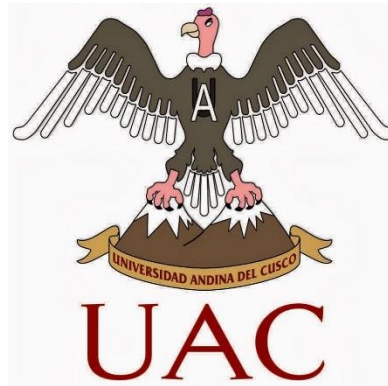




UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS:

“ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO – MECÁNICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO, ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS Y EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROTURA LENTA, EN REFERENCIA A UNA MEZCLA PATRÓN, CUSCO 2019 ”.

Presentado por:

JUAN CARLOS GOMEZ ELORRIETA.

JUNIOR ANIBAL GOMEZ PEÑA.

Para optar al Título Profesional de:

Ingeniero Civil

Asesor:

ING. HEINER SOTO FLÓREZ.

CUSCO-PERÚ

2020



Dedicatoria.

Juan Carlos.

La presente tesis está dedicada a Dios, que siempre me ilumina con su sabiduría.

A mis padres, por estar siempre a mi lado dándome su apoyo incondicional y sus valiosos consejos para no errar en este camino.

A mis hermanos por sus palabras de aliento, motivación y compañía a lo largo de mi vida.

Junior Aníbal.

A mis padres por haberme formado como la persona que soy ahora; muchos de mis triunfos se los debo a ustedes entre los que se incluye este. Me formaron con reglas y algunas libertades, pero al final de cuentas, me motivaron constantemente para alcanzar mis metas, gracias.



Agradecimientos.

Gracias a la Universidad Andina del Cusco, por habernos formado en sus aulas y permitirnos culminar exitosamente nuestros estudios universitarios, gracias a todos nuestros docentes por compartir sus conocimientos y sabiduría para con nosotros, gracias a todas las personas que fueron partícipes de este proceso, compañeros y amigos que aportaron de alguna manera a la realización de este trabajo de tesis, que nos permitieron llegar a este día; día en el cual se ve reflejado la culminación con mucho esfuerzo de este trabajo.

También un agradecimiento especial a los docentes dictaminantes, replicantes y muy en particular al asesor de tesis, quienes invirtieron su tiempo en revisar este trabajo de tesis, a ustedes nuestro más profundo reconocimiento.



Resumen.

Este trabajo busca difundir más el uso y diseño de mezclas asfálticas en frío en nuestro medio; utilizando no solamente agregados nuevos, sino una combinación de estos con agregados reciclados, además de la utilización de una emulsión asfáltica de rotura lenta como ligante; el objetivo principal es determinar los valores de las magnitudes de las propiedades físico-mecánicas de una mezcla asfáltica diseñada con agregados reciclados a distintos porcentajes en referencia a una mezcla patrón, para ello se analizó datos de cuatro ensayos físico-mecánicos específicos los cuales son: Estabilidad y Flujo, Resistencia a inmersión-compresión, Tracción indirecta y Módulo de rigidez; previo a ello se realizó los ensayos de control de calidad para los agregados nuevos y reciclados, así como de la emulsión asfáltica de rotura lenta, los ensayos se realizaron en los laboratorios de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Andina del Cusco y el Laboratorio de Estudios Especiales del Ministerio de Transportes y Comunicaciones - Sede Lima con Informe de Ensayos N° 184-2019-MTC/19.01 EE; en cuanto los métodos utilizados nos basamos en dos documentos, primero el Manual de Ensayo de Materiales EM 2000 edición 2016 MTC, segundo el Manual de Carreteras Especificaciones Generales para Construcción EG-2013 MTC, ambos del Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú; adicionalmente se consultó documentos como la normativa de vías Colombiana, los manuales Americanos MS-14, MS-19 y MS-22, indicados para evaluar emulsiones asfálticas y mezclas asfálticas en frío; en cuanto a los resultados obtenidos, la Estabilidad y Flujo Marshall se encuentran muy por encima de lo esperado, es decir cumplen a cabalidad los parámetros mínimos exigidos tanto de los antecedentes como de la normativa; la Resistencia a Compresión –Inmersión se encuentra por debajo de los mínimos exigidos; cabe señalar en este punto que estos dos primeros ensayos son los únicos que se consideran o validan dentro de nuestra normativa para pavimentación de vías; el tercer ensayo de Resistencia a Tracción Indirecta de acuerdo a los antecedentes y normativa usados se encuentran dentro de lo exigido; el último ensayo es el Módulo de rigidez calculado teóricamente con fórmulas matemáticas de correlación, pero usa datos reales de otros ensayos realizados en la presente tesis, este indica valores muy superiores a los mínimos exigidos.

Palabra clave: Emulsión asfáltica, mezcla asfáltica en frío, Pavimento asfáltico reciclado RAP, Estabilidad y Flujo, Resistencia a Inmersión-Compresión, Resistencia a Tracción Indirecta, Módulo de Rigidez.



Abstract.

This work seeks to spread the use and design of cold asphalt mixtures in our environment; using not only new aggregates, but a combination of these with recycled aggregates, in addition to the use of a slow-breaking asphalt emulsion as a binder; The main objective is to determine the values of the magnitudes of the physical-mechanical properties of an asphalt mixture designed with recycled aggregates at different percentages in reference to a standard mixture, for this, data from four specific physical-mechanical tests were analyzed, which are: Stability and Flow, Immersion-compression resistance, Indirect traction and Stiffness module; Prior to this, the quality control tests for the new and recycled aggregates were performed, as well as the slow-breaking asphalt emulsion, the tests were carried out in the laboratories of the Professional School of Civil Engineering of the Andean University of Cusco and the Laboratory of Special Studies of the Ministry of Transportation and Communications - Lima Headquarters with Test Report N ° 184-2019-MTC / 19.01 EE; As for the methods used, we rely on two documents, first the Materials Testing Manual EM 2000 edition 2016 MTC, second the Road Manual General Specifications for Construction EG-2013 MTC, both from the Ministry of Transportation and Communications of Peru; additionally, documents such as the Colombian road regulations, the American manuals MS-14, MS-19 and MS-22, indicated to evaluate asphalt emulsions and cold asphalt mixtures were consulted; As for the results obtained, Marshall Stability and Flow are well above expectations, that is, they fully comply with the minimum required parameters of both the background and the regulations; Compression Resistance - Immersion is below the required minimums; It should be noted at this point that these first two trials are the only ones that are considered or validated within our regulations for paving roads; the third Indirect Tensile Strength test according to the background and regulations used is within the requirements; The last test is the Stiffness Module theoretically calculated with mathematical correlation formulas, but it uses real data from other tests carried out in this thesis, this indicates values that are much higher than the minimum required.

Keyword: Asphalt emulsion, cold asphalt mix, RAP recycled asphalt pavement, stability and flow, immersion-compression resistance, indirect tensile strength, rigidity module.



Introducción.

El presente trabajo de investigación de tesis titulado: **“Análisis comparativo de las propiedades Físico - mecánicas de una mezcla asfáltica en frío, elaborado con agregados reciclados y emulsión asfáltica de rotura lenta, en referencia a una mezcla patrón, Cusco 2019”**. El cual se desarrolló en la ciudad del Cusco, específicamente en los laboratorios de Suelos, Concretos y Asfaltos de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Facultad de Arquitectura e Ingeniería de la Universidad Andina del Cusco, ubicado en la Urbanización Ingeniería – Larapa Grande del Distrito de San Jerónimo, provincia del Cusco, periodo comprendido entre Octubre del 2018 hasta Mayo del 2019; se planteó o tuvo como objetivo determinar los valores de las magnitudes de las propiedades físico- mecánicas de una mezcla asfáltica en frío, elaborado con agregados reciclados y emulsión asfáltica de rotura lenta comparada con una mezcla patrón; definiendo dosificaciones y proporciones en el cual la mezcla asfáltica tenga mejor comportamiento físico-mecánico de acuerdo a los parámetros indicados en el “Manual de Ensayo de Materiales EM 2000 edición 2016 MTC” y el “Manual de Carreteras “Especificaciones Técnicas generales para Construcción EG-2013 MTC” fundamentalmente.

Las muestras representativas de pavimento asfáltico se tomaron de la Av. T.C. Gordon Magné de la Urbanización Santa Rosa del Distrito de Wánchaq; así como la carpeta Asfáltica extraída de la Av. 24 de Junio del Distrito de Wánchaq, ambos en la Provincia y Región Cusco; las canteras de agregados pétreos se ubican en los kilómetros 914-917 vía Cusco – Abancay (Huillque y Quelloventanayoc) elegidos por sus características de uso en pavimentos asfálticos y de la planta de Asfaltos de COPESCO ubicado en las cercanías del Centro poblado de Huacarpay del distrito de Lucre provincia de Quispicanchis.

