por tal motivo, las mezclas que tienen contenidos bajos de vacíos se deberán modificar utilizando los criterios mencionados anteriormente aún cuando la estabilidad sea satisfactoria.

C. Contenido satisfactorio de vacíos, baja estabilidad. Si tenemos una baja estabilidad aún cuando los vacíos y la gradación del agregado son satisfactorios, entonces, se concluye que el agregado presenta deficiencias, por tal motivo se deberá mejorar la calidad del agregado aplicando los criterios mencionados en punto A (Vacíos bajos y estabilidad baja).

D. Contenido alto de vacíos, estabilidad satisfactoria. Los altos contenidos de vacíos están asociados casi siempre con altas permeabilidades. Por ende, si la estabilidad de la mezcla es satisfactoria se debe disminuir el contenido excesivo de vacíos. Esto se podrá lograr siempre que se aumente el contenido de filler o polvo mineral en la mezcla. Sin embargo, hay casos en particular donde la graduación del agregado debe cambiarse para aumentar la densidad (disminuir los vacíos).

E. Contenido alto de vacíos, baja estabilidad. Si el contenido de vacíos es alto pero su estabilidad es baja, entonces se debe disminuir el contenido de vacíos usando los métodos ya mencionados. Aun así, después aplicar dichos métodos, el contenido de vacíos y la estabilidad no mejoran se deberá verificar el tipo de agregado utilizado de acuerdo a lo mencionado en el punto A (Vacíos bajos y estabilidad baja).

2.2.5.5. Selección de diseño final

Al escoger un diseño final usualmente se hace porque este cumple de manera satisfactoria los requerimientos y es muy viable económicamente, sin embargo, el diseño no deberá optimizar ninguna de las propiedades en particular.

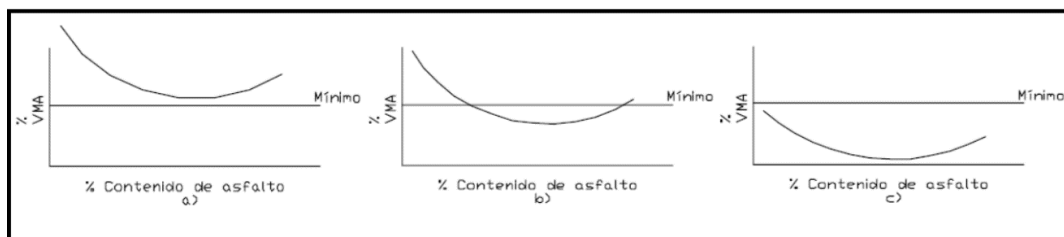
Las mezclas que tienen valores altos anormales de estabilidad no son aceptables en su mayoría, ya que como pavimento son poco durables y tienden a fracturarse con un mínimo de tránsito.

Si hablamos de la selección del contenido óptimo obligatoriamente se debe considerar el balance de las propiedades de la mezcla. En su mayoría los criterios de diseños de mezclas, nos darán un rango limitado y aceptable de contenidos de asfalto que superen los lineamientos, donde la selección del contenido de asfalto que depende de este rango limitado logrará adquirir propiedades que satisfagan los requerimientos de un proyecto en específico, pero algunas propiedades serán más críticas que otras esto dependerá de las consideraciones de diseño (estructura, tránsito, clima, proceso constructivo, equipos, etc.), cabe recalcar que el proceso de balanceo será distinto en cada pavimento y para tipo de diseño de mezcla.

A. Evaluación de la curva VMA. En la mayoría de casos en un diseño de mezcla asfáltica, lo importante es disminuir el contenido de vacíos de un agregado mineral, ya que con esto se busca proporcionar espacios suficientes para el asfalto y se tenga una buena adhesión para ligar todas las partículas de agregado al momento de incrementarse las temperaturas y el asfalto se expanda. Normalmente la curva se muestra en forma de U alargada, decreciendo a un valor mínimo para después ascender cuando se incrementa asfalto como se muestra en la siguiente figura.

Figura 10

Relación entre VMA y el límite de especificación



Nota: Tomado de SCT IMT, Publicación técnica N° 246

La dependencia que tiene el VMA con el contenido de asfalto, pareciera ser una contradicción teórica porque se espera que el VMA se mantenga constante con la variación del contenido de asfalto, pensando que el cemento asfáltico desplazará a los vacíos de aire, así que el volumen total varía sobre la línea del contenido de asfalto y no es correcto adoptar una unidad constante de volumen.

En realidad, con el incremento de asfalto la mezcla es más manejable y muy fácil de compactar, quiere decir, cuánto más peso se comprime a un menor volumen. Por ello, decimos que la densidad de masa de la mezcla se incrementa cuando VMA disminuye.

En ciertos puntos donde el contenido de asfalto aumenta, el VMA se eleva porque el agregado es más denso siendo este desplazado y empujado por el cemento asfáltico que es menos denso, por ello, es mejor que los contenidos de asfalto en el lado húmedo o derecho creciente de la curva VMA se eviten, aunque cumplan el mínimo de vacíos de aire y el criterio de VMA. En este rango, el diseño de contenido de asfalto siempre logra un flujo plástico cuando está colocado en campo.

Cualquier incremento adicional de compactación por el tráfico conlleva a una inadecuada expansión de asfalto, dentro de ello la pérdida de contacto entre agregados y el desgaste eventual en las zonas de alto tráfico. Lo ideal sería seleccionar el diseño del contenido de asfalto un poco a la izquierda del punto bajo de la curva VMA de tal manera que los demás criterios de mezclas no sean violados.

En ciertas mezclas, se tiene que el fondo de la curva VMA, en forma de U es muy plana, mostrando que las mezclas compactadas no son tan sensibles al contenido de asfalto en este rango como otros factores. Cuando el contenido de asfalto está en rangos normales, las propiedades de los agregados influyen de manera significativa en la compatibilidad.

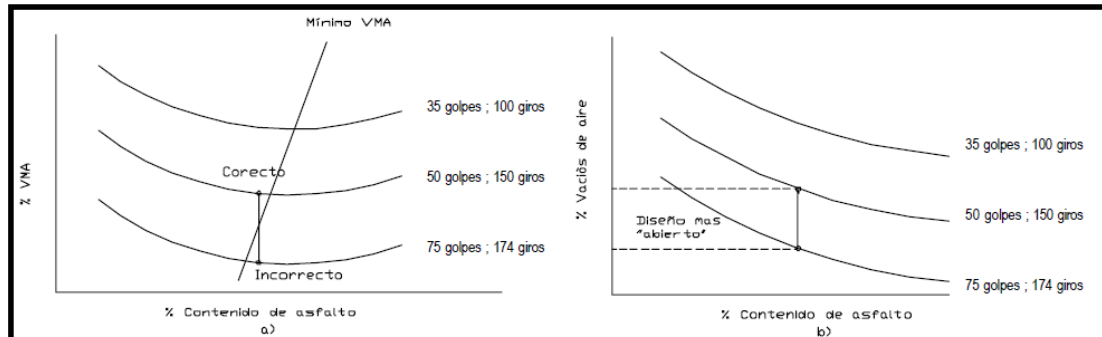
En el caso de que el fondo de la curva del VMA en forma de U, cae por debajo del nivel del criterio mínimo exigido para el tamaño del agregado máximo nominal de la mezcla, nos quiere decir, que se necesita hacer variaciones en las fórmulas de trabajo.

B. Efecto del nivel de compactación. Teniendo un mismo contenido de asfalto, los vacíos en el agregado mineral (VMA) y los vacíos de aire (Va) disminuyen con el esfuerzo más alto compactado. Se tiene una buena ilustración utilizando tres niveles de compactación Marshall y tres valores de giros como se muestra en la fig. 11, no solo cambia las magnitudes de los valores sino también varía el contenido de asfalto en el mínimo VMA. Si nos presentamos con una mezcla que resulta a la izquierda del mínimo de VMA en un nivel de compactación de 150 giros o 50 golpes y en el pavimento un tráfico actual pesado que supera lo esperado (cerca a los 174 giros y 75 golpes) en consecuencia será una mezcla muy susceptible a desgastarse. También se puede presentar un escenario opuesto donde una mezcla con un nivel de compactación de 75 golpes o 174 giros como se observa en la fig. 11, se encuentre en un pavimento con un tránsito bajo, por lo tanto, el porcentaje final de vacíos de aire (Va) pueda resultar más alto que lo esperado. Esta condición nos lleva a que la mezcla sea más abierta (permeable), dando espacio a que el agua y el aire fácilmente pasen a través de ella. Esta situación nos da como producto final a una mezcla que endurece prematuramente, volviéndose quebradiza y frágil a una edad temprana, o el agregado tiende a entrelazarse fuera de la mezcla a causa de la pérdida de adherencia del asfalto. En consecuencia, este tipo de escenarios nos conlleva al desprendimiento de partículas.

Por tal motivo, es importantísimo en laboratorio que el esfuerzo de compactación empleado simule el diseño de tránsito real para el pavimento. Adicional a ellos también la mezcla se tiene que construir con un adecuado equipo de compactación para producir una buena densidad y resista a las condiciones climáticas.

Figura 11

Efecto de los esfuerzos de compactación Marshall en VMA y Va



Nota: Tomado de Análisis comparativo de los métodos Marshall y Superpave para compactación de mezclas asfálticas, Publicación técnica N° 246, por Gárnica, Delgado y Sandoval, 2005, SCT IMT

De tal manera, es muy importante ya que el criterio de VMA no varía sino se basa en el nivel de compactación y todos los sustentos para lograr suficiente VMA son consistentes sin considerar el tránsito para lo cual la mezcla está siendo diseñada.

C. Efecto de los vacíos de aire. Debemos saber que el rango aceptable de vacíos de aire es de 3 a 5% luego de varios años de transitabilidad. Este rango no varía por el tránsito ya que se sobre entiende que el esfuerzo de compactación en laboratorio ha sido el indicado con respecto al tránsito esperado, por ello es que se logra alcanzar si la mezcla fue diseñada con el adecuado esfuerzo de compactación logrando después de su construcción un porcentaje entre el 6 y 8%.

El resultado de una variación en algún factor o cualquier cambio durante el procedimiento traerá una pérdida de vida de servicio o desempeño. En muchos casos se ha visto mezclas que logran consolidarse con un 3% de vacíos. Diferentes factores implican este incidente como un incremento en la cantidad de las partículas finas que pasan la malla N°200 o un incremento en el contenido de asfalto mezclado, la que podría aumentar el contenido óptimo de asfalto.

También puede ocurrir con mezclas que superan el 5% de vacíos de aire o con el 8% de vacíos inicialmente, las que conllevan a condiciones de desgaste, agrietamiento prematuro, quebradizo y desprendimiento.

Finalmente, el fin es limitar los ajustes de diseño del contenido de asfalto menor al 0.5% de vacíos de aire de la media del criterio de diseño (4%), y para verificar que la mezcla producida en planta sea la misma que se elaboró en laboratorio.

D. Efecto de los vacíos llenos de asfalto. Aunque V_a , VFA y VMA se relacionan entre sí, dos de ellos se necesitan para resolver los demás, considerando el VFA en el diseño de mezclas con un VMA de marginal a aceptable donde el criterio VFA tiene como efecto limitar los máximos niveles de VMA y los niveles máximos de contenido de asfalto.

Podemos decir también que el VFA limita el contenido de aire aceptable para mezclas cercanas al criterio mínimo de VMA. Las mezclas que son diseñadas para bajos tráficos no pasarán el criterio de VFA con más del 5% de vacíos, aun así, el criterio de vacíos de aire si se cumpla. La finalidad es evitar mezclas con poca duración en casos con tránsito ligero.

Las mezclas que son diseñadas para tráfico alto y/o pesado no pasan el criterio de VFA con un porcentaje menor al 3.5%, aunque los vacíos fuesen aceptados dentro del rango. Como un contenido bajo de vacíos tiende a ser muy crítico en términos de deformación permanente, entonces decimos que el criterio VFA impide la susceptibilidad a las roderas en situaciones de tráfico alto.

Finalmente, se dice que el criterio VFA brinda un factor de seguridad en el diseño y proceso constructivo (desempeño) con márgenes de error aceptables.

2.3. Marco conceptual

Abrasión: Desgaste mecánico de agregados y rocas resultante de la fricción y/o impacto. (Glosario de términos de uso frecuente en infraestructura vial, 2018)

Absorción: Proceso por el cual un fluido es retenido por un material después de cierto tiempo de exposición (suelo, rocas, maderas, etc.). (Glosario de términos de uso frecuente en infraestructura vial, 2018)

Aglomerante: Material capaz de unir partículas de material inerte por efectos físicos o transformaciones químicas o ambas. (Glosario de términos de uso frecuente en infraestructura vial, 2018)

Agregado: Material granular de composición mineralógica como arena, grava, escoria, o roca triturada, usado para ser mezclado en diferentes tamaños. (Glosario de términos de uso frecuente en infraestructura vial, 2018)

Agregado angular: Agregados que poseen bordes bien definidos formados por la intersección de caras planas rugosas. (Glosario de términos de uso frecuente en infraestructura vial, 2018)

Agregado bien graduado: Agregado cuya gradación va desde el tamaño máximo hasta el de un relleno mineral que se encuentra centrado a una curva granulométrica “huso” especificada. (Glosario de términos de uso frecuente en infraestructura vial, 2018)

Agregado fino: Material proveniente de la desintegración natural o artificial de partículas cuya granulometría es determinada por las especificaciones técnicas correspondientes. Por lo general pasa la malla N° 4 (4,75 mm). (Glosario de términos de uso frecuente en infraestructura vial, 2018)

Agregado grueso: Material proveniente de la desintegración natural o artificial de partículas cuya granulometría es determinada por las especificaciones técnicas

correspondientes. Por lo general es retenida en la malla N°4 (4,75 mm). (Glosario de términos de uso frecuente en infraestructura vial, 2018)

Análisis granulométrico o mecánico: Procedimiento para determinar la granulometría de un material o la determinación cuantitativa de la distribución de tamaños. (Glosario de términos de uso frecuente en infraestructura vial, 2018)

Arena: Partículas de roca que pasan la malla N° 4 (4,75 mm) y son retenidas por la malla N° 200. (Glosario de términos de uso frecuente en infraestructura vial, 2018)

Asfalto: Material cementante, de color marrón oscuro a negro, constituido principalmente por betunes de origen natural u obtenidos por refinación del petróleo. El asfalto se encuentra en proporciones variables en el crudo de petróleo. (Glosario de términos de uso frecuente en infraestructura vial, 2018)

Calidad de los agregados: Los agregados, deben cumplir con requisitos de granulometría y especificaciones técnicas, que garanticen un buen comportamiento durante su periodo de vida útil (Manual de Laboratorio Ensayos para Pavimento Volumen 1, Minaya Gonzales, Ordoñez Huamán, 2001)