La presente Tesis muestra el siguiente orden:

Capítulo I, Comprende el planteamiento del problema de investigación de tesis, dentro de ello la identificación del problema, justificación e importancia, limitaciones y objetivos de la investigación de tesis; **Capítulo II**, Los conceptos teóricos de agregados pétreos, pavimentos reciclados, emulsiones asfálticas y propiedades físico-mecánicas a evaluar de las mismas; en el **Capítulo III**, Está referida a la parte experimental, como la caracterización de agregados nuevos y agregados reciclados donde se analizaron las propiedades físicas de: Granulometría, Peso unitario y Porcentaje de vacíos, Peso específico y Absorción, Humedad total, Caras fracturadas, Chatas y alargadas, Abrasión de los ángulos, Durabilidad a Sulfatos de Na y Mg, Equivalente de arena;



caracterización de la emulsión asfáltica donde se analizó las propiedades físicas de Carga de partículas, Viscosidad de Saybolt Furol, Recubrimiento y adherencia, Destilación por residuo de asfalto, Penetración; Diseño de mezcla y conformación de briquetas de ensayos los cuales se ajustan a los husos granulométricos de mezclas densas en frío MDF2 cumpliendo los rangos y especificaciones de los Manuales utilizados del MTC; se realizaron los ensayos físicos –mecánicos de: **Estabilidad y Flujo:** Que midió la resistencia a la deformación y la deformación de la briketa propiamente dicha, **Resistencia Inmersión – compresión:** Midió la carga puntual de forma axial sobre una briketa de diámetro y altura iguales , **Resistencia a Tracción Indirecta:** Midió la carga distribuida de forma transversal sobre una briketa, **Módulo de Rigidez:** Este se determinó de forma teórica por métodos numéricos de predicción correlacionales con ayuda de datos reales obtenidas de otros ensayos realizados en la presente tesis, estos ensayos físico-mecánicos se analizaron por comparación entre un diseño de mezcla con agregados reciclados de carpeta asfáltica y un diseño de mezcla con agregados nuevos donde se pretendió demostrar si es pertinente reciclar o no agregados en mezclas asfálticas en frío para su uso en vías nuevas; **Capítulo IV**, Está referido al análisis de resultados; **Capítulo V**, Discusión de todo lo trabajado en la investigación de tesis; conclusiones y recomendaciones del trabajo de investigación de tesis, presentación de un panel fotográfico, Anexos, glosario de términos y bibliografía utilizada.

**Índice General.**

	Pág.
Dedicatoria.....	i
Agradecimientos.....	ii
Resumen.....	iii
Abstract.....	iv
Introducción.....	v
Índice general.....	vii
Índice de Tablas.....	xiii
Índice de Figuras.....	xxiii
1. Capítulo I: Planteamiento del problema.....	1
1.1. Identificación del problema.....	1
1.1.1. Descripción del problema.....	1
1.1.2. Formulación del problema.....	4
1.2. Justificación e importancia de la investigación.....	5
1.2.1. Justificación técnica.....	5
1.2.2. Justificación social.....	6
1.2.3. Justificación por viabilidad.....	6
1.2.4. Justificación por relevancia.....	7
1.3. Limitaciones de la investigación.....	7
1.4. Objetivos.....	10
1.4.1. Objetivo general.....	10
1.4.2. Objetivos específicos.....	10
2. Capítulo II: Marco Teórico.....	11
2.1. Antecedentes de la tesis.....	11
2.1.1. Antecedente a nivel Nacional.....	11
2.1.2. Antecedente a nivel Internacional.....	12
2.2. Aspectos teóricos pertinentes.....	14
2.2.1. Definición de pavimentos.....	14
2.2.2. Pavimento flexible.....	15



2.2.3. Descripción de componentes.....	18
2.2.4. Definición de emulsión de asfáltica.....	25
2.2.5. Emulsificante.....	27
2.2.6. Pavimento reutilizable.....	29
2.2.7. Mezclas asfálticas.....	32
2.2.8. Metodología de diseño Marshall modificado.....	37
2.2.9. Ensayos de laboratorio según diseño de ingeniería.....	51
2.3. Hipótesis.....	84
2.3.1. Hipótesis general.....	84
2.3.2. Sub hipótesis.....	84
2.4. Definición de variables.....	85
2.4.1. Variables independientes.....	85
2.4.2. Variable dependiente.....	85
2.4.3. Cuadro de operacionalización de variables.....	85
3. Capítulo III: Metodología.....	87
3.1. Metodología de la investigación.....	87
3.1.1. Enfoque de la investigación.....	87
3.1.2. Nivel o alcance de la investigación.....	87
3.1.3. Método de investigación.....	88
3.2. Diseño de la investigación.....	88
3.2.1. Diseño metodológico.....	88
3.2.2. Diseño de ingeniería.....	89
3.3. Población y muestra.....	90
3.3.1. Población.....	90
3.3.2. Muestra.....	95
3.3.3. Criterios de inclusión.....	102
3.4. Instrumentos.....	102
3.4.1. Instrumentos metodológicos o instrumentos de recolección de datos.....	102
3.4.2. Instrumentos de ingeniería (breve relación de los requeridos por el estudio).....	128
3.5. Procedimientos de recolección de datos necesaria para la investigación.....	129
3.5.1. Recolección de datos, Granulometría de agregado grueso, fino y agregado reciclado,	



Norma MTC E-204.....	129
3.5.2. Recolección de datos, Peso unitario y porcentaje de vacíos, Norma MTC E-203.....	133
3.5.3. Recolección de datos, Peso específico y absorción de agregado grueso y fino, Norma MTC E- 205 y E-206.....	136
3.5.4. Recolección de datos, Porcentaje de humedad de agregados finos y gruesos, Norma MTC E-215.....	140
3.5.5. Recolección de datos, Determinación del porcentaje de caras fracturadas, Norma MTC E-210.....	143
3.5.6. Recolección de datos, Partículas chatas y alargadas en agregados, Norma MTC E-223..	148
3.5.7. Recolección de datos, Desgaste de agregados abrasión de los ángeles, Norma MTC E-207.....	151
3.5.8. Recolección de datos, Durabilidad a sulfato de sodio y/o magnesio de agregados, Norma MTC E-209.....	154
3.5.9. Recolección de datos, Equivalente de arena agregado fino, Norma MTC E-114.....	157
3.5.10. Recolección de datos, Angularidad de agregado fino, Norma MTC E-222.....	160
3.5.11. Recolección de datos, Extracción cuantitativa de asfalto, Norma MTC E-502.....	163
3.5.12. Recolección de datos, Penetración de los materiales bituminosos, Norma MTC E-304..	166
3.5.13. Recolección de datos, Carga de partículas de emulsiones asfálticas, Norma MTC E- 407.	169
3.5.14. Recolección de datos, Recubrimiento y adherencia manual americano MS-19.	172
3.5.15. Recolección de datos, Viscosidad Saybolt Furol de emulsiones asfálticas, Norma MTC E-403.....	175
3.5.16. Recolección de datos, Destilación de emulsiones asfálticas, Norma MTC E-401.....	179
3.5.17. Recolección de datos, Peso específico aparente y peso unitario de mezclas asfálticas compactadas saturadas con superficie seca, Norma MTC E-514.....	182
3.5.18. Recolección de datos, Peso específico teórico máxima de mezclas asfálticas, Norma MTC E-508.....	185
3.5.19. Recolección de datos, Porcentaje de vacíos de aire en mezclas asfálticas compactadas densas, Norma E-505.....	188
3.5.20. Recolección de datos, Resistencia a la compresión de mezclas bituminosas compactadas, Norma MTC E-518.....	191



3.5.21. Recolección de datos, Estabilidad y flujo ensayo Marshall, Norma MTC E-504	194
3.5.22. Recolección de datos, Resistencia a tracción indirecta de mezclas de materiales bituminosos en frío, Norma INV E-785.....	198
3.5.23. Recolección de datos, Volumetría de mezclas asfálticas compactadas, Norma INV E-799.	202
3.5.24. Recolección de datos, Modelos de predicción matemáticos para obtener el módulo de Rigidez o dinámico de mezclas asfálticas compactadas (Método correlacional).....	205
3.5.25. Recolección de datos, Metodología de diseño Marshall modificado para la dosificación y fabricación de briquetas de diseño Patrón y diseño de mezcla con agregados reciclados.	208
3.6. Procedimiento de análisis de datos.....	212
3.6.1. Análisis de datos, Granulometría de agregado grueso, fino y reciclado, Norma MTC E-204.....	212
3.6.2. Análisis de datos, Peso unitario y porcentaje de vacíos, Norma MTC E-203.....	217
3.6.3. Análisis de datos, Peso específico y absorción de agregado grueso y fino, Norma MTC E- 205 y 206.....	219
3.6.4. Análisis de datos, Porcentaje de humedad de agregados finos y gruesos, Norma MTC E-2015.....	221
3.6.5. Análisis de datos, Determinación del porcentaje de partículas fracturadas en el agregado grueso, Norma MTC E-210.....	222
3.6.6. Análisis de datos, Partículas chatas y alargadas en agregados Norma MTC E-223.....	224
3.6.7. Análisis de datos, Abrasión en máquina de los ángeles, Norma MTC E-207.....	227
3.6.8. Análisis de datos, Durabilidad al sulfato de sodio y/o magnesio, Norma MTC E-209.....	229
3.6.9. Análisis de datos, Equivalente de arena de agregado fino, Norma MTC E-114.....	231
3.6.10. Análisis de datos, Angularidad de agregado fino, Norma MTC E-222.....	233
3.6.11. Análisis de datos, Extracción cuantitativa de asfalto en mezclas asfálticas, Norma MTC E-502.....	235
3.6.12. Análisis de datos, Penetración de materiales bituminosos, Norma MTC E-304.....	237
3.6.13. Análisis de datos, Carga de partículas de emulsiones asfálticas, Norma MTC E-407.....	239
3.6.14. Análisis de datos, Recubrimiento y adherencia, manual americano MS-19.....	239
3.6.15. Análisis de datos, Viscosidad de Saybolt Furol de emulsiones asfálticas, Norma MTC E-403.....	241