Cemento asfáltico: Un asfalto con flujo o sin flujo, especialmente preparado en cuanto a calidad o consistencia para ser usado directamente en la construcción de pavimentos asfálticos. (Glosario de términos de uso frecuente en infraestructura vial, 2018)

Concreto asfáltico: Mezcla procesada, compuesta por agregados gruesos y finos, material bituminoso y de ser el caso se incorpora aditivos para mejorar sus propiedades de comportamiento. Es utilizada como capa de base o de rodadura y forma parte de la estructura del pavimento. (Glosario de términos de uso frecuente en infraestructura vial, 2018)

Cuarteo: Procedimiento de reducción del tamaño de una muestra. (Glosario de términos de uso frecuente en infraestructura vial, 2018)

Densidad: Relación entre la masa y el volumen de un cuerpo. (Glosario de términos de uso frecuente en infraestructura vial, 2018)

Ensayo Marshall: Procedimiento para obtener el contenido de asfalto y diferentes parámetros de calidad de una mezcla bituminosa. (Glosario de términos de uso frecuente en infraestructura vial, 2018)

Equivalente de arena: Proporción relativa del contenido de polvo fino o material arcilloso en los suelos o agregados finos. (Glosario de términos de uso frecuente en infraestructura vial, 2018)

Estabilidad Marshall: Es la máxima resistencia a la deformación a una razón constante de carga. La magnitud de la estabilidad Marshall varía con el tipo gradación del agregado y grado del bitumen empleado, así como su cantidad. Varias agencias establecen criterios para los valores de la estabilidad Marshall. (Manual de Ensayo de Materiales EM-2016)

Filler: Material proveniente por lo general de la caliza pulverizada, polvos de roca, cal hidratada, cemento Portland, ciertos depósitos naturales de material fino, empleado en la fabricación de mezclas asfálticas en caliente como relleno de vacíos, espesante de la mezcla o como mejorador de adherencia. (Glosario de términos de uso frecuente en infraestructura vial, 2018)

Flujo Marshall: El flujo Marshall es una medida de la deformación de las mezclas bituminosas determinado durante el ensayo de estabilidad. No existe un valor ideal, pero hay límites aceptables. Si el flujo en el contenido óptimo de asfalto sobrepasa el límite superior, la mezcla se considera demasiado plástica o inestable, y si está bajo el límite inferior esta se considera demasiado rígida. (Manual de Ensayo de Materiales EM-2016)

Grados de penetración: Sistema de clasificación de los cementos asfálticos basado en la penetración a una temperatura de 25°C. Existen grados patrones de clasificación tales como:

40-50, 60-70, 85-100, 120-150 y 200-300. (Glosario de términos de uso frecuente en infraestructura vial, 2018)

Grados de viscosidad: Sistema de clasificación de cementos asfálticos basado en rangos de viscosidad a una temperatura de 60°C (140°F). Usualmente también se especifica una viscosidad mínima a 135°C (275°F). El propósito es de establecer valores límites de consistencia a estas dos temperaturas. Los 60°C (140°F) se aproximan a la máxima temperatura de servicio de la superficie del pavimento asfáltico. Los 135°C (275°F) se aproximan a la temperatura de mezclado y colocación de pavimentos de mezclas en caliente. Existen cinco grados de cemento asfáltico basado en la viscosidad del asfalto original a 60°C (140°F). (Glosario de términos de uso frecuente en infraestructura vial, 2018)

Granulometría: Representa la distribución de los tamaños que posee el agregado mediante el tamizado según especificaciones técnicas. (Glosario de términos de uso frecuente en infraestructura vial, 2018)

Granulometría Superpave: La granulometría Superpave emplea el exponente 0.45 en la carta para definir la granulometría permitida (gráfica de Fuller), mediante una técnica gráfica única para juzgar la distribución de tamaños acumulados de partículas de una mezcla de agregados. (Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica N° 299)

Mezcla asfáltica en caliente: Se define como mezcla asfáltica (o bituminosa) en caliente a la combinación de áridos (incluido el polvo mineral) con un ligante. Las cantidades relativas de ligante y áridos determinan las propiedades físicas de la mezcla. El proceso de fabricación implica calentar el agregado pétreo y el ligante a alta temperatura, muy superior a la ambiental. Enseguida esta mezcla es colocada en la obra (Laboratorio Nacional de Vialidad, Mezcla Asfáltica en Caliente, Curso Laboratorista Vial C, 2015)

Viscosidad: Medida de la resistencia al flujo. Es un método usado para medir la consistencia del asfalto. (Glosario de términos de uso frecuente en infraestructura vial, 2018)

Capítulo III

Metodología de la investigación

3.1. Hipótesis

3.1.1. *Hipótesis general.*

La granulometría de los agregados de la cantera El Pedregal influye en las mezclas asfálticas en caliente en la ciudad de Abancay, 2019.

3.1.2. *Hipótesis específicas:*

- a) La granulometría Superpave en comparación con la granulometría MAC-02 de los agregados de la cantera El Pedregal influye en la estabilidad de las mezclas asfálticas en caliente.
- b) La granulometría Superpave en comparación con la granulometría MAC-02 de los agregados de la cantera El Pedregal influye en el flujo de las mezclas asfálticas en caliente.

- c) La granulometría Superpave en comparación con la granulometría MAC-02 de los agregados de la cantera El Pedregal influye en la relación estabilidad/flujo de las mezclas asfálticas en caliente.
- d) La granulometría Superpave en comparación con la MAC-02 de los agregados de la cantera El Pedregal influye en el % de vacíos en el agregado mineral de las mezclas asfálticas en caliente.

3.2. Método

En la presente tesis se empleó el método inductivo.

El método inductivo plantea un razonamiento ascendente que fluye de lo particular o individual hasta lo general. Se razona que la premisa inductiva es una reflexión enfocada en el fin. Puede observarse que la inducción es un resultado lógico y metodológico de la aplicación del método comparativo (Abreu, 2014). Ya que analizamos la granulometría de los agregados (Superpave y MAC-02) y su influencia en las mezclas asfálticas en caliente.

La orientación de la tesis es aplicada.

Según Calderón (2013), la orientación de la investigación es aplicada porque resuelve el problema planteado de manera práctica y concreta, utilizando conocimientos científicos de ingeniería ya que al manipular los datos probatorios estructurados del ensayo de granulometría empleando los husos MAC-02 y Superpave que permiten la obtención de resultados sobre su influencia en la estabilidad, flujo, relación estabilidad/flujo y % de vacíos en el agregado mineral.

Asimismo, la presente tesis tiene un enfoque cuantitativo.

El enfoque cuantitativo presenta un conjunto de procesos, es secuencial y probatorio. Cada una de las etapas precede a la siguiente y no se puede omitir pasos. El orden es estricto, pero se puede redefinir alguna fase. Parte de una idea se acota, delimita y se derivan objetivos y preguntas de investigación, se revisa teoría y se construye un marco. Se generan hipótesis y variables de las preguntas y se procede a probarlas, se analizan resultados obtenidos utilizando métodos estadísticos y se plantea conclusiones (Hernández y Fernández, 2014). Para la presente investigación se tomaron datos producto de los ensayos de laboratorio que sirven para medir las variables granulometría de los agregados y mezclas asfálticas calientes, luego se analizan y comparan entre sí y con respecto a la norma.

La presente tesis es prolectiva.

Según Talavera (2011), la presente investigación es prolectiva ya que la obtención de la información se realizó simultáneamente con la ocurrencia de la maniobra y, por lo tanto, simultáneo a la ocurrencia del resultado. Para este caso, se dice que la investigación es prolectiva ya que se recogerá los datos obtenidos en los ensayos respectivos de laboratorio con respecto a las gradaciones de Superpave y MAC-02 de los agregados, así como los datos obtenidos del diseño de mezclas asfálticas en caliente.

3.3. Tipo de investigación

La presente tesis es del tipo explicativo.

La investigación explicativa: es aquella que tiene relación causal; no solo persigue describir o acercarse a un problema, sino que intenta encontrar las causas del mismo. (Zafra, 2006). Ya que busca explicar los efectos de los husos granulométricos Superpave y MAC-02 en las mezclas asfálticas en caliente.

3.4. Nivel o alcance de investigación

La presente tesis será una investigación explicativa.

Como nos indica Hernández, Fernández y Baptista (2014), en una investigación explicativa “se busca explicaciones acerca de la naturaleza de ciertas variables. Van más allá de la descripción de conceptos o fenómenos o del establecimiento de relaciones entre conceptos; están dirigidos a responder a las causas de los eventos físicos o sociales” (p,90), y una investigación correlacional “es un tipo de estudio, tiene como finalidad conocer la relación o grado de asociación que exista entre dos o más conceptos, categorías o variables en un contexto en particular” (p. 93).

La utilidad y el propósito principal es comprender cómo se comporta la mezcla asfáltica caliente con respecto al análisis de la granulometría MAC-02 y la granulometría Superpave.

3.5. Diseño de investigación

Hernández, Fernández y Baptista (2014), refieren que el diseño de la investigación según el propósito es de tipo experimental, pues los datos se recogerán en un momento dado, los experimentos manipulan tratamientos, estímulos, influencias o intervenciones (denominadas variables independientes) para observar sus efectos sobre las variables dependientes en una situación de control. Se pretende establecer experiencias a través del tratamiento en laboratorio para obtener el comportamiento de la variable granulometría de los agregados, donde se manipula intencionalmente los husos granulométricos según Superpave y MAC- 2 con el fin de asignar distintos valores, estos resultados se reflejaron en la estabilidad, flujo, relación estabilidad/flujo y % de vacíos del agregado mineral de las mezclas asfálticas diseñadas por la metodología Marshall.

Según Carrasco (2006), el diseño de investigación según el periodo en que se capta la información, el estudio es prospectivo, ya que toda la información se recogerá, de acuerdo con los criterios del investigador y para los fines específicos de la investigación, después de la planeación de esta.

Asimismo, el diseño de investigación según el número de pruebas a realizar será transversal ya que analiza datos de variables recopiladas en un periodo de tiempo sobre una población muestra o subconjunto predefinido. (Hernández, 2010)

3.6. Operacionalización de variables

V1: Granulometría de los agregados

Descripción: Para el presente estudio se utilizará los husos granulométricos: Superpave y MAC-02 las cuales tienen que cumplir los requerimientos de las Especificaciones Técnicas Generales EG – 2013, siguiendo los procedimientos establecidos en el Manual de Ensayo para Materiales EM – 2016

V2: Mezclas asfálticas en caliente

Descripción: Las proporciones relativas de cemento asfáltico y agregados de la mezcla determinan las propiedades físicas y mecánicas (estabilidad, flujo, relación estabilidad/flujo y % de vacíos en el agregado mineral) que se obtienen mediante el Ensayo Marshall.

Tabla 23*Cuadro de operacionalización de variables*

Variab les	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores
V1 Granulometría de los agregados	Representa la distribución de los tamaños que posee el agregado mediante el tamizado según especificaciones técnicas (Glosario de términos de uso frecuente en infraestructura vial, 2018).	Para el presente estudio se utilizará los husos granulométricos: Superpave y MAC-02 las cuales tienen que cumplir los requerimientos de las Especificaciones Técnicas Generales EG – 2013, siguiendo los procedimientos establecidos en el Manual de Ensayo para Materiales EM – 2016	Granulometría Superpave	Huso granulométrico MAC-02
		Zúñiga (2015) en el curso del Laboratorista Vial, define: “Mezcla asfáltica (o bituminosa) en caliente a la combinación de áridos (incluido polvo mineral) con un ligante. Las cantidades relativas de ligante y áridos determinan las propiedades físicas de las mezclas” (p.8).	Granulometría MAC-02	Huso granulométrico Superpave
V2 Mezclas asfálticas en caliente	Zúñiga (2015) en el curso del Laboratorista Vial, define: “Mezcla asfáltica (o bituminosa) en caliente a la combinación de áridos (incluido polvo mineral) con un ligante. Las cantidades relativas de ligante y áridos determinan las propiedades físicas de las mezclas” (p.8).	Las proporciones relativas de cemento asfáltico y agregados de la mezcla determinan las propiedades físicas y mecánicas que se obtienen mediante, el Ensayo Marshall	Estabilidad Flujo	8.14 kN (mínimo) 8-14
			Relación estabilidad – flujo	1700-4000 kg/cm
			% Vacíos en el agregado mineral	14% mínimo

Nota: Elaboración propia

3.7. Población, muestra y muestreo

3.7.1. Población

Kinncar y Taylor (1998) afirman que: “La población se define como el conjunto de todos los elementos antes de proceder a la selección de la muestra” (p. 199), para la presente investigación, la población se encuentra conformada por la cantera El Pedregal (Km 18+000 vial PE-3S Abancay – Lima).

3.7.2. Muestra

Kinncar y Taylor (1998) afirman que: “El marco muestral es una lista de unidades de muestreo disponibles para su posterior selección en una etapa del proceso de muestreo” (p.200),

el marco muestral que utilizaremos en la presente investigación es el tajo N°5 de la cantera El Pedregal y las unidades de muestreo serán de los agregados finos y gruesos procesados o chancados provenientes de dicho tajo, cabe indicar que el tajo N°5 es el que actualmente está en proceso de explotación en la cantera El Pedregal.

3.7.3. Muestreo

Kinnear y Taylor (1998) afirman que: “Las muestras de conveniencia se seleccionan, como su nombre lo indica, de acuerdo con la conveniencia del investigador, (...). En cada caso, la unidad o elemento de muestreo se autoselecciona o se ha seleccionado con base en su fácil disponibilidad, (...). Sin embargo, las muestras de conveniencia se pueden justificar más fácilmente en la etapa exploratoria de la investigación, como una base para generar hipótesis, y para estudios concluyentes, (...). El muestreo de conveniencia se utiliza extensamente en la práctica” (p. 203, p.204).

3.8. Técnicas e instrumentos

3.8.1. Técnica de recolección de datos

Se utiliza como técnica de recolección de datos la observación sistemática porque se elabora datos en condiciones controladas por el investigador, los ensayos realizados para medir las dimensiones de la variable independiente, luego se realizó el ensayo Marshall para medir la variable dependiente donde se determinó la estabilidad y el flujo de las mezclas asfálticas en caliente. Posteriormente se realiza el análisis e interpretación de resultados para corroborar las hipótesis.

3.8.2. Instrumentos utilizados en la recolección

Se utilizaron las fichas técnicas de recolección de datos de los ensayos realizados en laboratorio, datos que posteriormente fueron procesados bajo la normativa de mezclas asfálticas en caliente con hojas de cálculo, Según Hernández y Mendoza (2018) refieren como recurso que utiliza el investigador para registrar información sobre las variables.

Los instrumentos utilizados para determinar los objetivos específicos en consecuencia el objetivo general fueron los instrumentos mencionados en los manuales de ensayos de materiales EM-2016 y las especificaciones técnicas generales EG-2013 del MTC, y la prueba estadística deductiva “t” de Student para determinar el grado de influencia de cada una de las granulometrías en las propiedades de las mezclas asfálticas.

3.9. Consideraciones éticas

Los investigadores responsables del presente trabajo de investigación han respetado la autoría de diversos autores que fueron tomados en cuenta como apoyo en la investigación, por lo tanto, damos por cumplidos los fines de objetividad, originalidad y ética.

Se respetó la veracidad de los resultados obtenidos en los laboratorios: GEOMAT SERV E.I.R.L. Y HRUIZ GEOPAV INGENIEROS S.A.C. cumpliendo estrictamente los procedimientos y parámetros establecidos en el Manual de Ensayo de Materiales EM-2016, Norma Técnica Peruana, ASTM, entre otros.

Cuando se trata de cuestiones éticas, los investigadores deben tratar tanto cuestiones generales como específicas, por lo que la ética en la investigación es un tipo de ética aplicada o práctica. (Penslar, 1995).

Asimismo, se respetó el Reglamento de Ética de la UTEA (2020), considerando que como investigadores se debe respetar los principios éticos de la investigación, así como actuar con responsabilidad, honestidad, rigurosidad científica y transparencia en todo el proceso investigativo.

3.10. Procesamiento estadístico

Los datos se procesarán y analizarán recurriendo técnicas estadísticas de organización, tabulación y graficación. Asimismo, para la validación de la hipótesis se realizó mediante el software Excel utilizando el estadístico de prueba T-Student.

Capítulo IV

Resultados y discusión

4.1.Resultados

Los resultados están divididos a nivel de cada variable, la primera parte comprende el análisis de resultados de granulometría y caracterización de agregados, teniendo en cuenta sus especificaciones de diseño; la segunda parte presenta los resultados de estabilidad, flujo, relación estabilidad/flujo y porcentaje de vacíos en el agregado mineral de las mezclas asfálticas en caliente ensayadas por la metodología Marshall para los husos granulométricos MAC-02 y Superpave.

4.1.1. Resultados de la variable: granulometría de los agregados

Al realizar la granulometría de los agregados, obtuvimos una combinación con una gradación que cumple con los requerimientos de los husos MAC-02 y Superpave de las especificaciones EG-2013 del MTC, para lo cual se cuenta previamente con la información granulométrica de cada tamaño de agregado distribuido mediante la siguiente expresión:

$$P = Aa + Bb$$

Donde P es el Porcentaje promedio de las especificaciones en un tamaño de tamiz, A, B, C, es el porcentaje del material que pasa un tamiz para una granulometría determinada y por último a, b, c, que es la proporción de agregados A, B, C, etc. usado en la combinación, siempre la suma debe ser 1.

Sabiendo que $a+b=1$, $a=1-b$, se tiene las expresiones: $b = \frac{P-A}{B-A}$ Y $a = \frac{P-B}{A-B}$

4.1.1.1. Granulometría MAC-02

La granulometría MAC-02 propuesta se obtuvo de la combinación del 100% de agregados chancados de la cantera El Pedregal la cual, se encuentra dentro de los límites superiores e inferiores establecidos para el huso MAC-02.

Tabla 24

Componentes granulometría MAC-02.

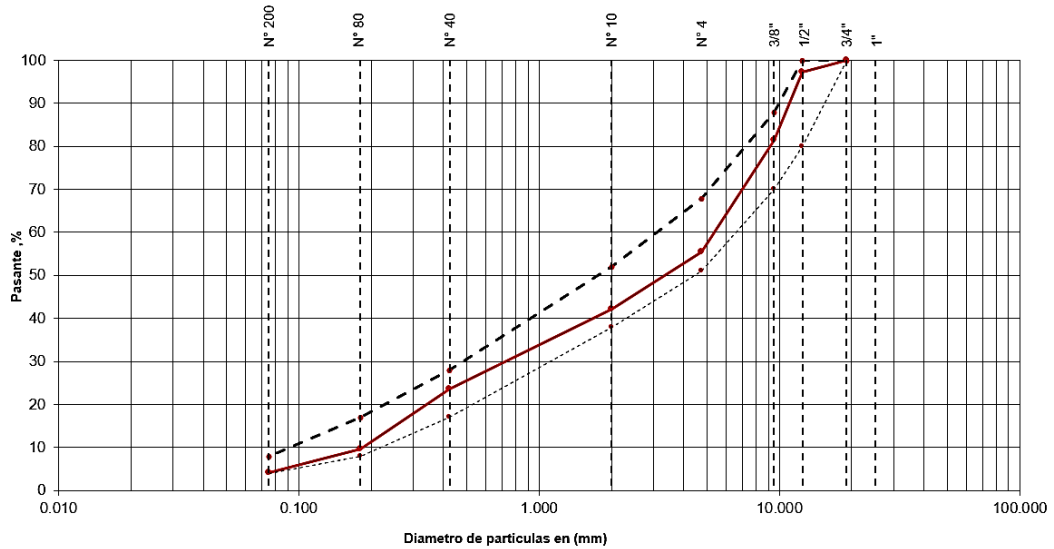
Tamiz	Abertura (mm)	Granulometría de los agregados					% Combinado Que Pasa	Huso Mac - 2	
		Agregado 1	Agregado 2	Agregado 3	Agregado 4	MIN		MAX	
		Grava 3/4" Chancada	Grava 1/2" Chancada	Arena 3/8" Chancada	Filler - Cal				
1"	25.400	100.00	100.00	100.00	100.00	100	100	-	100
3/4"	19.050	100.00	100.00	100.00	100.00	100	100	-	100
1/2"	12.500	90.60	100.00	100.00	100.00	97.2	80	-	100
3/8"	9.500	38.70	98.80	100.00	100.00	81.5	70	-	88
1/4"	6.300	38.70	98.80	100.00	100.00				
Nº 4	4.750	1.80	1.10	94.20	100.00	55.4	51	-	68
Nº 8	2.360	1.80	1.10	94.20	100.00				
Nº 10	2.000	2.30	0.50	71.00	100.00	42.2	38	-	52
Nº 40	0.425	0.50	0.40	39.20	97.00	23.5	17	-	28
Nº 80	0.180	0.40	0.40	15.00	85.00	9.6	8	-	17
Nº 100	0.150	0.40	0.40	15.00	85.00	9.6			
Nº 200	0.075	0.40	0.30	5.90	60.00	4.1	4	-	8
Dosificación		30%	12%	57%	1%	100%			

Nota: Elaboración propia

En la Tabla 24, se observa el cumplimiento de los husos granulométricos MAC-02, donde, no sobrepasa por ningún lado los límites propuestos para la granulometría MAC-02. También, se detalla los porcentajes de las componentes de esta granulometría, así como el porcentaje de la combinación que pasan los distintas mallas.

Figura 12

Gráfica semilogarítmica husos MAC-02 para la granulometría MAC-02



Nota: Elaboración Propia

En la Figura 12, se plasman los datos de la Tabla 24 en la gráfica semilogarítmica con los husos MAC-02, la cual se observa una curva granulométrica que no sobrepasa por ningún lado los límites propuestos para la granulometría MAC-02.

4.1.1.2. Granulometría Superpave.

Se obtuvo una granulometría de combinación de agregados dentro de los parámetros propuestos por la granulometría Superpave, con el aporte de un porcentaje de arena natural zarandeada por la malla 3/8" del lecho de río de la cantera El Pedregal.

Tabla 25

Componentes de la granulometría Superpave

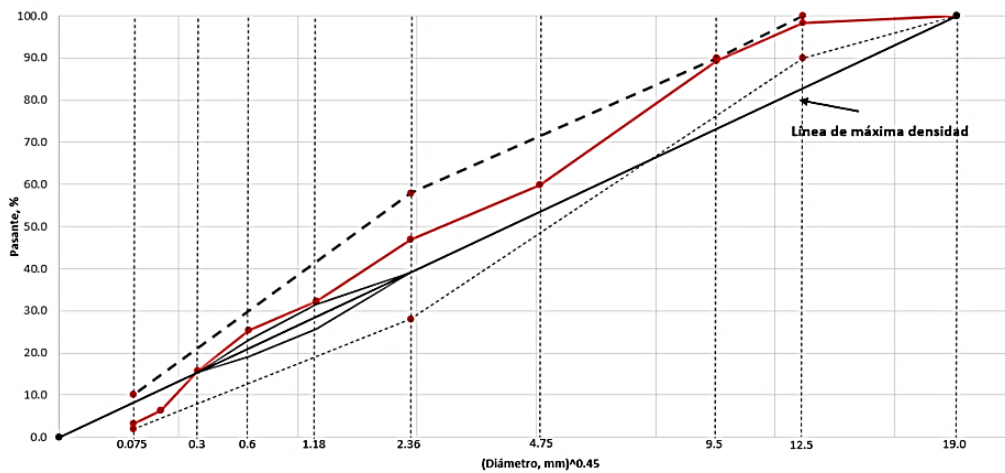
Granulometría de los agregados													
Tamiz	Abertura (mm)	Diámetro elevado a 0.45	Agregado 1	Agregado 2	Agregado 3	Agregado 4	Agregado 5	% Comb.	Huso Superpave		Zona de restricción		Línea de máx. Dens.
			Grava 3/4" Chancada	Grava 1/2" Chancada	Arena 3/8" Chancada	Arena 3/8" Natural	Filler - Cal		Que Pasa	MIN	MAX	MIN	
1"	25.400	4.290	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100					
3/4"	19.050	3.760	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100	100				100
1/2"	12.500	3.120	90.58	100.00	100.00	100.00	100.00	98.4	90	-	100		
3/8"	9.500	2.750	38.66	98.84	100.00	100.00	100.00	89.4			90		
N° 4	4.750	2.020	1.75	1.09	94.15	76.39	100.00	59.8					
N° 8	2.360	1.470	0.88	0.60	78.75	54.39	100.00		28	-	58	39.1	- 39.1
N° 10	2.000	1.366	0.80	0.55	71.09	42.99	100.00	40.6					
N° 16	1.180	1.080	0.63	0.47	59.84	30.00	100.00					25.6	- 31.6
N° 30	0.600	0.790	0.53	0.41	46.99	22.99	99.00					19.1	- 23.1
N° 40	0.420	0.677	0.49	0.40	39.22	19.00	99.00	21.3					
N° 50	0.300	0.580	0.46	0.39	27.18	14.93	95.93					15.5	- 15.5
N° 80	0.177	0.458	0.42	0.37	14.95	4.89	91.93	8.0					
N° 100	0.150	0.430	0.42	0.38	12.29	3.21	81.77	6.4					
N° 200	0.075	0.310	0.31	0.32	5.89	1.01	70.20	3.2	2	-	10		0
Dosificación			17%	14%	36%	32%	1%	100%					

Nota: Elaboración propia

En la Tabla 25, se tiene la granulometría propuesta Superpave mediante el porcentaje de agregado que pasa las diferentes mallas y la combinación de las mismas cumpliendo a los límites inferiores y superiores del huso Superpave. Se observa también que los datos obtenidos no están dentro de la zona de restricción y con presencia de finos en su estructura.

Figura 13

Gráfica fúller granulometría Superpave T.M.N. 12.5 mm.



Nota: Elaboración Propia

En la Figura 13, se muestra la granulometría Superpave la cual cumple los requerimientos establecidos según la gráfica fúller, presenta una curva granulométrica por encima de la línea de máxima densidad, evitando la intersección con la zona de restricción.

4.1.2. Resultados de la variable: mezcla asfáltica en caliente.

Se obtiene los resultados de la caracterización de los agregados gruesos y finos obtenidos mediante ensayos de caracterización en el laboratorio GEOMAT SERV E.I.R.L

Tabla 26

Resultados caracterización del agregado grueso

Ensayos	Norma	Requerimiento		Resultados obtenidos	Condición
		Altitud (msnm)			
		≤ 3000	>3000		
Durabilidad (al sulfato de magnesio)	MTC E 209	18% máx.	15% máx.	2.76%	Cumple
Abrasión los Ángeles	MTC E 207	40% máx.	35% máx.	21.12%	Cumple
Adherencia	MTC E 517	+95	+95	- 95	No cumple
Índice de durabilidad	MTC E 214	35% min.	35% min.	-	-
Partículas Chatas y alargadas	ASTM 4791	10% máx.	10% máx.	83.4%	Cumple
Caras fracturadas	MTC E 210	85/50	90/70	97.9/97.9	Cumple
Sales solubles totales	MTC E 219	0.5% máx.	0.5% máx.	0.041%	Cumple
Absorción *	MTC E 206	1.0% máx.	1.0% máx.	1.18%	No cumple

Nota: Elaboración propia.

Tabla 27*Resultados caracterización del agregado fino*

Ensayos	Norma	Requerimiento		Resultados obtenidos	Condición
		Altitud (msnm)			
		≤ 3000	>3000		
Equivalente de Arena	MTC E 114	60	70	67%	Cumple
Angularidad del agregado fino	MTC E 222	30	40	43.2%	Cumple
Azul de metileno	AASHTO TP 57	8 máx.	8 máx.	7.375	Cumple
Índice de plasticidad (malla N° 40)	MTC E 111	NP	NP	NP	Cumple
Durabilidad (al sulfato de magnesio)	MTC E 209	-	18 máx.	2%	Cumple
Índice de durabilidad	MTC E 214	35 mín.	35 mín.	-	-
Índice de plasticidad (malla N° 200)	MTC E 111	4 máx.	NP	4%	Cumple
Sales Solubles Totales	MTC E 219	0.5% máx.	0.5% máx.	0.060%	Cumple
Absorción**	MTC E 205	0.5% máx.	0.5% máx.	0.86%	No cumple

Fuente: Elaboración propia.

Luego de tener el material seleccionado según los husos granulométricos MAC-02 y Superpave se procede a determinar el óptimo contenido de asfalto para posteriormente determinar las características físicas y volumétricas de la mezcla mediante el ensayo Marshall en el Laboratorio HRUIZ-GEOPAV S.A.C. de la ciudad de Cusco.

4.1.2.1. Determinación del óptimo contenido de asfalto de la mezcla

La determinación de porcentajes del cemento asfáltico para cada una de las dosificaciones se obtiene realizando incrementos de 0.5% desde 5.5% hasta 7.0% considerando dentro de ellas el 6.3% como porcentaje óptimo tentativo, por consiguiente, los porcentajes de cemento asfáltico que utilizamos para la elaboración de las diferentes dosificaciones son: **5.5%; 6.0%; 6.3%; 6.5%; 7.0%**

En la preparación de la mezcla asfáltica, ya se contaba con las dosificaciones establecidas en las tablas 24 y 25, se realizaron las pastillas de asfalto, de acuerdo con lo contemplado en la norma MTC E504, la cual establece que la temperatura del mezclado se de en un rango de 120° C a 135°C para el cemento asfáltico que se utilizó.