3.6.16. Análisis de datos, Destilación de emulsiones asfálticas, Norma MTC E-401.....	242
3.6.17. Análisis de datos, Peso específico aparente y peso unitario de mezclas asfálticas compactadas saturados con superficie seca, Norma MTC E-514.....	243
3.6.18. Análisis de datos, Peso específico teórico máximo de mezclas asfálticas, Norma MTC E-508.....	247
3.6.19. Análisis de datos, Porcentaje de vacíos de aire, Norma MTC E-505.....	249
3.6.20. Análisis de datos, Estabilidad y flujo Marshall, Norma MTC E-504.....	252
3.6.21. Análisis de datos, Inmersión - compresión de mezclas asfálticas compactadas, Norma MTC E-518.....	255
3.6.22. Análisis de datos, Tracción indirecta para mezclas asfálticas en frío, Norma INV E-785.	259
3.6.23. Análisis de datos, Volumetría de mezclas asfálticas compactadas, Norma INV E-799....	262
3.6.24. Análisis de datos, Modelos de predicción matemáticos para obtener el módulo de Rigidez de mezclas asfálticas compactadas (método correlacional).....	266
3.6.25. Análisis de datos, Metodología de diseño de mezcla Marshall modificado para el diseño de Mezcla asfáltica Patrón y diseño de mezcla asfáltica con agregados reciclados.	271
4. Capítulo IV. Resultados.....	308
4.1. Resultados Análisis granulométrico de agregado grueso, fino y agregado reciclado, Norma MTC E-204.....	308
4.2. Resultados Peso unitario y porcentaje de vacíos Norma MTC E-203.....	311
4.3. Resultados Peso específico y absorción de agregado grueso y fino Norma MTC E-205 y MTC E-206.....	312
4.4. Resultados Porcentaje de humedad de los agregados finos y gruesos Norma MTC E-215.....	313
4.5. Resultados Determinación del porcentaje de partículas fracturadas en el agregado grueso Norma MTC E-210.....	314
4.6. Resultados Partículas chatas y alargadas en agregados Norma MTC E-223.....	314
4.7. Resultados Desgaste de agregados por abrasión en máquina de los Ángeles Norma MTC E-207.....	315
4.8. Resultados Durabilidad al sulfato de sodio y/o magnesio de agregados Norma MTC E-	



209.	316
4.9.	Resultados Equivalente de arena de agregado fino, Norma MTC E-114.....	317
4.10.	Resultados Angulosidad de agregado fino, Norma MTC E-222.....	317
4.11.	Resultados Extracción cuantitativa de asfalto en mezclas asfálticas Norma MTC E-502.	318
4.12.	Resultados Penetración de materiales bituminosos, Norma MTC E-304.....	318
4.13.	Resultados Carga de partículas de emulsión asfáltica, Norma MTC E-407.....	319
4.14.	Resultados Recubrimiento y adherencia, manual americano MS_19.....	319
4.15.	Resultados Viscosidad de Saybolt Furol de emulsiones asfálticas, Norma MTC E-403...	320
4.16.	Resultados Destilación de emulsión asfáltica, Norma MTC E-401.....	320
4.17.	Resultados Peso específico aparente y densidad de mezclas asfálticas norma MTC E-514.	321
4.18.	Resultados Peso específico teórico máximo de mezclas asfálticas Norma MTC E-508...	323
4.19.	Resultados Porcentaje de vacíos de aire en mezclas asfálticas, Norma MTC E-508.....	324
4.20.	Resultados Estabilidad y flujo Marshall, Norma MTC E-504.....	327
4.21.	Resultados Resistencia a inmersión – compresión, Norma MTC E-518.....	333
4.22.	Resultados Resistencia a la tracción indirecta Norma INV E-785.....	335
4.23.	Resultados Análisis volumétrico de mezclas asfálticas compactadas, Norma INV E-799.....	337
4.24.	Resultados Modelos de predicción matemáticos para obtener el Módulo de rigidez o Módulo dinámico de mezclas asfálticas compactadas (método correlacional).....	344
4.25.	Resultados Metodología de diseño de mezcla Marshall modificado para el diseño de Mezcla Asfáltica Patrón y diseño de Mezcla asfáltica con agregados reciclados.....	346
4.25.1.	Resumen de resultados obtenidos para el diseño de mezcla Patrón.....	347
4.25.2.	Resumen de resultados obtenidos para el diseño de mezcla con 25 % de agregado reciclado.....	348
4.25.3.	Resumen de resultados obtenidos para el diseño de mezcla con 33.33 % de agregado reciclado.....	349
4.25.4.	Resumen de resultados obtenidos para el diseño de mezcla con 50 % de agregado reciclado.....	351



4.26. Resultados finales de pruebas físico-mecánicas de comparación de rendimientos, mezcla patrón y mezcla con agregados reciclados, expresado en porcentaje.....	352
5. Capítulo V: Discusión.....	354
Glosario.....	358
Conclusiones.....	363
Recomendaciones.....	365
Referencias bibliográficas.....	368
Enlaces Web.....	369
Anexos.....	373

Índice de Tablas.

	Pág.
Tabla 1A. Red vial nacional, según superficie a julio 2018.....	2
Tabla 1B. Red vial departamental, según superficie a julio 2018.....	2
Tabla 1C. Red vial vecinal, según superficie a julio 2018.....	3
Tabla 2. Valores de resistencia para la mezcla MBRF+CH 33 4% de cemento.....	13
Tabla 3. Valores de resistencia para la mezcla MBRF+CH 33 4% de cemento, análisis módulo dinámico.....	14
Tabla 4. Nomenclatura y uso de emulsiones asfálticas.....	26
Tabla 5. Especificaciones técnicas emulsión asfáltica de rotura lenta CSS-1h.....	27
Tabla 6. Granulometría admisible para el reciclado de pavimentos (RAP).....	30
Tabla 7A. Gradación de agregados para mezclas densas en frío.....	33
Tabla 7B. Granulometría de agregados para mezclas asfálticas cerradas o densas en frío o a temperatura ambiente.....	39
Tabla 7C. Criterios de diseño de mezclas Marshall modificado.....	39
Tabla 7D. Mínimo porcentaje de vacíos de agregado mineral (VMA).....	40
Tabla 7E. Especificaciones y granulometría de los agregados, uno grueso (G) y otro fino (F).....	46
Tabla 7F. Especificaciones y granulometría de los agregados combinados agregado grueso (G) y agregado fino (F).....	47



Tabla 8. Angularidad (A°) del agregado fino en función del nivel del tránsito y la posición del pavimento.....	63
Tabla 9. Densidades relativas del agua y factores de conversión K, para varias temperaturas.....	69
Tabla 10. Cuadro de operacionalización de variables.....	86
Tabla 11. Criterios cálculo de muestra de poblaciones finitas.....	96
Tabla 12. Volumen de material reciclado de pavimento en vías.....	96
Tabla 13. Peso de agregados totales de cantera y reciclado de pavimento.....	97
Tabla 14. Población (N) y tamaño de muestra (n) para agregados y reciclado de pavimento.....	97
Tabla 15. Número de muestras tomadas por cuadrante y por camión determinados aleatoriamente para Pavimento reciclado N°1.....	99
Tabla 16. Numero de muestras tomadas por cuadrante y por camión determinados aleatoriamente para Pavimento reciclado N°2.....	100
Tabla 17. Guía para estimar la cantidad necesaria de muestra.....	101
Tabla 18. Formato Análisis granulométrico agregado grueso.....	103
Tabla 19. Formato Peso unitario agregados grueso, fino, reciclado y porcentaje de vacíos.....	104
Tabla 20. Formato Peso específico y porcentaje de absorción agregado grueso y reciclado.....	105
Tabla 21. Formato Porcentaje de humedad de los agregados y agregado reciclado de pavimento....	106
Tabla 22. Formato Abrasión en máquina de los ángeles.....	107
Tabla 23. Formato Caras fracturadas agregado grueso y reciclado.....	108
Tabla 24. Formato Partículas chatas y alargadas agregado grueso y reciclado.....	109
Tabla 25. Formato Durabilidad al sulfato de sodio y magnesio del agregado fino y reciclado.....	110
Tabla 26. Formato Equivalente de arena de agregados finos.....	111
Tabla 27. Formato Angulosidad de agregado fino.....	112
Tabla 28. Formato Extracción cuantitativa de asfalto, lavado de asfalto.....	113
Tabla 29. Formato Penetración de materiales bituminosos.....	114
Tabla 30. Formato Carga de partículas de emulsión asfáltica.....	115
Tabla 31. Formato Recubrimiento y adherencia.....	116
Tabla 32. Formato Viscosidad Saybolt Furol de emulsiones asfálticas.....	117
Tabla 33. Formato Destilación de emulsiones asfálticas.....	118
Tabla 34. Formato Peso específico aparente y peso unitario de mezclas asfálticas compactadas.....	119
Tabla 35. Formato Peso específico teórico máximo de mezclas asfálticas.....	120



Tabla 36. Formato Porcentaje de vacíos de aire en mezclas asfálticas compactadas densas	121
Tabla 37. Formato Resistencia a la compresión de mezclas bituminosas compactadas	122
Tabla 38. Formato Estabilidad y Flujo ensayo Marshall	123
Tabla 39. Formato Resistencia a tracción indirecta de mezclas de materiales bituminosos en frío..	124
Tabla 40. Formato Análisis volumétrico de mezclas asfálticas compactadas	125
Tabla 41. Formato Modelos de predicción matemático para obtener el módulo de rigidez	126
Tabla 42. Formato metodología de diseño Marshall Modificado	127
Tabla 43. Toma de datos análisis granulométrico agregado grueso 1	132
Tabla 44. Toma de datos peso unitario agregado grueso 1	135
Tabla 45. Toma de datos peso específico y absorción agregado fino 1	139
Tabla 46. Tamaño de la muestra de agregado para determinación de humedad	141
Tabla 47. Toma de datos porcentaje de humedad de agregado fino 1	142
Tabla 48. Peso mínimo requerido de muestra para ensayo de caras fracturadas método A	143
Tabla 49. Peso mínimo requerido de muestra para ensayo de caras fracturadas método A	144
Tabla 50. Toma de datos porcentaje de caras fracturadas agregado grueso 1 método A	146
Tabla 51. Toma de datos porcentaje de caras fracturadas agregado grueso 1 método B	147
Tabla 52. Toma de datos chatas y alargadas agregado grueso	150
Tabla 53. Gradación de las muestras de ensayo y cantidad según método	152
Tabla 54. Toma de datos desgaste en máquina de abrasión de los ángeles agregado grueso 1	153
Tabla 55. Toma de datos durabilidad al sulfato de sodio y/o magnesio agregado fino 1	156
Tabla 56. Toma de datos equivalente de arena de agregado fino	159
Tabla 57. Toma de datos angulosidad agregado fino	162
Tabla 58. Toma de datos extracción cuantitativa de asfalto, lavado de pavimento asfáltico reciclado 1	165
Tabla 59. Máxima diferencia de penetración	167
Tabla 60. Toma de datos penetración de materiales bituminosos	168
Tabla 61. Toma de datos carga de las partículas de emulsión asfáltica	171
Tabla 62. Toma de datos recubrimiento y adherencia de emulsión asfáltica	174
Tabla 63. Toma de datos viscosidad de Saybolt Furol para emulsión asfáltica	178
Tabla 64. Toma de datos porcentaje de residuo de asfalto por destilación	181
Tabla 65. Toma de datos peso específico aparente y peso unitario de mezclas asfálticas	184



Tabla 66. Toma de datos peso específico teórico máximo de mezclas asfálticas.....	187
Tabla 67. Porcentaje de vacíos de aire en mezclas asfálticas compactadas densas.....	190
Tabla 68. Resistencia a inmersión-compresión de mezclas asfálticas compactadas.....	193
Tabla 69. Estabilidad y flujo Marshall.....	197
Tabla 70. Resistencia a tracción indirecta de mezclas asfálticas compactadas.....	201
Tabla 71. Análisis volumétrico de mezclas asfálticas compactadas.....	204
Tabla 72. Análisis predictivo matemático del módulo de rigidez o dinámico.....	207
Tabla 73. Diseño de mezcla Marshall modificado, ficha de diseño de mezcla para 50% de agregado reciclado.....	211
Tabla 74. Proporción de agregados diseño de mezcla patrón (fase 1).....	215
Tabla 75. Proporción de agregados diseño de mezcla patrón (fase 2).....	216
Tabla 76. Límite mínimo, máximo y gradación de agregados, diseño para diseño de mezclas densas en frío MDF2, según manual EG-2013 MTC.....	216
Tabla 77. Peso unitario agregado grueso 1 sin compactar.....	219
Tabla 78. Cuadro resumen peso específico agregado grueso 1.....	220
Tabla 79. % de humedad agregado grueso 1.....	221
Tabla 80. Porcentaje de partículas fracturadas agregado grueso 1.....	223
Tabla 81. Método A, cantidad mínima de muestra en gramos según tamiz.....	223
Tabla 82. Método B, cantidad mínima de muestra en gramos según tamiz.....	223
Tabla 83. Resultados ensayos caras fracturadas agregado grueso 1.....	224
Tabla 84. % Porcentaje de partículas planas y alargadas.....	226
Tabla 85. Tabla 424-01(continuación), requisitos de los agregados pétreos para pavimento asfáltico en frío.....	226
Tabla 86. Cantidad de esferas y material de carga según método de ensayo definido.....	227
Tabla 87. Gradación de las muestras para el ensayo de desgaste de los ángeles.....	228
Tabla 88. Ensayo de desgaste de los ángeles para el agregado grueso 1.....	228
Tabla 89. Tabla 424-01, requisitos de los agregados pétreos para pavimento asfáltico en frío.....	229
Tabla 90. % de pérdida por durabilidad al sulfato de magnesio.....	231
Tabla 91. Cuadro resumen de resultados equivalente de arena de agregados finos ensayados.....	233
Tabla 92. Cuadro resumen angularidad de agregados finos ensayados.....	235



Tabla 93. Cuadro resumen porcentaje de asfalto en carpetas asfálticas recicladas.....	237
Tabla 94. Cuadro resumen penetración de asfalto.....	238
Tabla 95. Cuadro resumen carga de partículas de emulsión asfáltica.....	239
Tabla 96. Cuadro resumen recubrimiento y adherencia de emulsión asfáltica.....	240
Tabla 97. Cuadro resumen viscosidad Saybolt Furol para emulsión asfáltica.....	241
Tabla 98. Cuadro resumen residuo por destilación de emulsión asfáltica.....	243
Tabla 99. Briquetas diseñadas al 25% de agregado reciclado y 5.25% de emulsión asfáltica.....	243
Tabla 100. Factor de corrección K de temperatura del agua.....	245
Tabla 101. Peso específico y densidad de briquetas con agregado reciclado al 25% y 5.25% de emulsión asfáltica con temperatura del agua a 25°C.....	246
Tabla 102. Cuadro resumen peso específico y densidad de briquetas con agregado reciclado al 25% y 4.75%, 5.25%, 5.75%, 6.25% y 6.75% de emulsión asfáltica con temperatura del agua a 25°C.....	246
Tabla 103. Mezclas diseñadas al 33.33% de agregado reciclado y 4.75%, 5.25%, 5.75%, 6.25%, 6.75% de emulsión asfáltica para ensayo peso específico teórico máximo.....	248
Tabla 104. Cuadro resumen determinación peso específico máximo (Gmm) de la mezcla diseñada al 33.33% de agregado reciclado y 4.75%, 5.25%, 5.75%, 6.25%, 6.75% de Emulsión asfáltica.....	249
Tabla 105. Peso específico teórico máximo (Gmm) y peso específico aparente (Pea) de briquetas diseñadas al 50% de agregado reciclado y 4.75%, 5.25%, 5.75%, 6.25%, 6.75% de emulsión asfáltica para determinación de % de vacíos de aire (Pa).....	250
Tabla 106. Cuadro resumen determinación del porcentaje de vacíos de aire (Pa) de briquetas diseñadas al 50% de agregado reciclado y 4.75%, 5.25%, 5.75%, 6.25%, 6.75% de Emulsión asfáltica.....	251
Tabla 107. Briquetas de mezcla patrón para ensayo de estabilidad y flujo, al 4.75%, 5.25%, 5.75%, 6.25%, 6.75% de Emulsión asfáltica.....	253
Tabla 108. Cuadro resumen ensayo de estabilidad y flujo para mezcla patrón al 4.75%, 5.25%, 5.75%, 6.25%, 6.75% de Emulsión asfáltica.....	254
Tabla 109. Briquetas con agregado reciclado al 50% y emulsión asfáltica al 6% (óptimo) ensayo de inmersión - compresión.....	256



Tabla 110. Cuadro resumen ensayo de resistencia a inmersión - compresión para mezcla con agregado reciclado al 50%.....	258
Tabla 111. Briquetas con agregado reciclado al 25% y emulsión asfáltica al 6% (óptimo) ensayo de Resistencia a tracción indirecta.....	260
Tabla 112. Cuadro resumen ensayo de resistencia a tracción indirecta para mezcla con agregado reciclado al 25%.....	261
Tabla 113. Peso específico de la combinación de agregados (Gbs), porcentaje de agregados en la mezcla (Ps), peso específico aparente para briquetas compactadas con 50% de agregado reciclado.....	263
Tabla 114. Cuadro resumen ensayo calculo volumétrico: porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA) y porcentaje de vacíos llenos de asfalto (VFA).....	265
Tabla 115. Módulo de rigidez de la mezcla patrón a 0°C y frecuencias de 1, 3, 5, 10,20 determinadas de acuerdo al modelo matemático de predicción HWAING-WITCZA.....	270
Tabla 116A. Módulo de rigidez de la mezcla patrón a frecuencias de 1, 3, 5, 10,20 determinadas de acuerdo al modelo matemático de predicción WITCZAK.....	271
Tabla 116B. Gradación de agregados para mezclas densas en frío.....	273
Tabla 116C. Cálculo de las combinaciones granulométricas y la especificación granulométrica para mezclas densas en frío, Tipo MDF-2 (1).....	274
Tabla 116D. Cálculo de las combinaciones granulométricas y la especificación granulométrica para mezclas densas en frío, Tipo MDF-2 (2).....	275
Tabla 116E. Comprobación granulométrica de combinación de agregados para diseño de mezcla Patrón, para mezcla densa en frío Tipo MDF-2.....	276
Tabla 116F. Dosificación de materiales de una briqueta, para diseño de mezcla Patrón, expresado en porcentaje.....	282
Tabla 116G. Dosificación de materiales de una briqueta, para diseño de mezcla Patrón, expresado en peso.....	283
Tabla 117A. Dosificación de materiales para una mezcla de prueba de Densidad máxima teórica con mezcla suelta, para diseño de mezcla patrón, expresado en porcentaje.....	285
Tabla 117B. Dosificación de materiales para una mezcla de prueba de Densidad máxima teórica con mezcla suelta, para diseño de mezcla patrón, expresado en peso.....	285