Tabla 28*Dosificación para pastillas con peso aproximado de 1250gr*

% C.A.	% AG. (gr)	% ASF. (gr)	MAC-02				Superpave					
			% Pasa				Filler	% Pasa				
			G 3/4"	G 1/2"	ACH 3/8"	Filler		G 3/4"	G 1/2"	ACH 3/8"	AN 3/8"	Filler
30%	12%	57%	1%	17%	14%	36%	32%	1%				
5.5	1181.25	68.75	354.38	141.75	673.31	11.81	200.81	165.38	425.25	378.00	11.81	
6.0	1175.00	75.00	352.50	141.00	669.75	11.75	199.75	164.50	423.00	376.00	11.75	
6.3	1171.25	78.75	351.38	140.55	667.61	11.71	199.11	163.98	421.65	374.80	11.71	
6.5	1168.75	81.25	350.62	140.25	666.19	11.69	198.69	163.62	420.75	374.00	11.69	
7.0	1162.50	87.50	348.75	139.50	662.62	11.63	197.62	162.75	418.50	372.00	11.63	

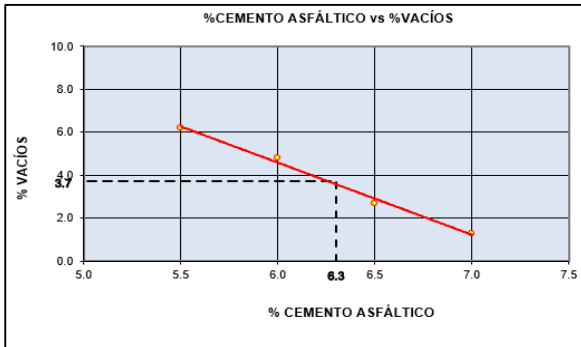
Nota: Elaboración propia

En la Tabla 28, se observa los porcentajes de dosificación de agregados de los husos granulométricos MAC-02 y Superpave para la elaboración de pastillas con un peso base de 1250 gr con el fin de ser ensayadas para la obtención de la estabilidad, flujo, relación estabilidad flujo y % vacíos en el agregado mineral por medio de la metodología Marshall.

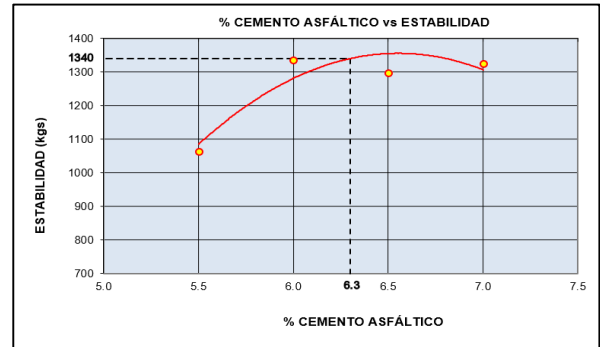
Para determinar el óptimo contenido de cemento asfáltico en el diseño de la mezcla, fue necesario analizar los gráficos de los datos obtenidos en laboratorio mediante el ensayo de las pastillas por la metodología Marshall, para lo cual se considera como punto de partida que el porcentaje de vacíos se encuentre en un rango de 3 a 5%, partiendo de un valor promedio de 3.8% y 4% para los husos granulométricos MAC-02 y Superpave respectivamente. Se obtuvo el porcentaje óptimo de asfalto que dio como resultado 6.3% en ambos casos. Este resultado fue empleado en las curvas de las demás gráficas para la determinación de los parámetros detallados en la Figura 14 y Figura 15.

Figura 14

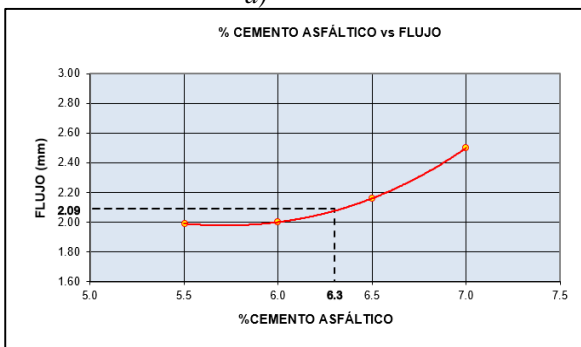
a), b), c), d), e) y f), Curvas Marshall para la granulometría MAC-02.



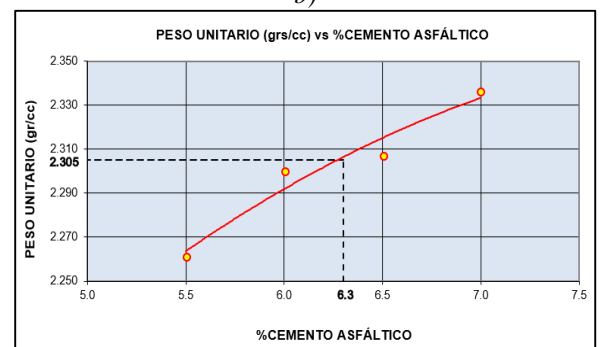
a)



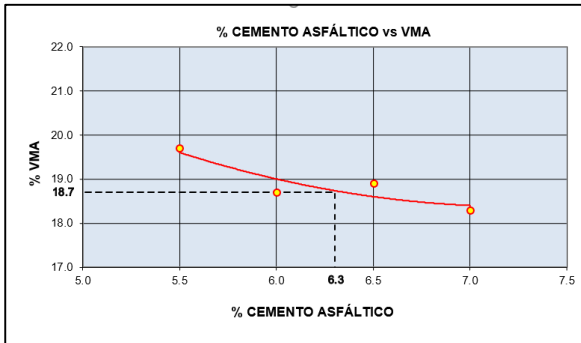
b)



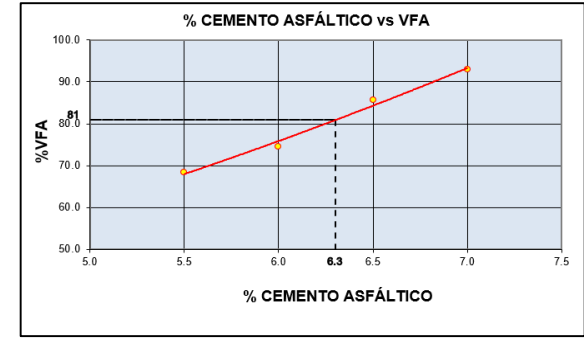
c)



d)



e)



f)

En la Figura 14, se muestran los gráficos del porcentaje de vacíos, estabilidad, flujo, peso unitario, vacíos en el agregado mineral (VMA) y vacíos llenos de asfalto (VFA) versus los porcentajes de asfalto propuestos, identificando el porcentaje óptimo de asfalto, se calcula gráficamente los valores para cada relación.

A continuación, se presenta un cuadro resumen de resultados para el porcentaje óptimo de cemento asfáltico empleado en el huso MAC-02 con la respectiva evaluación:

Tabla 29*Mezcla asfáltica propuesta – MAC-02 C.A. 6.3%.*

Parámetro de diseño	Valor obtenido	Especificación	Evaluación
Vacíos (%)	3.7	3 - 5	Aprobado
Estabilidad (kg)	1340	831 (Min.)	Aprobado
Flujo (mm)	2.10	2 - 4	Aprobado
Peso unitario (gr/cc)	2.305	-	-
V.M.A. (%)	18.7	14 (Min.)	Aprobado
V.F.A. (%)	81	-	-
Relación E/F (kg/cm)	6411.48	1700 - 4000	Desaprobado

Nota: Elaboración propia

En la Tabla 29, se observa que el valor optado para el porcentaje de vacíos fue 3.7%, con el cual se calculó el porcentaje óptimo de asfalto de 6.3%, y con este gráficamente los demás valores de los parámetros de diseño de la mezcla asfáltica en caliente. A continuación, para corroborar los valores obtenidos gráficamente de la Tabla 27 se presenta los resultados obtenidos para el porcentaje óptimo del cemento asfáltico de 6.3% empleando la metodología Marshall.

Tabla 30*Resultados ensayo mezcla asfáltica – MAC-02 C.A. 6.3%.*

Parámetro de diseño	Valor obtenido	Especificación	Evaluación
Vacíos (%)	3.8	3 - 5	Aprobado
Estabilidad (kg)	1421	831 (Min.)	Aprobado
Flujo (mm)	2.20	2 - 4	Aprobado
Peso unitario (gr/cc)	2.305	-	-
V.M.A. (%)	18.8	14 (Min.)	Aprobado
V.F.A. (%)	79.6	-	-
Relación E/F (kg/cm)	6567	1700 - 4000	Desaprobado

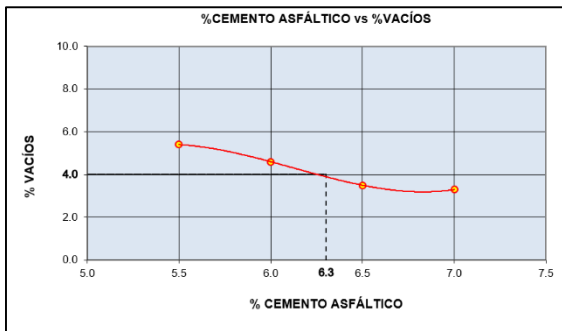
Nota: Elaboración propia

En la Tabla 30, contando con el porcentaje óptimo de asfalto de 6.3%, se procedió a analizar los resultados con los valores óptimos para la estabilidad, flujo, relación estabilidad/flujo y % vacíos en el agregado mineral.

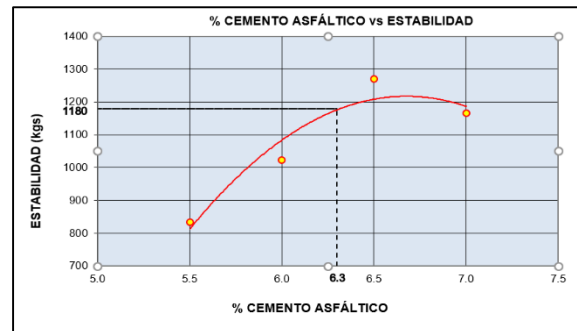
Evaluando el valor promedio del porcentaje de vacíos, se obtiene el óptimo contenido de asfalto que es 6.3%, con el para la granulometría Superpave, el cual se utiliza para la determinación de forma gráfica de los demás valores obtenidos en el ensayo Marshall.

Figura 15

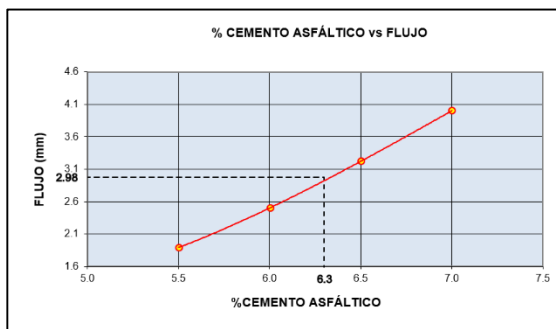
a), b), c), d), e) y f) Curvas Marshall para la granulometría Superpave



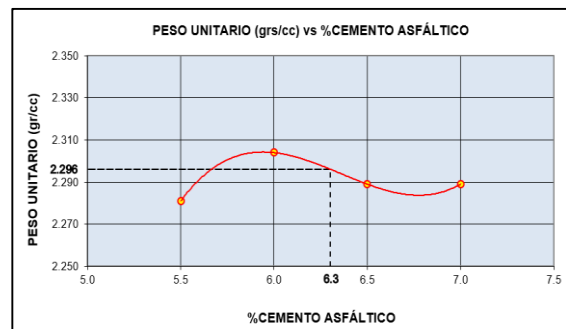
a)



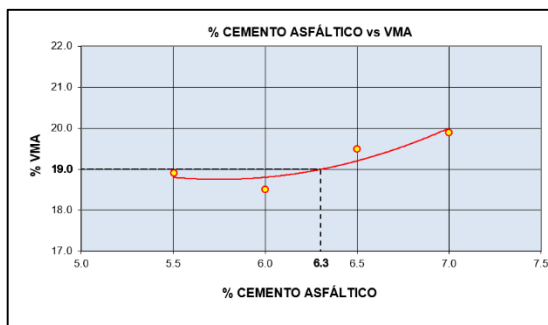
b)



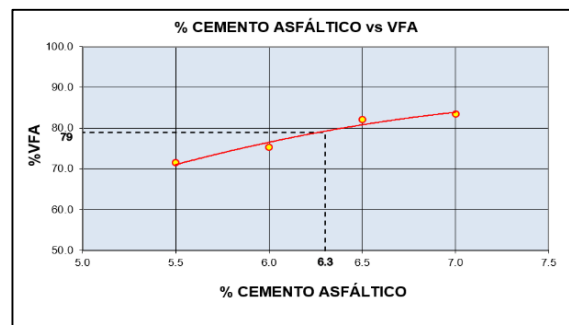
c)



d)



e)



f)

En la Figura 15, se muestran los gráficos del porcentaje de vacíos, estabilidad, flujo, peso unitario, vacíos en el agregado mineral (VMA) y vacíos llenos de asfalto (VFA) versus los porcentajes de asfalto propuestos para la granulometría Superpave, teniendo el porcentaje óptimo de asfalto.

A continuación, se presenta un cuadro resumen del porcentaje de cemento asfáltico propuesto con los valores obtenidos gráficamente versus valores de especificación para la respectiva evaluación.

Tabla 31

Mezcla asfáltica propuesta – Superpave C.A. 6.3%.

Parámetro de diseño	Valor obtenido	Especificación	Evaluación
Vacíos (%)	4.0	3 - 5	Aprobado
Estabilidad (kg)	1180	831 (Min.)	Aprobado
Flujo (mm)	2.98	2 - 4	Aprobado
Peso unitario (gr/cc)	2.296	-	-
V.M.A. (%)	19	14 (Min.)	Aprobado
V.F.A. (%)	79	-	-
Relación E/F (kg/cm)	3959.73	1700 - 4000	Aprobado

Nota: Elaboración propia

En la Tabla 31, se muestra la propuesta de la mezcla asfáltica – Superpave con contenido de asfalto de 6.3% donde los parámetros de diseño están dentro de las especificaciones respectivas, es evaluada de manera positiva dado que cumple todos los valores de las especificaciones.

Para tener una mayor confiabilidad en los datos obtenidos mediante las gráficas, se procedió a la comprobación por medio de la elaboración de 03 pastillas para el 6.3% de cemento asfáltico, dando los siguientes resultados:

Tabla 32

Resultados ensayo mezcla asfáltica – Superpave C.A. 6.3%.

Parámetro de diseño	Valor obtenido	Especificación	Evaluación
Vacíos (%)	4.0	3 - 5	Aprobado
Estabilidad (kg)	1053	831 (Min.)	Aprobado
Flujo (mm)	2.71	2 - 4	Aprobado
Peso unitario (gr/cc)	2.302	-	-
V.M.A. (%)	18.9	14 (Min.)	Aprobado
V.F.A. (%)	79	-	-
Relación E/F (kg/cm)	3886	1700 - 4000	Aprobado

Nota: Elaboración propia

En la Tabla 32, se muestra el resultado del ensayo de mezcla asfáltica Superpave con contenido de asfalto de 6.3% donde los parámetros de diseño están dentro de las especificaciones respectivas.