Tabla 117C. Valores para el cálculo de la Gravedad específica Bulk, para la mezcla de diseño patrón, 4.75% de emulsión asfáltica.....	288
Tabla 117D. Valores para el cálculo de la Gravedad específica Bulk, para la mezcla de diseño patrón, 5.25% de emulsión asfáltica.....	288
Tabla 117E. Valores para el cálculo de la Gravedad específica Bulk, para la mezcla de diseño patrón, 5.75% de emulsión asfáltica.....	288
Tabla 117F. Valores para el cálculo de la Gravedad específica Bulk, para la mezcla de diseño patrón, 6.25% de emulsión asfáltica.....	289
Tabla 117G. Valores para el cálculo de la Gravedad específica Bulk, para la mezcla de diseño patrón, 6.75% de emulsión asfáltica.....	289
Tabla 117H. Datos para la determinación de la Densidad teórica máxima de la mezcla de diseño Patrón.....	290
Tabla 117I. Valores de Estabilidad y flujo determinados para el diseño de mezcla Patrón.....	292
Tabla 118A. Resumen de valores de Gravedad específica Bulk, Peso específico teórico máximo, % de vacíos, para el diseño de mezcla Patrón.....	294
Tabla 118B. Valores para el cálculo del porcentaje de vacíos en el agregado mineral VMA, para el diseño de mezcla Patrón.....	295
Tabla 118C. Valores para el cálculo del porcentaje de vacíos llenos de asfalto VFA, para el diseño de mezcla Patrón.....	297
Tabla 118D. Resumen de valores necesarios para el trazo de gráficos, para el diseño de mezcla Patrón.....	298
Tabla 118E. Comprobación entre los datos obtenidos y los criterios de método Marshall modificado, para el diseño de mezcla Patrón.....	304
Tabla 118F. Granulometría de agregado obtenido y especificación granulométrica MTC Tipo MDF-2, con 6% de emulsión asfáltica como óptimo.....	305
Tabla 118G. Banda de control para la fórmula de trabajo, según especificación MTC, para mezclas densas en frío Tipo MDF-2.....	306
Tabla 118H. Cuadro resumen de diseño de mezcla asfáltica en frío, para el diseño de mezcla Patrón, especificación de mezcla densa fría Tipo MDF-2.....	307
Tabla 119. Peso unitario y % de vacíos de agregado grueso.....	311
Tabla 120. Peso unitario y % de vacíos de agregado fino.....	312



Tabla 121. Peso específico de agregado grueso y fino.....	312
Tabla 122. Porcentaje de humedad agregados gruesos y finos.....	313
Tabla 123. Porcentaje de partículas fracturadas en el agregado grueso.....	314
Tabla 124. Partículas chatas y alargadas en agregados.....	314
Tabla 125. Porcentaje de abrasión en máquina de los ángeles.....	315
Tabla 126. % de pérdida por durabilidad al sulfato de magnesio.....	316
Tabla 127. Resultados equivalente de arena en porcentaje.....	317
Tabla 128. Resultados Angularidad de agregados finos utilizados.....	317
Tabla 129. % de asfalto en carpeta asfáltica reciclada.....	318
Tabla 130. Cuadro resumen ensayo de penetración en emulsión asfáltica curada.....	318
Tabla 131. Cuadro resumen carga de partículas emulsión asfáltica de rotura lenta.....	319
Tabla 132. Cuadro resumen recubrimiento y adherencia de emulsión asfáltica con agregados.....	319
Tabla 133. Cuadro resumen viscosidad Saybolt Furol para emulsión asfáltica de rotura lenta.....	320
Tabla 134. Cuadro resumen residuo por destilación de emulsión asfáltica de rotura lenta.....	320
Tabla 135. Peso específico aparente (Pea) y densidad promedio de mezclas asfálticas (δ) de la mezcla patrón y de las diferentes proporciones de agregado reciclado (25%, 33.33%, 50%).....	321
Tabla 136. Peso específico teórico máximo de la mezcla y de las diferentes proporciones de agregado reciclado (25%, 33.33%, 50%).....	323
Tabla 137. Porcentaje de vacíos de aire de la mezcla patrón y a de las diferentes proporciones de agregado reciclado (25%, 33.33%, 50%).....	324
Tabla 138. Estabilidad Marshall a diferentes porcentajes de emulsión asfáltica y proporción de agregados reciclados en la mezcla asfáltica.....	327
Tabla 139. Flujo Marshall a diferentes porcentajes de emulsión asfáltica y proporción de agregados en la mezcla asfáltica.....	329
Tabla 140. Estabilidad y flujo Marshall de la mezcla patrón y proporciones de agregado reciclado en función del óptimo de asfalto definido (6%).....	331
Tabla 141. Resistencia inmersión-compresión de la mezcla patrón y proporciones de agregado reciclado (25%, 33.33%, 50%), en función del óptimo de asfalto definido (6%).....	333
Tabla 142. Resistencia a tracción indirecta de la mezcla patrón y proporciones de agregado reciclado (25%, 33.33%, 50%), en función del óptimo de asfalto definido (6%).....	335



Tabla 143. Porcentaje de vacíos en el agregado mineral VMA de la mezcla patrón y de las diferentes proporciones de agregado reciclado (25%, 33.33%, 50%)..... 337

Tabla 144. Porcentaje de vacíos llenos de asfalto VFA de la mezcla patrón y de las diferentes proporciones de agregado reciclado (25%, 33.33%, 50%)..... 340

Tabla 145. Porcentaje de vacíos de agregado mineral VMA y porcentaje de vacíos llenos de asfalto VFA en función del porcentaje óptimo de emulsión asfáltica (6%)..... 342

Tabla 146. Resultados de la determinación por ecuaciones de predicción matemática del módulo de rigidez (Método correlacional) de la mezcla asfáltica compactada diseñado con agregados reciclados y emulsión asfáltica de rotura lenta, modelo 1 344

Tabla 147. Resultados de la determinación por ecuaciones de predicción matemática del módulo de rigidez (Método correlacional) de la mezcla asfáltica compactada diseñado con agregados reciclados y emulsión asfáltica de rotura lenta, modelo 2..... 345

Tabla 148. Predicción matemática módulo de rigidez a 20°C y 10 Hz modelo 1; HWAING-WITCZAK..... 345

Tabla 149. Predicción matemática del módulo de rigidez a 20°C y 10 Hz modelo 2; WITCZAK.... 346

Tabla 150A. Combinación de agregados definido para el diseño de mezcla patrón, de acuerdo a la especificación MTC, mezclas densas en frío MDF-2..... 347

Tabla 150B. Parámetros de diseño para el diseño de mezcla Patrón..... 347

Tabla 150C. Fórmula de trabajo para el diseño de mezcla Patrón..... 348

Tabla 151A. Combinación de agregados definido para el diseño de mezcla con 25% de agregado reciclado, de acuerdo a la especificación MTC, mezclas densas en frío MDF-2..... 348

Tabla 151B. Parámetros de diseño para el diseño de mezcla con 25% de agregado reciclado..... 349

Tabla 151C. Fórmula de trabajo para el diseño de mezcla con 25% de agregado reciclado..... 349

Tabla 152A. Combinación de agregados definido para el diseño de mezcla con 33.33% de agregado reciclado, de acuerdo a la especificación MTC, mezclas densas en frío MDF-2..... 350

Tabla 152B. Parámetros de diseño para el diseño de mezcla con 33.33% de agregado reciclado..... 350

Tabla 152C. Fórmula de trabajo para el diseño de mezcla con 33.33% de agregado reciclado..... 351



Tabla 153A. Combinación de agregados definido para el diseño de mezcla con 50% de agregado reciclado, de acuerdo a la especificación MTC, mezclas densas en frío MDF-2..... 351

Tabla 153B. Parámetros de diseño para el diseño de mezcla con 50% de agregado reciclado..... 352

Tabla 153C. Fórmula de trabajo para el diseño de mezcla con 50% de agregado reciclado..... 352

Tabla 154. Resumen comparativo resultados finales estabilidad y flujo..... 352

Tabla 155. Resumen comparativo resultados finales inmersión-compresión..... 353

Tabla 156. Resumen comparativo resultados finales tracción indirecta..... 353

Tabla 157. Resumen comparativo resultados finales módulo de rigidez..... 353

Tabla 158. De la tabla 424-01 requerimientos de los agregados pétreos para pavimento asfáltico en frío..... 373

Tabla 159. De la tabla 424-01 (continuación) requerimientos de los agregados pétreos para pavimento asfáltico en frío..... 373

Tabla 160. De la tabla 415-04 especificaciones para emulsiones catiónicas..... 374

Tabla 161. Parámetros Marshall para mezclas en frío, con emulsiones asfálticas..... 374

Tabla 162. Valores referentes para ensayo Marshall..... 376

Tabla 163. Valores referentes para el ensayo de Tracción indirecta..... 376

Tabla 164. Valores referentes para el ensayo de Inmersión-compresión..... 377

Tabla 165. Valores referentes para el ensayo de Módulo dinámico..... 377

Tabla 166. Índice de condición de pavimento PCI..... 382

Tabla 167. De la tabla 730-1 (continuación) tabla de números aleatorios..... 384

Tabla 168. De la tabla 437-02 Requisitos agregado grueso de adición en mezclas recicladas en frío..... 385

Tabla 169. De la tabla 437-03 requisitos de agregados finos de adición en mezclas recicladas en frío..... 385

Índice de Figuras.

	Pág.
Figura 1. Cusco, tipo de superficie de la red vial departamental, 2015 (como % del total).....	1
Figura 2. Vista de pavimento flexible.....	16
Figura 3. Partes de la carpeta asfáltica.....	17
Figura 4. Contenido de óxidos alcalinos, alcalinos térreos, silicatos y feldespatos de los agregados.....	20
Figura 5A. Tipos de asfalto según origen del petróleo y según su aplicación.....	24
Figura 5B. Esquema para la fabricación de la emulsión asfáltica	25
Figura 6. Esquema de una emulsión asfáltica.....	25
Figura 7. Ruptura de una emulsión asfáltica sobre un material pétreo.....	27
Figura 8. Dispersión de glóbulos y orientación del emulsificante en el glóbulo del ligante.....	28
Figura 9. La gráfica muestra el VMA de una briqueta asfáltica compactada.....	35
Figura 10. Representación de la composición típica de una mezcla asfáltica.....	36
Figura 11a. Curvas Fuller de máxima densidad basadas en gráfico normalizado semi-log de granulometría.....	41
Figura 11b. Curva de densidad máxima, basado en un gráfico FHWA (potencia de 0.45), de granulometría.....	42
Figura 11c. Gráfico de gradación de la especificación y su media; así como la gradación de los dos agregados combinados.....	48
Figura 11d. Flujo metodológico de diseño de mezcla Marshall modificado.....	51
Figura 12. Esquema de una partícula fracturada.....	58
Figura 13. Máquina de abrasión de “los Ángeles”.....	60
Figura 14. Aguja para prueba de penetración.....	64
Figura 15. Viscosímetro Saybolt con orificio universal y Furol.....	66
Figura 16. Tubo en forma de pipeta para usarlo con el viscosímetro Saybolt	67
Figura 17. Esquema metodológico de diseño de mezcla Marshall modificado.....	81
Figura 18. Flujograma de diseño de ingeniería de aplicación en la presente tesis.....	89
Figura 19. Plano de localización y ubicación de fuente de agregado reciclado N°1.....	91
Figura 20. Plano de localización y ubicación de fuente de agregado reciclado N° 2.....	92
Figura 21. Plano de localización y ubicación de fuente de agregado grueso.....	93

Figura 22. Plano de localización y ubicación de fuente de agregados gruesos y finos, planta de asfaltos plan COPESCO-Gobierno Regional Cusco.....	94
Figura 23. Cuadrantes para la toma aleatoria de muestras de un camión cargado.....	98
Figura 24. Trabajo de tamizado de agregados, se observa juego de tamices, herramientas, material tamizado en bolsas, al fondo equipo de tamizado mecánico.....	130
Figura 25. Trabajo de pesado y separación de agregados así como su registro.....	131
Figura 26. Se observa equipo de tamizado mecánico, juego de tamices y herramientas, así como agregado separado en bolsas.....	131
Figura 27. Enrazado compactado y sin compactar con varilla de 5/8” de agregado grueso.....	134
Figura 28. Pesado de agregado compactado en molde de 6” para hallar peso unitario.....	134
Figura 29. Ensayo peso específico de agregado fino, utilizando bomba de vacío, agregado fino 1 y 2.....	138
Figura 30. Ensayo peso específico de agregado fino, utilizando bomba de vacío, agregados reciclados de pavimento 1 y 2.....	138
Figura 31. Secado de agregado grueso en horno para ser puesto a la intemperie (determinación de humedad).....	141
Figura 32. Agregado grueso de cantera mostrando caras fracturadas.....	145
Figura 33. Agregado reciclado de pavimento mostrando caras fracturadas.....	145
Figura 34. .Equipo de ensayo de planicidad, alargamiento y combinado; así como su forma de utilización.....	149
Figura 35. Operación de carga, descarga, lavado y tamizado en malla N°10 de agregado grueso, E. de los ángeles.....	152
Figura 36. Preparación de solución de sulfato de magnesio, incubación y colado de 28 muestras... ..	155
Figura 37. Proceso de análisis y prueba de equivalente de arena.....	158
Figura 38. A la izquierda, equipo de ensayo de angularidad que consta de un recipiente cilíndrico de volumen y peso conocido y un embudo; derecha, equipo cargado antes de realizar el ensayo.....	161
Figura 39. A la izquierda, Ensayo en ejecución, llenado de recipiente con el agregado al ras; derecha, pesado de la muestra enrasada en el recipiente de volumen y peso conocido,.....	161
Figura 40 Se observa equipo de lavado centrífugo de asfalto, pesado de pavimento asfáltico reciclado, carga del mismo en el equipo de centrifugado.....	164

Figura 41. Se observa equipo de penetración y realización del ensayo a 25°C.....	167
Figura 42. Emulsión aniónica (partículas con carga negativa).....	170
Figura 43. Carga de partículas de la emulsión y equipo utilizado, se aprecia recubrimiento en el ánodo por lo que la emulsión es aniónica.....	170
Figura 44. Se muestra el cubrimiento y adherencia de los agregados gruesos, así como el equipo y materiales utilizados.....	173
Figura 45. Viscosímetro Saybolt con orificio universal y Furol.....	177
Figura 46. Izquierda equipo de ensayo viscosímetro Saybolt Furol; derecha, salida del viscosímetro llenando el picnómetro de 60 ml. Se controla el tiempo de aforo.....	177
Figura 47. Izquierda, aparato para destilación de emulsiones asfálticas, derecha, Equipo rotavapor también para destilación de asfalto y otros fluidos.....	180
Figura 48. Briquetas sumergidas en baño maría, la inmersión es en la balanza de flotabilidad, el secado superficial, grupo de briquetas ensayadas al 25% de agregado reciclado.....	183
Figura 49. Muestras preparadas de mezclas asfálticas patrón, agregados reciclados al 25%, 33.33%, 50%; ensayo de peso específico máximo con bomba de vacío.....	186
Figura 50. Se observa los elementos para determinar el % de vacíos, Ensayo de Peso Específico aparente con briquetas sumergidas y los de Peso Específico máximo en platos descartables.....	189
Figura 51. Extracción de briquetas en el eyector muestras compactadas, sometimiento de briqueta a carga por compresión, equipo de compresión.....	192
Figura 52. Briquetas de ensayo marcadas para ensayo en equipo estabilidad y flujo Marshall, control de temperatura en baño maría de las briquetas de ensayo.....	195
Figura 53. Equipo Marshall cargado con la briqueta de ensayo, al costado el resultado del ensayo, abajo el retiro de la briqueta ensayada y como queda esta después del ensayo.....	196
Figura 54. Compactador Marshall y la operación de carga de la briqueta a compactar, se observa la falla transversal de la briqueta sometida a tracción indirecta, así como las mordazas y el proceso de carga para tracción indirecta.....	200
Figura 55. Ensayo de peso específico para agregados finos, secado superficial de agregados gruesos para determinación de peso específico y de todos los agregados gruesos utilizados.....	203
Figura 56. Se observa a la izquierda los apuntes de las formula del modelo de HWAING-WITCZAK, a la derecha la digitalización de aplicación en hoja Excel de las mismas.....	206



Figura 57. Se observa pesado de la mezcla de agregados con 50% de agregado reciclado, incorporación de emulsión asfáltica a la mezcla , proceso antes y después del mezclado, previo a la compactación..... 210

Figura 58. Densidad mezcla reciclada 25%..... 246

Figura 59. Porcentaje de vacío de aire y porcentaje óptimo de emulsión asfáltica en mezcla con agregado reciclado al 50%..... 251

Figura 60. Estabilidad de la mezcla asfáltica patrón en función del porcentaje óptimo de emulsión asfáltica (6%)..... 254

Figura 61. Flujo de la mezcla asfáltica patrón en función del porcentaje óptimo de emulsión asfáltica (6%)..... 254

Figura 62. Resistencia a la compresión simple de mezclas con emulsión asfálticas al 50% de agregado reciclado en estado seco y sumergido (inmersión 24 horas a 60°C)..... 268

Figura 63. Resistencia a tracción indirecta de mezclas con emulsión asfálticas al 25% de agregado reciclado en estado seco y sumergido (inmersión 24 horas a 60°C)..... 262

Figura 64. Grafica de análisis volumétrico VMA al 50% de agregado reciclado..... 265

Figura 65. Grafica de análisis volumétrico VFA al 50% de agregado reciclado..... 265

Figura 66. Se observa la curva a diferentes frecuencias y los límites de carga acumuladas repetitivas a 0°C..... 270

Figura 67A. Resultados ensayo Marshall modificado, % de Vacíos & % óptimo de emulsión asfáltica (6%), mezcla de diseño Patrón..... 299

Figura 67B. Resultados ensayo Marshall modificado, % VMA & % óptimo de emulsión asfáltica (6%), mezcla de diseño Patrón..... 300

Figura 68A. Resultados ensayo Marshall modificado, % VFA & % óptimo de emulsión asfáltica (6%), mezcla de diseño Patrón..... 300

Figura 68B. Resultados ensayo Marshall modificado, Densidad & % óptimo de emulsión asfáltica (6%), mezcla de diseño Patrón..... 301

Figura 69A. Resultados ensayo Marshall modificado, Estabilidad & % óptimo de emulsión asfáltica (6%), mezcla de diseño Patrón..... 301

Figura 69B. Resultados ensayo Marshall modificado, Flujo & % óptimo de emulsión asfáltica (6%), mezcla de diseño Patrón..... 302