Luego de haber elaborado las briquetas y/o pastillas de mezcla asfáltica en caliente, se siguieron los ensayos en laboratorio que comprenden el ensayo Marshall, las cuales se resumen en los datos obtenidos de: Estabilidad, flujo, relación estabilidad/flujo y porcentaje de vacíos en el agregado mineral, obteniendo así los resultados a nivel de objetivos específicos.

4.1.3. Resultados de objetivo específico 1

En este aspecto tanto la granulometría de la combinación de agregados MAC-02 y la granulometría de la combinación de agregados Superpave superan el mínimo estipulado en las especificaciones técnicas de 8.15 kN ó 831 kg, no obstante, se observa valores superiores en la granulometría MAC-02. A continuación, se muestra las tablas con los promedios de valores obtenidos para cada porcentaje de asfalto para ambas granulometrías de la combinación de agregados.

Tabla 33

Promedios de estabilidad para distintos % de asfalto, MAC-02

Estabilidad – Granulometría MAC - 02					
Cem.Asf. (%)	5.5%	6.0%	6.5%	7.0%	6.3%
Estabilidad prom. (Kg)	1065	1337	1298	1325	1421
Estabilidad prom. (kN)	10.444	13.111	12.729	12.994	13.935

Nota: Elaboración propia

En la tabla 33 se observa los resultados en dos unidades (kN) y (Kg), donde para el valor óptimo de asfalto la estabilidad es superior a las demás.

Tabla 34*Promedios de estabilidad para distintos % de asfalto, Superpave*

Estabilidad – Granulometría Superpave					
Cem.Asf. (%)	5.5%	6.0%	6.5%	7.0%	6.3%
Estabilidad prom. (Kg)	833	1022	1270	1166	1053
Estabilidad prom. (kN)	8.169	10.022	12.454	11.435	10.326

Nota: Elaboración propia

En esta Tabla 34, se visualiza la variación de la estabilidad para los distintos porcentajes de asfalto en la mezcla asfáltica elaborada con la granulometría Superpave y llegado al punto máximo de porcentaje de asfalto (7.0%) la estabilidad comienza a descender en 11.435(kN).

4.1.4. Resultados de objetivo específico 2

Se observó que el flujo de la granulometría de combinación de agregados con el huso granulométrico MAC-02 para los distintos porcentajes de asfalto se encuentran cerca del margen inferior de las especificaciones EG-2013 siendo 2.20 mm el valor para el % óptimo de asfalto; sin embargo, la fluencia se encuentra dentro de los límites que indica las especificaciones técnicas. En la granulometría de la combinación de agregados Superpave, se tiene una fluencia dentro de los márgenes permisibles cercanos a la media entre los límites superiores e inferiores, donde, para el porcentaje óptimo de asfalto el valor del flujo es 0.271 mm siendo los márgenes de la norma 2.0 mm y 4.0 mm inferior y superior, respectivamente.

Tabla 35*Promedios de fluencia para distintos % de asfalto, MAC-02*

Flujo – Granulometría MAC - 02					
Cem.Asf. (%)	5.5%	6.0%	6.5%	7.0%	6.3%
Fluencia prom. (0.01")	7.83	8	8.5	9.83	8.67
Fluencia prom. (mm)	1.99	2.00	2.16	2.5	2.20
Fluencia prom. (cm)	0.199	0.200	0.216	0.250	0.220

Nota. Elaboración propia

La Tabla 35, describe la variación del flujo para los distintos porcentajes de asfalto en la mezcla asfáltica elaborada con la granulometría MAC-02, teniendo valores más cercanos al margen inferior de las especificaciones técnicas EG-2013 del MTC.

Tabla 36

Promedios de fluencia para distintos % de asfalto, Superpave

Flujo – Granulometría Superpave					
Cem.Asf. (%)	5.5%	6.0%	6.5%	7.0%	6.3%
Fluencia prom. (0.01")	7.43	9.67	12.67	15.67	10.67
Fluencia prom. (mm)	1.89	2.5	3.22	4.00	2.71
Fluencia prom. (cm)	0.189	0.250	0.322	0.400	0.271

Nota. Elaboración propia

En la Tabla 36, se observa la variación del flujo para los distintos porcentajes de asfalto en la mezcla asfáltica elaborada con la granulometría Superpave, donde se observa un crecimiento constante de la fluencia a razón del aumento del porcentaje del cemento asfáltico.

4.1.5. Resultados de objetivo específico 3

El valor de la relación estabilidad/flujo para la granulometría MAC-02 excede al límite máximo propuesto por la norma EG-2013 en todas las mezclas elaboradas con los distintos porcentajes de asfalto siendo elevada su estabilidad y baja su fluencia. El valor de la relación estabilidad – flujo con la granulometría Superpave se encuentra dentro de los márgenes permisibles que son 1700 – 4000 kg/cm según las especificaciones técnicas para concreto asfáltico en caliente del MTC EG-2013.

Tabla 37

Promedios de estabilidad/fluencia % de asfalto, MAC-02

Relación estabilidad/fluencia – granulometría MAC - 02					
Cem.Asf. (%)	5.5%	6.0%	6.5%	7.0%	6.3%
Rel. Est./Flu prom. (kg/cm)	5419	6673	6157	5325	6567

Nota: Elaboración propia

La Tabla 37 presenta valores de la relación de estabilidad/flujo fuera de los límites permisibles propuestos por la EG-2013 del MTC, siendo el valor para el porcentaje óptimo de asfalto 6567 kg/cm un valor que excede al límite superior.

Tabla 38

Promedios de estabilidad/fluencia % de asfalto, Superpave

Relación estabilidad/fluencia – granulometría Superpave					
Cem.Asf. (%)	5.5%	6.0%	6.5%	7.0%	6.3%
Rel. Est./Flu prom. (kg/cm)	4422	4173	3948	2935	3886

Nota: Elaboración propia

En la Tabla 38, se aprecia que los valores de la relación estabilidad/flujo disminuyen a medida que se adiciona un mayor porcentaje de asfalto, excepto en el % óptimo de asfalto (3886 kg/cm) la cual, se encuentra en los márgenes permisibles de la norma EG-2013 cercano al límite superior establecido.

4.1.6. Resultados de objetivo específico 4

En la granulometría de la combinación de agregados MAC-02, se observa en la Figura 14 una curva con pendiente negativa conforme al incremento del porcentaje de asfalto. En la granulometría de la combinación de agregados Superpave, se observa en la Figura 15 un comportamiento típico del V.M.A que disminuye hasta llegar a un valor mínimo y luego incrementarse con el aumento del porcentaje de asfalto, ambas granulometrías cumplen las especificaciones técnicas EG-2013 superando el valor mínimo del porcentaje que es 14% para el tamaño de las partículas empleadas que es 19.0 mm (3/4”). A continuación, se presentan los promedios de valores V.M.A obtenidos por contenido de asfalto de cada granulometría.

Tabla 39*Promedios de porcentajes de V.M.A de asfalto, granulometría MAC-02*

Porcentaje de vacíos en el agregado mineral – granulometría MAC - 02					
Cem.Asf. (%)	5.5%	6.0%	6.5%	7.0%	6.3%
V.M.A. (%)	19.70	18.70	18.90	18.30	18.80

Nota: Elaboración propia

En la Tabla 39, se aprecia que los valores de V.M.A. para la mezcla asfáltica elaborada con la granulometría MAC-02 superan el porcentaje de V.M.A 14% propuesto por la EG-2013 y a su vez estos resultados van decreciendo a razón del incremento del porcentaje de cemento asfáltico.

Tabla 40*Promedios de porcentajes de V.M.A de asfalto, granulometría Superpave*

Porcentaje de vacíos en el agregado mineral – granulometría Superpave					
Cem.Asf. (%)	5.5%	6.0%	6.5%	7.0%	6.3%
V.M.A. (%)	18.90	18.50	19.50	19.90	18.90

Nota: Elaboración propia

La Tabla 40 detalla que todos los valores de vacíos en el agregado mineral para la granulometría Superpave, cumplen con las especificaciones de la norma EG-2013 que propone como porcentaje mínimo de 14% de vacíos en el agregado mineral. Para el porcentaje óptimo de cemento asfáltico 6.3%, se visualiza que el V.M.A. tiene un porcentaje de 18.90.

4.2. Discusión de resultados

De acuerdo al objetivo general de la investigación, los resultados obtenidos mediante los ensayos realizados para la elaboración de mezclas asfálticas con las dos propuestas granulométricas, se pudo observar que la mezcla asfáltica aplicando el huso granulométrico Superpave cumple con los requerimientos de estabilidad, flujo, relación estabilidad/flujo y % de vacíos en el agregado mineral. Por otro lado, la mezcla asfáltica aplicando el huso

granulométrico MAC-02 presenta valores altos de estabilidad y valores cercanos al mínimo en flujo. De todo el análisis, se concluye una influencia positiva con el empleo de la granulometría Superpave teniendo valores permisibles de acuerdo al EG-2013 del MTC; por el otro lado, se observa una influencia negativa de la granulometría MAC-02 al momento de ser empleada en la elaboración de la mezcla asfáltica.

De acuerdo al objetivo específico 01 en la investigación, se observa en el resultado obtenido mediante el ensayo Marshall para la mezcla asfáltica con 6.3% de asfalto óptimo y granulometría MAC-02 el valor de estabilidad de 1421 kg, superando el valor mínimo establecido en la especificación (831 kg) en un 71%, en la mezcla asfáltica empleando la granulometría Superpave con 6.3% de asfalto óptimo se tiene un valor de estabilidad de 1053 kg comparado con el valor mínimo de las especificaciones EG-2013, este excede en un 26% el cual es un valor aceptable. Finalmente, el valor de la estabilidad de la mezcla asfáltica Superpave en comparación con la mezcla asfáltica MAC-02 decrece, lo cual representa una menor susceptibilidad al agrietamiento por fatiga.

De acuerdo al objetivo específico 02 en la investigación, se tiene para la mezcla asfáltica elaborada con la granulometría MAC-02 un valor de flujo de 2.20 mm (0.22 cm) para el porcentaje óptimo de asfalto, el cual se encuentra próximo al límite inferior de las especificaciones técnicas EG-2013 del MTC; por otro lado, en la mezcla asfáltica de la granulometría Superpave, se observa un valor de flujo de 2.71 mm (0.271 cm) el cual se encuentra próximo al valor medio entre los límites inferiores y superiores estipulados por la EG-2013, para finalizar el valor del flujo de la mezcla asfáltica Superpave en comparación con el flujo de la mezcla asfáltica MAC-02 se incrementa lo cual representa una fricción interna baja entre los agregados controlada no volviéndola propensa al ahuellamiento.

De acuerdo al objetivo específico 03 en la investigación, se cuenta con un valor elevado de la relación estabilidad/flujo para la mezcla asfáltica MAC-02, el cual excede al límite

superior propuesto por la EG-2013 debido al alto valor de estabilidad y bajo valor de flujo que presenta, en cuanto a la Mezcla asfáltica Superpave, se encuentra dentro de los límites propuestos por la EG-2013 dado que presenta valores de estabilidad y flujo no muy elevados ni cercanos a los límites, finalmente, el valor de la relación estabilidad/flujo de la mezcla asfáltica Superpave en comparación con la mezcla asfáltica MAC-02 se encuentra dentro de los límites establecidos en la norma EG-2013, siendo esta una mezcla más estable y menos propensa a deformaciones.

De acuerdo al objetivo Especifico 04 en la investigación, para el valor de % de vacíos en el agregado mineral, la mezcla asfáltica producida por la granulometría MAC-02, se observa que supera al límite inferior propuesto por la EG-2013 el cual estipula que para un tamaño máximo de agregado de 3/4” en la metodología Marshall el valor del límite inferior es 14% de vacíos del agregado mineral, por otro lado, para la mezcla asfáltica producida por la granulometría Superpave, se observan igualmente valores por encima del límite inferior, finalmente ambas mezclas asfálticas presentan un decrecimiento hasta un valor mínimo de porcentaje de V.M.A. que posteriormente se incrementa con el aumento del contenido de asfalto.

Aguilar y Valer (2021), en su investigación indicaron que ensayos realizados en laboratorio al agregado grueso (piedra chancada de Morro Blanco-San Salvador-Písac) cumplen con los requerimientos indicados en el Manual de carreteras “Especificaciones técnicas generales de construcción EG-2013”, por lo que concluyeron que es indispensable el cumplimiento de estos requerimientos para garantizar el óptimo diseño de mezcla asfáltica en caliente mediante la metodología Marshall.

En comparación a los resultados anteriores, los resultados obtenidos están dentro del rango de ideas similares, ya que la caracterización de los agregados de la cantera El Pedregal mediante los husos granulométricos Superpave y MAC-02 cumplieron todos los

requerimientos lo que garantizo el buen desempeño de los agregados en las mezclas asfálticas en caliente.

De acuerdo a la idea de Aguilar y Valer (2021) es importante el cumplimiento de los requerimientos de las normas existentes en la caracterización de los agregados puesto que estas garantizan el buen desempeño en mezclas asfálticas.

Fernández (2018), en su investigación indican que la metodología Superpave recomienda que la mezcla deba tener un porcentaje de un 4 por ciento de vacíos de aire para poseer un buen comportamiento estructural en terreno.

Como se demostró al realizar el diseño de mezcla asfálticas en caliente con el huso granulométrico Superpave el valor obtenido de los vacíos de aire es 3.8%, en concordancia a la idea de Fernández (2018) que para tener un buen comportamiento estructural se debe garantizar un porcentaje de vacíos de un 4%, lo que se asemeja a nuestros resultados obtenidos.

Pinchi (2017) en su investigación mostró importancia de los agregados en el proceso de diseño de las mezclas asfálticas en caliente, para su aplicación en pavimentos flexibles, donde con estos resultados determinaron los principales parámetros que se requieren para efectuar el diseño de un pavimento asfáltico, que para el caso se trata del espesor de un pavimento flexible en caliente.

Como se demostró al realizar los ensayos de granulometría del agregado de la cantera el Pedregal cumplió con los requerimientos de granulometría EG-2013, así como lo demostró Pinchi (2017) que se tiene que tener un control adecuado de los agregados para así garantizar el óptimo diseño de mezcla en caliente y mejorar el espesor del pavimento flexible.

Rojas (2017), en su investigación determinó una valiosa contribución en el avance hacia la determinación cada vez más cuantitativa de rasgos micro y macro estructurales de agregados

y concretos asfálticos, considerados nocivos para su buen funcionamiento durante su vida útil en una obra vial, así determinaron la importancia de la limpieza de los agregados al ser usados en mezclas asfálticas en caliente ya que en función de estas se garantizará un buen desempeño del concreto asfáltico.

En comparación a los resultados anteriores, los resultados obtenidos están dentro del rango de ideas similares, ya que la caracterización de los agregados de la cantera El Pedregal mediante los husos granulométricos Superpave y MAC-02 cumplieron todas las solicitudes requeridas lo que se reflejó en el buen desempeño de los agregados en las mezclas asfálticas en caliente.

Chiquito y Torres (2015), en su investigación llegaron a la conclusión que los agregados de la cantera San Vicente de Colonche y Cantera de rio San Rafael están en un rango de aceptabilidad lograron establecer las proporciones de una gradación densa para mezclas asfálticas en caliente, que son 45% de agregado grueso, 35% de arena triturada y 20% de arena de río, con un porcentaje óptimo de cemento asfáltico de 6,6%.

En comparación a los resultados anteriores, los resultados determinaron las proporciones para mezclas asfálticas en caliente, que son 30% de agregado grueso 3/4", 12% de agregado grueso 1/2", 57 % de arena triturada 3/8" y 1% filler para la granulometría MAC-02 y 17% de agregado grueso 3/4", 14% de agregado grueso 1/2", 36 % de de arena triturada 3/8", 32% de arena natural 3/8" y 1% filler. Con un porcentaje óptimo de cemento asfáltico de 6.3%, en concordancia con la idea de Chiquito y Torres (2015) los resultados obtenidos están dentro del rango establecido para garantizar un óptimo diseño de mezcla asfálticas en caliente.

Boza y Sinchi (2015), en su investigación observaron que el módulo dinámico no cumplió con lo establecido, puesto que la granulometría EG-2013 es de alta rigidez y la

granulometría Superpave es de baja rigidez, en cuanto a las propiedades volumétricas ambas cumplen con las solicitudes requeridas; sin embargo, determinaron que la granulometría Superpave tiene mejores características respecto a la granulometría EG-2013.

Como se demostró, al realizar los ensayos y estudios del diseño de mezcla asfáltica en caliente mediante la metodología Marshall, el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (V.M.A.) producida con granulometría Superpave no presentó cambios significativos frente a la producida con granulometría MAC-02 en vista que los datos empleados en ambos casos presentan valores similares, pero si mejoró las propiedades de estabilidad/flujo por lo que se recomienda, ya que la granulometría Superpave presenta mejores condiciones en el diseño de mezclas en caliente con respecto a la granulometría MAC-02.

De acuerdo con la idea de Boza y Sinchi (2015), que la granulometría Superpave tiene mejores características respecto a la granulometría EG-2013 ya que en general presentó mejores resultados que serán beneficiosos en el diseño de mezclas asfálticas en caliente.

De la Cruz y Porras (2015), en su investigación concluyó que el método Marshall mostró buen performance en condiciones extremas, por cuanto se obtuvo en el umbral de aprobación.

Como demostró, al realizar los ensayos y estudios del diseño de mezcla asfáltica en caliente mediante la metodología Marshall, se observa que es fácilmente variable en cuanto a la granulometría, es decir, se puede variar los husos establecidos por la misma sin afectar a la misma metodología o alguno de sus procesos.

Terán y Morales (2015), en su investigación llegaron a la conclusión que los materiales de la mina Cashapamba son aptos para su uso en el diseño y producción de mezclas asfálticas en caliente, debido que cumple con la abrasión, índice de plasticidad, desgaste por sulfatos,

porcentaje de caras fracturadas y achatadas, equivalente de arena ya que son materiales bien escogidos y limpios.

Como se puede ver, los resultados obtenidos son consistentes con los que se encuentran en estudios previos, compartiendo ideas similares, ya que se recomienda que la granulometría de los agregados se debe realizar con el cuidado respectivo y garantizar que cumpla con los requerimientos de la norma, así como lo demostró Terán y Morales (2015), que en términos de desempeño de las mezclas asfálticas en caliente recomienda una buena gradación de los agregados.

Según Ramírez (2015), en su investigación determinaron que los agregados gruesos de la cantera San Martín presentan características físicas angulares y/o alargadas teniendo una resistencia al desgaste de 18.06% siendo su máxima resistencia de 40% cumpliendo lo establecido en las especificaciones del MTC, asimismo, el comportamiento de estabilidad de la mezcla asfáltica en caliente tuvo un valor de 11.82 KN teniendo un incremento de 47.6% de lo normado.

En comparación a los resultados anteriores, los resultados obtenidos según la caracterización de los agregados gruesos de la cantera El Pedregal tiene una resistencia al desgaste de 21.12%, asimismo, el comportamiento de la estabilidad de la mezcla asfáltica 10.33 KN cumpliendo todas las solicitudes del diseño de mezclas asfáltica mediante la metodología Marshall, así como lo demostró Ramírez (2015), que en términos de cumplimiento de la norma la características de su agregado y mezclas asfálticas cumplen satisfactoriamente.

Según Ñahui y Sedano (2018), en su investigación determinaron calidad de los agregados de la cantera de Ocopa para la elaboración de la mezcla asfáltica donde llegaron a la conclusión de que la curva granulométrica del agregado fino y grueso de la cantera de Ocopa son óptimas para la elaboración de mezclas asfálticas, donde indicaron que en la

utilización de agregados en mezclas asfálticas se debe garantizar que cumplan los requerimientos establecidos y así se asegurara la calidad de la mezcla asfáltica.

En comparación con los resultados anteriores, los resultados obtenidos están dentro del rango de ideas similares, ya que la caracterización de los agregados de la cantera El Pedregal mediante los husos granulométricos Superpave y MAC-02 cumplieron todas las solicitudes requeridas de caracterización lo que garantizó el buen desempeño de los agregados en las mezclas asfálticas en caliente.

De acuerdo con la idea de Ñahui y Sedano (2018), es importante el cumplimiento de los requerimientos de las normas existentes en la caracterización de los agregados puesto que estas garantizan el buen desempeño en mezclas asfálticas.

Ibérico (2019), en su investigación donde determinó la influencia que tiene la granulometría en el desempeño de las mezclas asfálticas en caliente, se concluyó que utilizando husos granulométricos que atraviesan la zona restrictiva de la metodología Superpave, se tuvo buenos resultados en el desempeño de las mezclas asfálticas en caliente en comparación a la metodología Marshall.

Como se puede ver, los resultados obtenidos son consistentes con los que se encuentran en estudios previos, compartiendo ideas similares, ya que se recomienda que la granulometría Superpave presenta mejores condiciones en el diseño de mezclas en caliente con respecto a la granulometría MAC-02, así como lo demostró Ibérico (2019), que en términos de desempeño de las mezclas asfálticas en caliente recomienda la metodología Superpave frente a la metodología Marshall.

Rangel (2015), en su investigación donde analizaron la calidad de los agregados para la elaboración de la mezcla asfáltica, donde determinaron que el análisis granulométrico del agregado grueso es una grava mal gradada porque contenía menos de 15% de arena basado

en la norma ASTM D-2487 y del agregado fino es una arena mal gradada porque contienen menor al 15% de grava basado en el ASTM D-248, por los que determinaron que se tenía que limpiar los agregados y eliminar las impurezas para garantizar su buen desempeño en la mezcla asfáltica para pavimentos flexibles.

Como demostró los resultados obtenidos de la caracterización de los agregados mediante los husos granulométricos Superpave y MAC-02 cumplieron todas las solicitudes requeridas lo que garantizó el buen desempeño de los agregados en las mezclas asfálticas en caliente, así como demostró Rangel (2015), que se tenía que limpiar los agregados y eliminar las impurezas para garantizar el cumplimiento de los requerimientos y su buen desempeño en la mezcla asfáltica para pavimentos flexibles.

4.3. Prueba de hipótesis

Para la demostración de la hipótesis se empleó la distribución T de Student dado que el número de muestras son menores a 30, se plantea una hipótesis nula y una alternativa, para proyectos de investigación el nivel de significancia (α) es 0.05, la distribución T de Student se calculó por la siguiente fórmula:

$$tc = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{s^2p * (\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2})}}; s^2p = \frac{(n_1 - 1)s^2_1 + (n_2 - 1)s^2_2}{(n_1 - 1) + (n_2 - 1)}; G.L. = n_1 + n_2 - 2 \quad (EC- 11)$$

Donde:

tc : estadística de la prueba.

n_1, n_2 : tamaño de las muestras.

s^2p : varianza ponderada.

G.L.: grados de libertad.

s^2_1, s^2_2 : varianza muestral.

\bar{x}_1, \bar{x}_2 : media de las muestras.

$t \frac{\alpha}{2}$: valor crítico (obtenido de la tabla).

α : nivel de significancia.

Se utilizará el contraste bilateral (dos colas) donde se observa que el contraste donde las medias son iguales, equivale al contraste de que la diferencia entre medias es igual a cero.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 \quad ((\mu_1 - \mu_2 = 0)) \quad (EC- 12)$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \quad (\mu_1 - \mu_2 \neq 0) \quad (EC- 13)$$

Donde:

H_0 : hipótesis nula.

H_1 : hipótesis alternativa.

con las siguientes condiciones:

- Si $|t_c| > t \frac{\alpha}{2}$; $n_1 + n_2 - 2$, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa.
- Si el cero no se encuentra en el interior del intervalo de confianza, se concluye que $\mu_1 \neq \mu_2$ ($\mu_1 - \mu_2 \neq 0$)

La fórmula para determinar el intervalo de confianza viene dada por:

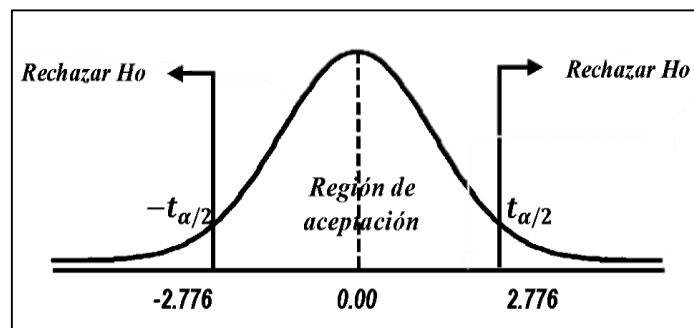
$$IC = (\bar{x}_1 - \bar{x}_2 \pm t \frac{\alpha}{2} * \sqrt{s^2 p * (\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2})}) \quad (EC- 14)$$

Tabla 41*Determinación del nivel de significancia según T Student*

n-1	α	0.25	0.20	0.15	0.1	0.05	0.025
1		1.0000	1.3764	1.9626	3.0777	6.3138	12.7062
2		0.8165	1.0607	1.3862	1.8856	2.9200	4.3027
3		0.7649	0.9785	1.2498	1.6377	2.3534	3.1824
4		0.7407	0.9410	1.1896	1.5332	2.1318	2.7764
5		0.7267	0.9195	1.1558	1.4759	2.0150	2.5706
6		0.7176	0.9057	1.1342	1.4398	1.9432	2.4469
7		0.7111	0.8960	1.1192	1.4149	1.8946	2.3646
8		0.7064	0.8889	1.1081	1.3968	1.8595	2.3060
9		0.7027	0.8834	1.0997	1.3830	1.8331	2.2622
10		0.6998	0.8791	1.0931	1.3722	1.8125	2.2281

Nota: Elaboración propia

Para la determinación de los valores del nivel de significancia se utilizará la tabla con los valores de las restricciones para cada caso en particular

Figura 16*Esquema típico al 95% del nivel de significancia**Nota:* Elaboración propia

En la Figura 16 se muestra el esquema típico del nivel de significancia al 95% y 4 grados de libertad.

Para la contrastación estadística de la hipótesis, se utilizó la distribución T de Student con contraste bilateral, comparando un diseño de mezcla asfáltica mediante la metodología Marshall empleando el huso granulométrico MAC-02 en comparación con el huso

granulométrico Superpave. Los valores que se contrastarán serán estabilidad, flujo, relación de estabilidad – flujo y % de vacíos en el agregado mineral.

4.3.1. *Contrastación de hipótesis específica 1*

La estabilidad para el óptimo contenido de asfalto de la mezcla diseñada con la metodología Marshall empleando la granulometría Superpave está compuesta por 03 valores obtenidos de ensayo de 03 probetas, los cuales son: 1095, 995 y 1067 kg respectivamente, de la misma forma la estabilidad que presenta la granulometría MAC-02 que cuenta con 03 resultados producto del ensayo de probetas que son: 1296, 1491 y 1475 kg respectivamente, se observa superior a los resultados obtenidos con la granulometría Superpave, en cuanto al cumplimiento de las especificaciones técnicas EG-2013 del MTC que determina como valor mínimo 831kg, ambas cumplen.

Se formulan dos hipótesis para el análisis T de Student:

H_0 : La granulometría Superpave en comparación con la granulometría MAC-02 de los agregados de la cantera El Pedregal no influye en la estabilidad de las mezclas asfálticas en caliente.

H_1 : La granulometría Superpave en comparación con la granulometría MAC-02 de los agregados de la cantera El Pedregal influye en la estabilidad de las mezclas asfálticas en caliente.

Tabla 42

T Student para valores de estabilidad MAC-02 y estabilidad Superpave

N° Muestra	T Student - Estabilidad			
	MAC-02	Superpave	$(x_i - \bar{x})^2$	$(y_i - \bar{y})^2$
1	1296	1095	15541.78	1820.44
2	1491	995	4946.78	3287.11
3	1475	1067	2952.11	215.11

Contraste bilateral (dos colas): $H_0: \mu_1 = \mu_2$, $H_1: \mu_1 \neq \mu_2$

Condición: si $|t_c| > \text{valor crítico}$, se rechaza H_0 y se acepta H_1

Nota: Elaboración propia

En la Tabla 42, se visualiza los números de muestra obtenidas para ambos husos granulométricos (MAC-02 y Superpave), donde también se aprecia el cálculo de las medias muestrales elevadas al cuadrado.

Se procede a realizar el cálculo de los factores necesarios para el contraste de la prueba:

Tabla 43

T Student para valores de estabilidad MAC-02 y estabilidad Superpave

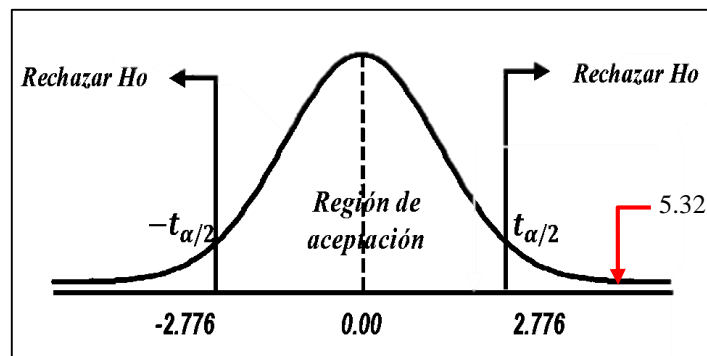
Tamaño de la muestra 1	n_1	3	Tamaño de la muestra 2	n_2	3
Media muestral convencional	\bar{x}_1	1420.67	Media muestral convencional	\bar{x}_2	1052.33
Varianza muestral convencional	s^2_1	11720.33	Varianza muestral convencional	s^2_2	2661.33
Varianza ponderada	s^2_p	7190.83			
Estadístico de prueba	tc	5.32			
Grados de libertad	G.L.	4			
Nivel de significancia 95%	α	0.05			
Valor crítico de la tabla 2 colas	$t_{\frac{\alpha}{2}}$	2.776			

Nota: Elaboración propia

En la Tabla 43 se concluye con que el estadístico de la prueba $|tc| = 5.32$ es mayor a el valor crítico de la tabla a 2 colas $t_{\frac{\alpha}{2}} = 2.776$, por lo tanto, se no se acepta H_0 , lo cual significa que existen una influencia significativa entre las dos medias al nivel de confianza del 95%.