Figura 70A. Banda determinada del producto de la combinación de agregados para el diseño de mezcla Patrón.....	308
Figura 70B. Banda determinada del producto de la combinación de agregados para el diseño de mezcla con 25% de agregado reciclado.....	308
Figura 70C. Banda determinada del producto de la combinación de agregados para el diseño de mezcla con 33.33% de agregado reciclado.....	309
Figura 70D. Banda determinada del producto de la combinación de agregados para el diseño de mezcla con 50% de agregado reciclado.....	309
Figura 71. Determinación de la densidad de la mezcla patrón respecto al porcentaje óptimo de emulsión (6%).....	321
Figura 72. Determinación de la densidad de la mezcla asfáltica con agregado reciclado al 25% respecto al porcentaje óptimo de emulsión (6%).....	322
Figura 73. Determinación de la densidad de la mezcla asfáltica con agregado reciclado al 33.33% respecto al porcentaje óptimo de emulsión (6%).....	322
Figura 74. Determinación de la densidad de la mezcla asfáltica con agregado reciclado al 50% respecto al porcentaje óptimo de emulsión (6%).....	322
Figura 75. Determinación del porcentaje óptimo de emulsión asfáltica de la mezcla patrón respecto al porcentaje promedio de vacíos de aire.....	324
Figura 76. Determinación del porcentaje óptimo de emulsión asfáltica de la mezcla con agregado reciclado al 25% respecto al porcentaje promedio de vacíos de aire.....	325
Figura 77. Determinación del porcentaje óptimo de emulsión asfáltica de la mezcla con agregado reciclado al 33.33% respecto al porcentaje promedio de vacíos de aire.....	325
Figura 78. Determinación del porcentaje óptimo de emulsión asfáltica de la mezcla con agregado reciclado al 50% respecto al porcentaje promedio de vacíos de aire.....	326
Figura 79. Determinación de la estabilidad con referencia al porcentaje óptimo de emulsión asfáltica (6%) de la mezcla patrón.....	327
Figura 80. Determinación de la estabilidad con referencia al porcentaje óptimo de emulsión asfáltica (6%) de la mezcla con agregado reciclado al 25%.....	328
Figura 81. Determinación de la estabilidad con referencia al porcentaje óptimo de emulsión asfáltica (6%) de la mezcla con agregado reciclado al 33.33%.....	328



Figura 82. Determinación de la estabilidad con referencia al porcentaje óptimo de emulsión asfáltica (6%) de la mezcla con agregado reciclado al 50%..... 328

Figura 83. Determinación del flujo con referencia al porcentaje óptimo de emulsión asfáltica (6%) de la mezcla patrón..... 330

Figura 84. Determinación del flujo con referencia al porcentaje óptimo de emulsión asfáltica (6%) de la mezcla con agregado reciclado al 25%..... 330

Figura 85. Determinación del flujo con referencia al porcentaje óptimo de emulsión asfáltica (6%) de la mezcla con agregado reciclado al 33.33%..... 330

Figura 86. Determinación del flujo con referencia al porcentaje óptimo de emulsión asfáltica (6%) de la mezcla con agregado reciclado al 50%..... 331

Figura 87. Estabilidad de la mezcla patrón y de las proporciones de agregado reciclado (25%, 33.33%, 50%), en función al óptimo de emulsión asfáltica definido..... 332

Figura 88. Flujo de la mezcla patrón y de las proporciones de agregado reciclado (25%,33.33%,50%), en función al óptimo de emulsión asfáltica definido..... 332

Figura 89. Resistencia a la compresión en seco de la mezcla patrón y de las proporciones de agregado reciclado (25%, 33.33%, 50%), en función al óptimo de emulsión asfáltica definido..... 334

Figura 90. Resistencia a la compresión en húmedo de la mezcla patrón y de las proporciones de agregado reciclado (25%,33.33%, 50%), en función al óptimo de emulsión asfáltica definido..... 334

Figura 91. Resistencia a la tracción indirecta en seco de la mezcla patrón y de las proporciones de agregado reciclado (25%, 33.33%, 50%), en función al óptimo de emulsión asfáltica definido... 336

Figura 92. Resistencia a la tracción indirecta en húmedo de la mezcla patrón y de las proporciones de agregado reciclado (25%, 33.33%, 50%), en función al óptimo de emulsión asfáltica definido (6%)..... 336

Figura 93. Determinación grafica de vacíos de agregado mineral VMA de la mezcla patrón en función del óptimo de emulsión asfáltica (6%)..... 338

Figura 94. Determinación grafica de vacíos de agregado mineral VMA de la mezcla con agregado reciclado al 25%, en función del óptimo de emulsión asfáltica (6%)..... 338

Figura 95. Determinación grafica de vacíos de agregado mineral VMA de la mezcla con agregado reciclado al 33.33%, en función del óptimo de emulsión asfáltica (6%)..... 338

Figura 96. Determinación grafica de vacíos de agregado mineral VMA de la mezcla con agregado reciclado al 50%, en función del óptimo de emulsión asfáltica (6%)..... 339



Figura 97. Determinación grafica de vacíos llenos de asfalto VFA de la mezcla patrón en función del óptimo de emulsión asfáltica (6%)..... 340

Figura 98. Determinación grafica de vacíos llenos de asfalto VFA de la mezcla con agregado reciclado al 25%, en función del óptimo de emulsión asfáltica (6%)..... 341

Figura 99. Determinación grafica de vacíos llenos de asfalto VFA de la mezcla con agregado reciclado al 33.33%, en función del óptimo de emulsión asfáltica (6%)..... 341

Figura 100. Determinación grafica de vacíos llenos de asfalto VFA de la mezcla con agregado reciclado al 50%, en función del óptimo de emulsión asfáltica (6%)..... 341

Figura 101. Porcentaje de vacíos de agregado mineral VMA de la mezcla patrón y de los diferentes porcentajes de agregado reciclado (25%, 33.33%, 50%), en función al óptimo de emulsión asfáltica (6%)..... 342

Figura 102. Porcentaje de vacíos llenos de asfalto VFA de la mezcla patrón y de los diferentes porcentajes de agregado reciclado (25%, 33.33%, 50%), en función al óptimo de emulsión asfáltica (6%)..... 343

Figura 103. Pasos para la medición del PCI..... 381

Figura 104. Gráfico del valor de deducción corregido VDC..... 382

1. Capítulo I: Planteamiento del Problema.

1.1. Identificación del problema.

1.1.1. Descripción del problema.

La red vial del departamento de Cusco, comprende un total de 15,386.36 km, 12 % son vías nacionales, 17 % vías departamental y 71% vías vecinales o locales.

Respecto al estado de conservación y calidad de las vías, solo el 12 % se encuentran asfaltadas, 16% afirmadas y el 72% se encuentra en mal estado (8% sin afirmar y 64 % a nivel de trocha).

Revisando esta misma información por tipo de red en el departamento de Cusco, se observa que la vía nacional está asfaltada a un 65%, a diferencia de las departamentales con 21% asfaltadas y vecinales con 1% respectivamente, como se observa en el gráfico.

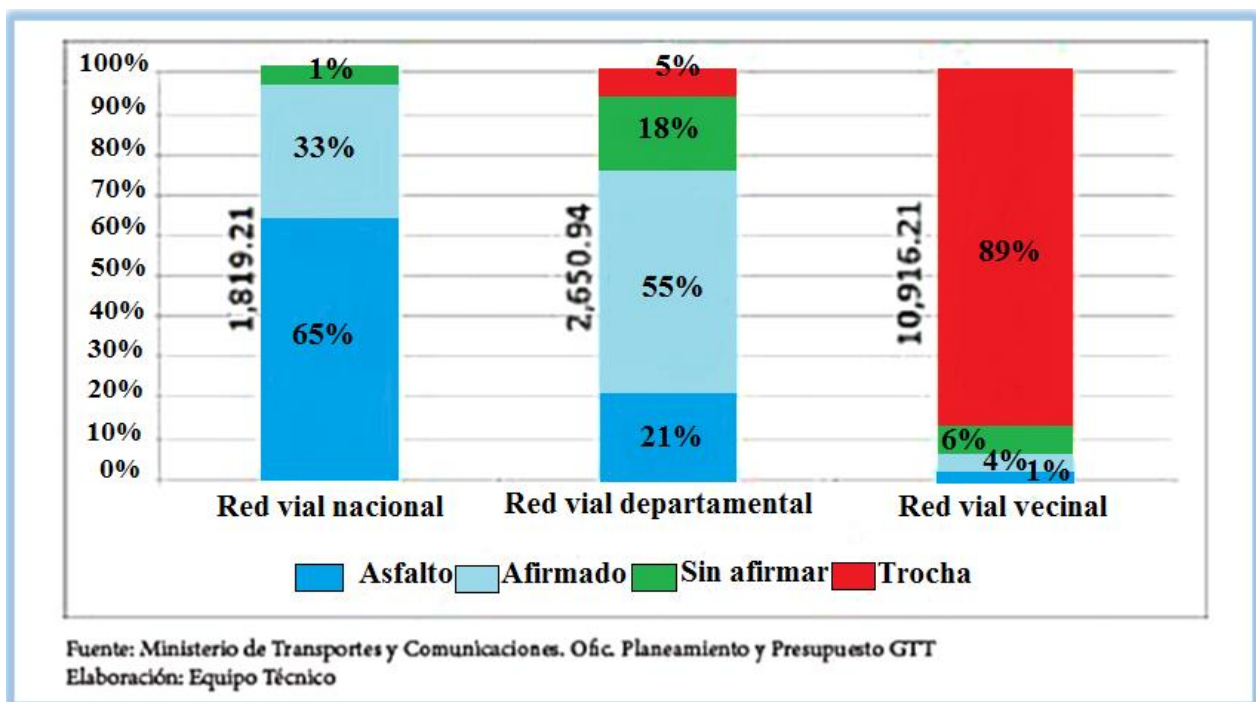


Figura 1. Cusco, Tipo de superficie de la Red Vial Departamental, 2015 (como % del total), (Fuente: Plan de Desarrollo Regional Concertado Cusco al 2021 con Prospectiva al 2030).

Tabla 1A. Red vial nacional, según superficie a julio 2018.