Figura 17

Esquema típico valores de estabilidad



Nota: Elaboración propia

En la Figura 17 se observa la ubicación del estadístico de prueba en el esquema típico al 95% del nivel de significancia para los valores de estabilidad.

Considerando la ecuación *EC-14*, determinamos un intervalo de confianza por ser un contraste bilateral y viendo la pertenencia del 0 en su interior se tiene:

$$IC = (176.129, 560.538)$$

Como el 0 no se encuentra dentro del intervalo de confianza, se concluye que con un 95% de nivel de significancia que $\mu_1 \neq \mu_2$ por lo tanto se acepta la hipótesis alternativa H_1 .

4.3.2. Contrastación de hipótesis específica 2

La fluencia para el óptimo contenido de asfalto de la mezcla diseñada con la metodología Marshall empleando la granulometría Superpave está compuesta por 03 valores obtenidos de ensayo de 03 probetas, los cuales son: 11, 10 y 11 centésimas de pulgada (0.01”) respectivamente, de la misma forma la fluencia que presenta la granulometría MAC-02 cuenta con 03 resultados producto del ensayo de probetas que son: 10, 8 y 8 centésimas de pulgada (0.01”), respectivamente, se observa inferior a los resultados obtenidos con la granulometría Superpave, en cuanto al cumplimiento de las especificaciones técnicas EG-2013 del MTC que determina como valor mínimo 8 (0.01”) y máximo 14 (0.01”), ambas cumplen con una observación, que la mezcla asfáltica con la granulometría MAC-02 posee valores iguales al valor mínimo de las especificaciones.

Se formulan dos hipótesis para el análisis T de Student:

H_0 : La granulometría Superpave en comparación con la granulometría MAC-02 de los agregados de la cantera El Pedregal no influye en el flujo de las mezclas asfálticas en caliente.

H_1 : La granulometría Superpave en comparación con la granulometría MAC-02 de los agregados de la cantera El Pedregal influye en el flujo de las mezclas asfálticas en caliente

Tabla 44*T Student para valores de fluencia MAC-02 y fluencia Superpave*

T Student - Fluencia				
N° Muestra	MAC-02	Superpave	$(x_i - \bar{x})^2$	$(y_i - \bar{y})^2$
1	10	11	1.778	0.111
2	8	10	0.444	0.444
3	8	11	0.444	0.111

Contraste bilateral (dos colas): $H_0: \mu_1 = \mu_2, H_1: \mu_1 \neq \mu_2$
Condición: si $|t_c| > \text{valor crítico}$, se rechaza H_0 y se acepta H_1

Nota: Elaboración propia

En la Tabla 44, se visualiza las muestras obtenidas de los valores de flujo o fluencia de mezcla asfáltica para ambos husos granulométricos (MAC-02 y Superpave), también se aprecia el cálculo de las medias muestrales elevadas al cuadrado. Se procede a realizar el cálculo de los factores necesarios para el contraste de la prueba:

Tabla 45*T Student para valores de fluencia MAC-02 y fluencia Superpave*

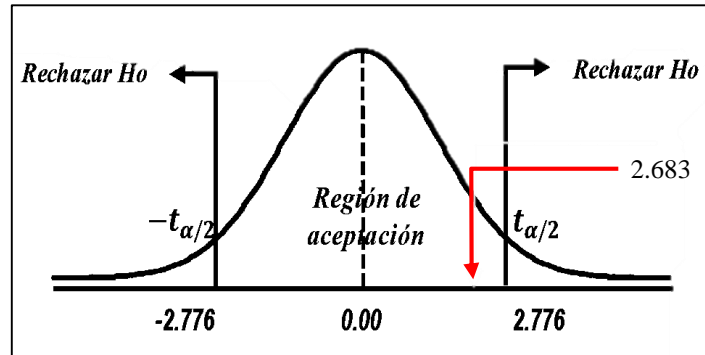
Tamaño de la muestra 1	n_1	3	Tamaño de la muestra 2	n_2	3
Media muestral convencional	\bar{x}_1	8.667	Media muestral convencional	\bar{x}_2	10.667
Varianza muestral convencional	s^2_1	1.333	Varianza muestral convencional	s^2_2	0.333
Varianza ponderada	s^2_p	0.833			
Estadístico de prueba	tc	-2.683			
Grados de libertad	G.L.	4			
Nivel de significancia 95%	α	0.05			
Valor crítico de la tabla 2 colas	$t \frac{\alpha}{2}$	2.776			

Nota: Elaboración propia

En la Tabla 45, se concluye con que el estadístico de la prueba $|tc| = 2.683$ es menor al valor crítico de la tabla a 2 colas $t \frac{\alpha}{2} = 2.776$, por lo tanto, se acepta H_0 , lo cual significa que no existen diferencias significativas entre las dos medias al nivel de confianza del 95%.

Figura 18

Esquema típico valores de fluencia



Nota: Elaboración propia

En la Figura 18, se observa la ubicación del estadístico de prueba en el esquema típico al 95% del nivel de significancia para los valores de flujo.

Considerando la ecuación *EC-14*, determinamos un intervalo de confianza por ser un contraste bilateral y viendo la pertenencia del 0 en su interior se tiene:

$$IC = (0.069, -4.069)$$

Como el 0 se encuentra dentro del intervalo de confianza, se concluye que con un 95% de nivel de significancia que $\mu_1 = \mu_2$ por lo tanto no se acepta la hipótesis alternativa H_1 .

4.3.3. Contratación de hipótesis específica 3

La relación estabilidad - flujo para el óptimo contenido de asfalto de la mezcla diseñada con la metodología Marshall empleando la granulometría Superpave está compuesta por 03 valores obtenidos de ensayo de 03 probetas, los cuales son: 3921, 3918 y 3820 kg/cm respectivamente, de la misma forma la relación estabilidad/flujo que presenta la granulometría MAC-02 cuenta con 03 resultados producto del ensayo de probetas que son: 5101, 7339 y 7260 kg/cm respectivamente, se observa superior a los resultados obtenidos con la granulometría Superpave, en cuanto al cumplimiento de las especificaciones técnicas EG-2013 del MTC que

determina como valor mínimo 1700 kg/cm y máximo 4000kg/cm, se observa que los 03 valores obtenidos con la granulometría MAC-02 no cumplen las especificaciones y los valores obtenidos con la granulometría Superpave si cumplen.

Se formulan dos hipótesis para el análisis T de Student:

H_0 : La granulometría Superpave en comparación con la granulometría MAC-02 de los agregados de la cantera El Pedregal no influye en la relación estabilidad/flujo de las mezclas asfálticas en caliente.

H_1 : La granulometría Superpave en comparación con la granulometría MAC-02 de los agregados de la cantera El Pedregal influye en la relación estabilidad/flujo de las mezclas asfálticas en caliente.

Tabla 46

T Student para estabilidad - flujo MAC-02 y estabilidad - flujo Superpave

T Student – Relación Estabilidad - Flujo				
Nº Muestra	MAC-02	Superpave	$(x_i - \bar{x})^2$	$(y_i - \bar{y})^2$
1	5101	3921	2148178.78	1201.778
2	7339	3918	596498.78	1002.778
3	7260	3820	480711.11	4400.111

Contraste bilateral (dos colas): $H_0: \mu_1 = \mu_2$, $H_1: \mu_1 \neq \mu_2$
 Condición: si $|t_c| > \text{valor crítico}$, se rechaza H_0 y se acepta H_1

Nota: Elaboración propia

En la Tabla 46 se visualiza las muestras obtenidas de los valores de la relación estabilidad - flujo de mezcla asfáltica para ambos husos granulométricos (MAC-02 y Superpave), donde también se aprecia el cálculo de las medias muestrales elevadas al cuadrado.

Se procede a realizar el cálculo de los factores necesarios para el contraste de la prueba:

Tabla 47

T Student para estabilidad/flujo MAC-02 y estabilidad/flujo Superpave

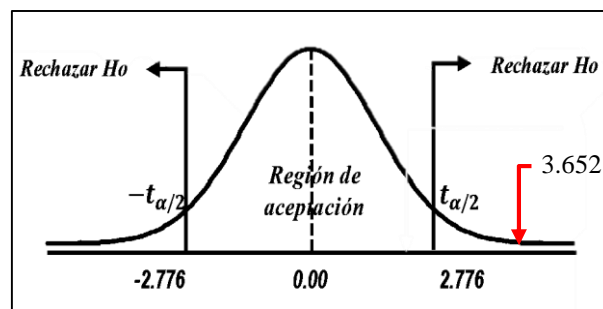
Tamaño de la muestra 1	n_1	3	Tamaño de la muestra 2	n_2	3
Media muestral convencional	\bar{x}_1	6566.667	Media muestral convencional	\bar{x}_2	3886.333
Varianza muestral convencional	s^2_1	1612694.33	Varianza muestral convencional	s^2_2	3302.333
Varianza ponderada	s^2_p	807998.333			
Estadístico de prueba	tc	3.652			
Grados de libertad	G.L.	4			
Nivel de significancia 95%	α	0.05			
Valor crítico de la tabla 2 colas	$t_{\frac{\alpha}{2}}$	2.776			

Nota: Elaboracion propia

En la Tabla 47, se concluye con que el estadístico de la prueba $|tc| = 3.652$ es mayor a el valor crítico de la tabla a 2 colas $t_{\frac{\alpha}{2}} = 2.776$, por lo tanto, no se acepta H_0 , lo cual significa que existen diferencias significativas entre las dos medias al nivel de confianza del 95%.

Figura 19

Esquema típico valores de relación estabilidad - flujo



Nota: Elaboración propia

En la Figura 19 se observa la ubicación del estadístico de prueba en el esquema típico al 95% del nivel de significancia para los valores la relación estabilidad - flujo.

Considerando la ecuación *EC-14*, determinamos un intervalo de confianza por ser un contraste bilateral y viendo la pertenencia del 0 en su interior se tiene:

$$IC = (4717.746, 642.920)$$

Como el 0 no se encuentra dentro del intervalo de confianza, se concluye que con un 95% de nivel de significancia que $\mu_1 \neq \mu_2$ por lo tanto se acepta la hipótesis alternativa H_1 .

4.3.4. Contratación de hipótesis específica 4

El porcentaje de vacíos en el agregado mineral (V.M.A.) para el óptimo contenido de asfalto de la mezcla diseñada con la metodología Marshall empleando la granulometría Superpave está compuesta por 03 valores obtenidos de ensayo de 03 probetas, los cuales son: 18.84, 18.82 y 18.96 % respectivamente, de la misma forma la estabilidad que presenta la granulometría MAC-02 cuenta con 03 resultados producto del ensayo de probetas que son: 18.83, 18.93 y 18.63 % respectivamente, se observan resultados similares a los obtenidos con la granulometría Superpave, en cuanto al cumplimiento de las especificaciones técnicas EG-2013 del MTC que determina como valor mínimo 14%, ambas cumplen con las especificaciones.

Se formulan dos hipótesis para el análisis T de Student:

H_0 : La granulometría Superpave en comparación con la MAC-02 de los agregados de la cantera El Pedregal no influye en el % de vacíos en el agregado mineral de las mezclas asfálticas en caliente.

H_1 : La granulometría Superpave en comparación con la MAC-02 de los agregados de la cantera El Pedregal influye en el % de vacíos en el agregado mineral de las mezclas asfálticas en caliente.

Tabla 48
T Student para valores % V.M.A MAC-02 y % V.M.A Superpave

N° Muestra	T Student - % Vacios en el agregado mineral			
	MAC-02	Superpave	$(x_i - \bar{x})^2$	$(y_i - \bar{y})^2$
1	18.83	18.84	0.0011	0.0011
2	18.93	18.82	0.0178	0.0028
3	18.63	18.96	0.0278	0.0075

Contraste bilateral (dos colas): $H_0: \mu_1 = \mu_2$, $H_1: \mu_1 \neq \mu_2$

Condición: si $|t_c| > \text{valor crítico}$, se rechaza H_0 y se acepta H_1

Nota: Elaboración propia

En la Tabla 48, se visualiza las muestras obtenidas de los valores del % de vacíos en el agregado mineral de mezcla asfáltica para ambos husos granulométricos (MAC-02 y Superpave), donde también se aprecia el cálculo de las medias muestrales elevadas al cuadrado.

Se procede a realizar el cálculo de los factores necesarios para el contraste de la prueba:

Tabla 49

T Student para valores de fluencia MAC-02 y fluencia Superpave

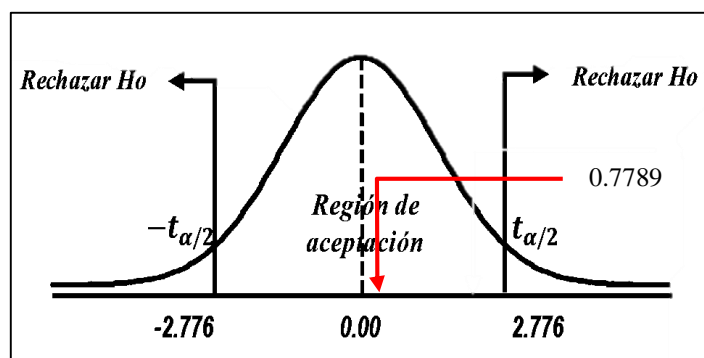
Tamaño de la muestra 1	n_1	3	Tamaño de la muestra 2	n_2	3
Media muestral convencional	\bar{x}_1	18.7967	Media muestral convencional	\bar{x}_2	18.8733
Varianza muestral convencional	s^2_1	0.0233	Varianza muestral convencional	s^2_2	0.0573
Varianza ponderada	s^2	0.0145			
Estadístico de prueba	tc	-0.7789			
Grados de libertad	G.L.	4			
Nivel de significancia 95%	α	0.05			
Valor crítico de la tabla 2 colas	$t \frac{\alpha}{2}$	2.776			

Nota: Elaboración propia

En la Tabla 49, se concluye con que el estadístico de la prueba $|tc| = 0.7789$ es menor a el valor crítico de la tabla a 2 colas $t \frac{\alpha}{2} = 2.776$, por lo tanto, se acepta H_0 , lo cual significa que no existen diferencias significativas entre las dos medias al nivel de confianza del 95%.

Figura 20

Esquema típico valores de % de vacios en el agregado mineral



Nota: Elaboración propia

En la Figura 20, se observa la ubicación del estadístico de prueba en el esquema típico al 95% del nivel de significancia para los valores de % de vacíos en el agregado mineral.

Considerando la ecuación *EC-14*, determinamos un intervalo de confianza por ser un contraste bilateral y viendo la pertenencia del 0 en su interior se tiene:

$$IC = (0.1966, -0.3499)$$

Como el 0 se encuentra dentro del intervalo de confianza, se concluye que con un 95% de nivel de significancia que $\mu_1 = \mu_2$ por lo tanto no se acepta la hipótesis alternativa H_1 .

Conclusiones:

1. La granulometría Superpave en comparación con la granulometría MAC-02 influye significativamente en la estabilidad de las mezclas asfálticas en caliente, según refleja el valor del estadístico de prueba de la Tabla 41 que es 5.32 mayor al valor crítico 2.776 para el nivel de significancia del 95%, concluyendo que existe una influencia significativa entre las dos medias de valores de estabilidad a nivel de confianza del 95%; no obstante, en la tabla 39 se observa que los valores obtenidos en la mezcla asfáltica con el huso granulométrico MAC-02 son elevados respecto al valor mínimo (831kg) detallado en la Tabla 21 la cual representa una mezcla asfáltica con elevada estabilidad, siendo este el principal indicio de susceptibilidad a fallas por fatiga.
2. La granulometría Superpave en comparación con la granulometría MAC-02 no influye significativamente en el flujo de las mezclas asfálticas en caliente, según refleja el valor del estadístico de prueba de la tabla 43 (-2.683) menor al valor crítico 2.776 para el nivel de significancia del 95%, concluyendo que no existe una influencia significativa entre las dos medias de los valores de flujo obtenidos a nivel de confianza del 95%; no obstante, en la Tabla 42 se tienen resultados con el huso granulométrico MAC-02 muy cercanos al valor mínimo de 8 (0.01”) especificado en la Tabla 21 por la EG-2013 del MTC, la cual puede ser es un indicativo de una mezcla asfáltica poco susceptible a las deformaciones.
3. La granulometría Superpave en comparación con la granulometría MAC-02 influye significativamente en la relación estabilidad/flujo de las mezclas asfálticas en caliente, según refleja el valor del estadístico de prueba de la Tabla 45 que es 3.652 mayor al valor crítico 2.776 para el nivel de significancia del 95%, concluyendo que

existe una influencia significativa entre las dos medias de los valores de la relación estabilidad/flujo a nivel de confianza del 95%; se observa también en la Tabla 44 los valores obtenidos de la relación estabilidad/flujo en la mezcla asfáltica en caliente con el huso granulométrico MAC-02 se encuentran fuera del rango establecido por la EG-2013 del MTC.

4. La granulometría Superpave en comparación con la granulometría MAC-02 no influye significativamente en el % vacíos en el agregado mineral de las mezclas asfálticas en caliente, según refleja el valor del estadístico de prueba de la Tabla 47 (-0.7789) menor al valor crítico 2.776 para el nivel de significancia del 95%, concluyendo que no existe una influencia significativa entre las dos medias de los valores de % de vacíos en el agregado mineral obtenidos a nivel de confianza del 95%; se observa también que los valores de % de vacíos en el agregado mineral de la mezcla asfáltica producida por las granulometrías MAC-02 y Superpave cumplen con superar el valor mínimo establecido por la EG-2013 del MTC.

Recomendaciones:

1. Como los valores obtenidos para la estabilidad con la granulometría MAC-02 son elevados siendo compuesta al 100% por material chancado, se recomienda el empleo de un % de arena natural en la mezcla asfáltica en caliente como se observa en la granulometría Superpave. Por otro lado, se recomienda profundizar la investigación en la influencia de la estabilidad en el desempeño de las mezclas asfálticas en caliente por medio de un tramo de prueba.
2. Debido que el flujo de la mezcla asfáltica con granulometría MAC-02 se encuentra cercano al límite inferior de los valores de la norma, se recomienda profundizar la investigación en la influencia de la angularidad y textura del agregado a fin de mantener un valor promedio que cumpla los requisitos de las especificaciones técnicas EG-2013.
3. Para no sobrepasar los límites de la relación estabilidad/flujo se recomienda verificar estrictamente que los valores de la estabilidad y flujo sean valores promedios al de las especificaciones técnicas.
4. Para el % de vacíos en el agregado mineral se recomienda en el diseño de la mezcla asfáltica utilizar el valor promedio del porcentaje de vacíos de 4% según norma, donde ésta evitará el incremento del % óptimo de asfalto y por ende que las películas de asfalto que recubren las partículas de agregados sean gruesas de esta manera no tener valores elevados de VMA.

Referencias bibliográficas

Aguilar-Ampuero, J. & Valer-Arotaipe, Á. (2021). *Análisis del comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica convencional frente a una mezcla asfáltica adicionada con botellas de plástico trituradas recicladas (BPTR) y granos de neumáticos reciclados (GNR) con agregados de la región del Cusco*. [Tesis de grado Universidad Andina de Cusco]

https://repositorio.uandina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12557/4179/Jos%C3%A9_Angela_Tesis_bachiller_2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Abreu, J. L. (2014). El método de la investigación Research Method. *Daena: International Journal of Good Conscience*, 9(3), 195-204 [http://www.spentamexico.org/v9-n3/A17.9\(3\)195-204.pdf](http://www.spentamexico.org/v9-n3/A17.9(3)195-204.pdf)

Boza-Álviz, S, & Sinchi-Choque, R. (2015). *Evaluación comparativa del módulo dinámico y las propiedades volumétricas de la mezcla en caliente diseñada por el método de Marshall con granulometrias EG-2013 y superpave para la carretera tramo Cusco-Occopata*. [Tesis de grado Universidad Andina de Cusco]

<https://repositorio.uandina.edu.pe/handle/20.500.12557/57>

Calderón, J, Alzamora, L., & Del Águila, E. (2013). La tesis de posgrado. Un enfoque multidisciplinario. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUNI_882a50ca97767016a91cb8124b19e3fb#details

Castro-Sosa, F. (2012). *Condiciones para el uso del agregado global para mezclas asfálticas*. [Tesis de grado. Universidad Nacional de Ingeniería]. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUNI_882a50ca97767016a91cb8124b19e3fb

Carrasco Díaz, S. (2006). *Metodología de la investigación científica* (A. J. Paredes Galván (ed.); Primera ed).

https://www.academia.edu/26909781/Metodologia_de_La_Investigacion_Cientifica_Carrasco_Diaz_1

Chiquito, A., & Torres, F. (2015). *Diseño de mezcla asfáltica en caliente empleando agregados de la cantera San Vicente de Colonche y del río San Rafael de la Provincia de Santa Elena utilizando el Método Marshall*. [Tesis de grado. Universidad Estatal Península de Santa Elena, 52]. <https://repositorio.upse.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/46000/2267/UPSE-TIC-2015-003.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

De La Cruz-Bazán, P., & Porras-Zavala, M. (2015). *Evaluación de desempeño de mezclas asfálticas en caliente diseñadas por la metodología Marshall con el ensayo de la rueda cargada de Hamburgo para el proyecto de rehabilitación de la carretera DV Imperial-Pampas*. [Tesis de grado, Universidad Ricardo Palma]. https://repositorio.urp.edu.pe/bitstream/handle/URP/2188/delacruz_pporras_mj.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Domínguez, R. (2011). Artículo: *Criterios de Inclusión y exclusión*.

Fernández-Zúñiga, R. (2018). *Diseño volumétrico de una mezcla asfáltica en caliente destinada a la conservación de una pista para el aeropuerto arturo merino benitez mediante metodología superpave*. [Tesis de grado, Universidad Técnica Federico Santa María]. <https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/42242/3560900255177UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Garnica Anguas, P., Flores Flores, M., Gómez López, J. A., & Delgado Alamilla, H. (2005). Caracterización geomecánica de mezclas asfálticas. *Publicación técnica*, (267). <https://www.imt.mx/archivos/publicaciones/publicaciontecnica/pt267.pdf>

Glosario de términos de uso frecuente en proyectos de infraestructura vial (2018) – Ministerio de transportes y comunicaciones.

Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). Metodología de la investigación (6ta edición ed.). México DF: Mc Graw Hill. <http://observatorio.epacartagena.gov.co/wp-content/uploads/2017/08/metodologia-de-la-investigacion-sexta-edicion.compressed.pdf>

Hernández, S. (2010). *Metodología de la investigación*. México: MC Draw Hill. [https://scholar.google.com.pe/scholar?q=Hern%C3%A1ndez,+S.+\(2010\).+Metodolog%C3%ADa+de+la+investigaci%C3%B3n.+M%C3%A9xico:+MC+Graw+Hill.&hl=es&as_sdt=0&as_vis=1&oi=scholar](https://scholar.google.com.pe/scholar?q=Hern%C3%A1ndez,+S.+(2010).+Metodolog%C3%ADa+de+la+investigaci%C3%B3n.+M%C3%A9xico:+MC+Graw+Hill.&hl=es&as_sdt=0&as_vis=1&oi=scholar)

Hernández-Sampieri, R., & Torres, C. P. M. (2018). *Metodología de la investigación* (Vol. 4). México^ eD. F DF: McGraw-Hill Interamericana. <https://virtual.cuautitlan.unam.mx/rudics/?p=2612>

Iberico-Vigo, P. (2019). *Diseño de mezcla asfáltica en caliente mediante el ensayo marshall adicionando fibra de acero en la ciudad de Yurimaguas–2019*. [Tesis de grado, Universidad Cesar Vallejo]. https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/58855/Iberico_VPM-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Kinnear, T., & Taylor, J. (1998). Investigación de mercados. 5ª. Edición. Editorial McGraw Hill. México. <https://www.iberlibro.com/buscar-libro/titulo/investigacion-mercados/autor/taylor-kinnear/>

Maya, E. (2014). Una propuesta ágil para la presentación de trabajos científicos en las áreas de arquitectura, urbanismo y disciplinas afines. *Revista Métodos y técnicas de investigación*. https://www.academia.edu/31803925/M%C3%A9todos_y_t%C3%A9cnicas_de_investigaci%C3%B3n_Una_propuesta_%C3%A1gil_para_la_presentaci%C3%B3n_de_trabajos_cient%C3%ADficos_en_las_%C3%A1reas_de_arquitectura_urbanismo_y_disciplinas_afines

Minaya, S., & Ordóñez, A. (2006). Diseño moderno de pavimentos asfálticos. Lima: ICG. https://www.academia.edu/34829662/UNIVERSIDAD_NACIONAL_DE_INGENIERIA_A_DISE%C3%91O_MODERNO_DE_PAVIMENTOS_ASF%C3%81LTICOS_M_Sc_SILENE_MINAYA_GONZ%C3%81LEZ

MTC, M. D. (2013). Manual de Carreteras: Especificaciones técnicas generales para la construcción. https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/manuales.html

MTC, M. D. (2016). Manual de Carreteras: Ensayo de materiales. https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/manuales.html

Ñahui-Sacha, S., & Sedano-Meza, J. (2017). Estudio de la calidad de los agregados de la cantera de ocopa para la elaboración de la mezcla asfáltica para pavimento flexible en el distrito de Lircay Angaraes Huancavelica. <https://repositorio.unh.edu.pe/bitstream/handle/UNH/1884/TESIS%C3%91AHUI%20SACHA%20SAUL%20Y%20SEDAMO%20MEZA%2C%20JOSE%20ALBERTO.pdf?sequence=1&isAllowed=1>

Núñez Gutiérrez, P. W. (2013). Manual de prácticas de laboratorio de pavimentos con cementos asfálticos. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/2225>

Ordóñez, M., & Minaya, S. (2001). Manual de laboratorio ensayos para pavimentos. *Volumen I. Universidad Nacional de Ingeniería.*

https://www.academia.edu/6949875/MANUAL_DE_ENSAYOS_PARA_PAVIMENTOS

Ortega-Castro, A. (2013). *La calidad de los agregados de tres canteras de la ciudad de Ambato y su influencia en la resistencia del hormigón empleado en la construcción de obras civiles* (Bachelor's thesis). <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/4335>

Penslar, RL (Ed.). (1995). *Ética de la investigación: casos y materiales*. Prensa de la Universidad de Indiana.

Pinchi-Vergara, L. (2017). Diseño de pavimento flexible con carpeta asfáltica en caliente tramo Banda de Shilcayo–Las Palmas. [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <http://hdl.handle.net/11458/2575>

Rangel-Galicia, D. (2015). *Determinación de la resistencia a la tensión indirecta del concreto asfáltico variando la granulometría y el contenido de ligante*. [Tesis de grado, Universidad Nacional Autónoma de México]. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/8952/Tesis.pdf?sequence=1>

Ramírez-Montenegro, M. (2015). *Evaluación de compatibilidad de mezclas asfálticas, utilizando agregados de la cantera San Martín con cemento asfáltico PEN 60/70 y emulsión asfáltica CSS-1HP*. [Tesis de grado, Universidad Privada Antenor Orrego]. <https://hdl.handle.net/20.500.12759/2528>

Resolución de consejo universitario N° 062-2020-UTEA-CU de 2020. Reglamento del comité de ética de investigación. V0.4. Universidad Tecnológica de los Andes. <http://transparencia.utea.edu.pe/#menu1>

Rojas Dueñas, D. K. (2017). Caracterización de concretos asfálticos y sus agregados con la aplicación de técnicas de análisis de imagen. *Departamento de Ingeniería de Sistemas e Industrial*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/60951>

Sankey, C. P., (2015). Road Safety Analysis. [En línea] Available at: <https://www.irf.global/ebooks/IRF-Examiner-15Vol5.pdf>

Terán-Molina, L. (2015). *Diseño de mezclas asfálticas en caliente utilizando agregados de la mina Cashapamba con metodología Marshall* [Tesis de grado, UIDE]. <http://repositorio.uide.edu.ec/handle/37000/2208>

Ñahui-Sacha, S., & Sedano-Meza, J. (2017). *Estudio de la calidad de los agregados de la cantera de ocopa para la elaboración de la mezcla asfáltica para pavimento flexible en el distrito de lircay angaraes huancavelica*. [Tesis de grado, Universidad Nacional de Huancavelica]. <http://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/1884>

Zafra Galvis, Orlando (2006). *Tipos de Investigación*. *Revista Científica General José María Córdova*, 4(4)13-14. [fecha de Consulta 12 de diciembre de 2021]. ISSN: 1900-6586. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=476259067004>

Zúñiga, R. (2015). Mezcla asfáltica en caliente. *Santiago de Chile: Autor*. <https://docplayer.es/24390419-Mezcla-asfaltica-en-caliente-con-pavimento-asfaltico-recuperado-rap.html>

ANEXOS

ANEXO 01: Matriz de Consistencia

ANEXO 02: Instrumentos de recolección de información

ANEXO 03: Evidencias

ANEXO 04: Declaratoria de autenticidad del informe de tesis

ANEXO 05: Consentimiento y asentamiento informativo