Departamento	Kilómetros Existentes por Tipo de Superficie de rodadura							Total Existente	Proyectada	Total
	Pavimentada			No Pavimentada			Sub Total			
	Asfaltada	Solución Básica	Sub Total	Afirmada	Sin Afirmar	Trocha				
Total	14894.30	6115.10	21009.40	3810.10	750.60	1401.10	5961.80	26971.20	1859.00	288310.20
Amazonas	324.90	527.00	851.90	0.00	0.00	0.00	0.00	851.90	31.90	883.80
Áncash	900.70	323.00	1223.60	621.70	17.00	31.10	669.80	1893.40	69.20	1962.60
Apurímac	553.00	278.80	831.80	396.70	41.00	11.60	449.30	1281.10	0.00	1281.00
Arequipa	1125.30	90.20	1215.60	97.20	184.30	0.00	281.50	1497.10	0.00	1497.10
Ayacucho	709.30	931.60	1641.00	160.00	0.00	0.00	160.00	1801.00	0.00	1801.00
Cajamarca	1037.30	419.60	1456.90	191.40	77.60	13.10	282.10	1739.00	0.00	1738.90
Callao	43.40	0.00	43.40	0.00	0.00	0.00	0.00	43.40	15.00	44.90
Cusco	1043.60	579.00	1622.60	355.50	74.20	4.70	434.40	2057.00	404.40	2461.40

Fuente: Boletín estadístico infraestructura vial I semestre 2018 MTC.

Si analizamos la **Tabla 1A**, dividiendo la columna de vía **Asfaltada** entre la columna **Total existente** multiplicado por 100% para la **fila del Departamento del Cusco**, tenemos que solo el **50.73%** de la vía nacional en la Región Cusco está asfaltada (Análisis propio).

Tabla 1B. Red vial departamental, según superficie a julio 2018.

Departamento	Kilómetros Existentes por Tipo de Superficie de rodadura					Total Existente	Proyectada	Total
	Pavimentada		No Pavimentada					
	Afirmada	Sin Afirmar	Trocha	Sub Total				
Total	3707.50	16601.90	3202.60	4003.40	23807.90	27515.40	4693.40	32208.70
Amazonas	31.30	21.60	478.70	214.90	715.20	746.50	15.90	762.50
Áncash	482.80	712.80	0.50	22.60	735.90	1218.70	0.00	1218.60
Apurímac	9.10	1246.60	0.00	6.20	1252.80	1261.90	182.20	1444.10
Arequipa	571.00	446.00	538.90	183.00	1167.90	1738.90	34.10	1773.00
Ayacucho	264.80	1513.40	75.60	0.00	1589.00	1853.80	96.10	1949.90
Cajamarca	31.80	551.30	266.40	37.00	854.70	886.50	16.50	902.90
Cusco	565.30	2134.40	26.30	76.60	2237.30	2802.60	251.60	3054.20

Fuente: Boletín estadístico infraestructura vial I semestre 2018 MTC.

Si analizamos la **Tabla 1B**, dividiendo la columna de vía **Pavimentada** entre la columna de **Total existente** multiplicado por 100% para **fila del Departamento del Cusco**, tenemos que solo el **20.17%** de las vías provinciales en la Región Cusco está pavimentada (Análisis propio).

Tabla 1C. Red vial vecinal, según superficie a julio 2018.

Departamento	Kilómetros Existentes por Tipo de Superficie de rodadura							
	Pavimentada	No Pavimentada			Sub Total	Total Existente	Proyectada	Total
		Afirmada	Sin Afirmar	Trocha				
Total	1880.70	27690.30	26585.60	56079.00	110354.90	112235.60	124.50	112360.10
Amazonas	0.00	994.40	535.40	209.10	1738.90	1738.90	0.00	1738.90
Áncash	112.40	1419.40	1602.50	4527.10	7549.00	7661.40	0.00	7661.40
Apurímac	7.30	887.30	1532.10	2520.00	4939.40	4946.70	0.00	4946.70
Arequipa	402.30	818.70	321.00	4617.50	5757.20	6159.50	7.60	6167.10
Ayacucho	18.90	1852.40	2484.70	4329.20	8666.30	8685.20	9.00	8694.20
Cajamarca	39.80	4395.20	1781.90	5825.40	12002.50	12042.30	23.90	12066.20
Cusco	124.60	3471.40	2045.30	5044.20	10560.90	10685.50	25.40	10710.90

Fuente: Boletín estadístico infraestructura vial I semestre 2018 MTC.

Si analizamos la **Tabla 1C**, dividiendo la columna de vía **Pavimentada** entre la columna de **Total existente** multiplicado por 100% para la **fila del Departamento del Cusco**, tenemos que solo el **1.16%** de las vías distritales o vecinales en la Región Cusco está pavimentada (Análisis propio).

(**Salazar L. 2011**), actualmente el uso de RAP (Pavimentos asfálticos Reciclados) se ha convertido en una opción muy conveniente para generar lo que se conoce como carreteras sostenibles. En ese sentido el empleo de RAP promete un menor consumo de recursos naturales y energía, ya que la reducción del calor necesario para la fabricación de mezclas asfálticas en caliente hace más sostenible el uso de estos pavimentos asfálticos.

(**López Chegne V. 2016**) Existen valiosas experiencias en países europeos como Alemania, Países Bajos, Dinamarca y Suiza, donde el reciclado de pavimentos es ya un procedimiento habitual. En España a partir de los 90 el reciclado de pavimentos con emulsiones asfálticas ha ido creciendo. En Estados Unidos se utiliza el 80% del pavimento asfáltico que se fresa cada año en los proyectos de ensanchamiento y rehabilitación de carreteras.

En Argentina el RAP (Pavimento asfáltico reciclado) se emplea mayormente, para la rehabilitación de los pavimentos en capas asfálticas con espesores mayores a 4 cm o como capas de base en la cual se realiza un fresado de la carpeta de rodamiento junto con la base granular.



De acuerdo a la encuesta realizada entre el 01 y 06 de abril del 2019 a estudiantes de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil que cursan los últimos ciclos de estudio, sobre si conocen o no el uso y aplicaciones de Emulsiones Asfálticas, nos indica que solo el 20% tiene una idea clara de uso y aplicaciones de las Emulsiones Asfálticas, mostrando la relevancia del presente estudio.

(Franco E. (2012). Estudio Comparativo Entre Mezclas Asfálticas con Diluido Rc-250 y Emulsión (Tesis Licenciatura). Universidad de Piura. Perú; En una de sus conclusiones da como satisfactorio sus resultados de emulsiones asfálticas y que esta reúne mejores características con relación a una mezcla diluida en caliente; del mismo modo.

(Hernández P. (2014). Evaluación del Comportamiento Mecánico de Mezclas Asfálticas Utilizando Pavimento reciclado, ligante Hidráulico y emulsión Asfáltica. (Tesis Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá); En una de sus conclusiones dice: Es pertinente que la mezcla reciclada en frío con adición de cemento presenta buena competencia mecánica relativa a mezclas en caliente y a los parámetros mínimos de las especificaciones técnicas.

1.1.2. Formulación del problema.

1.1.2.1. Formulación interrogativa problema general.

¿En qué medida han diferido los valores de las magnitudes de las propiedades físico-mecánicas definidas, de la mezcla asfáltica en frío, elaborado con agregados reciclados y emulsión asfáltica de rotura lenta, en referencia a la mezcla patrón y si estos se encontraron dentro de los valores mínimos requeridos?

1.1.2.2. Formulación interrogativa problemas específicos.

1.1.2.2.1. Formulación interrogativa problema específico N° 1.

¿En qué medida han diferido los valores de las magnitudes: **Estabilidad y Flujo**, de la mezcla asfáltica en frío, elaborado con agregados reciclados y emulsión asfáltica de rotura lenta, en referencia a la mezcla patrón y si estos se encontraron dentro de los valores mínimos requeridos?



1.1.2.2.2. Formulación interrogativa problema específico N° 2.

¿En qué medida ha diferido el valor de la magnitud: **Resistencia a Inmersión - Compresión**, de la mezcla asfáltica en frío, elaborado con agregados reciclados y emulsión asfáltica de rotura lenta, en referencia a la mezcla patrón y si este se encontró dentro de los valores mínimos requeridos?

1.1.2.2.3. Formulación interrogativa problema específico N° 3.

¿En qué medida ha diferido el valor de la magnitud: **Resistencia a Tracción Indirecta**, de la mezcla asfáltica en frío, elaborado con agregados reciclados y emulsión asfáltica de rotura lenta, en referencia a la mezcla patrón y si este se encontró dentro de los valores mínimos requeridos?

1.1.2.2.4. Formulación interrogativa problema específico N° 4.

¿En qué medida ha diferido el valor de la magnitud: **Módulo de Rigidez**, de la mezcla asfáltica en frío, elaborado con agregados reciclados y emulsión asfáltica de rotura lenta, en referencia a la mezcla patrón, y si este se encontró dentro de los valores mínimos requeridos?

1.2. Justificación e importancia de la investigación.

1.2.1. Justificación técnica.

Este trabajo de investigación de tesis se justifica desde el punto de vista técnico, porque se desarrolló, revisó y consolidó, los aspectos teóricos del área de pavimentos, específicamente lo referente a **mezclas asfálticas en frío con agregados reciclados y emulsión asfáltica de rotura lenta**, en el cual se evaluó los valores de las magnitudes de las propiedades físico-mecánicas de acuerdo a la variación de proporciones, se estudió las características físicas de los agregados nuevos, reciclados y de la emulsión asfáltica, definimos las condiciones físico-mecánicas que puede soportar las mismas y si estas se encuentra dentro de las especificaciones y normas técnicas vigentes.

Utilidad Metodológica.

Si es de utilidad, porque se planteó una secuencia de fabricación de una mezcla asfáltica a partir de agregados pétreos, pavimento asfáltico reciclado RAP y emulsión asfáltica; para ello se desarrolló tablas Excel de gran funcionalidad que ayudaron a simplificar la toma y análisis de datos,



se desarrolló un esquema de comparación con software estadístico, Mediante este análisis se planteó una secuencia estadística de resultados programables que ayudó a tener un nuevo enfoque en relación al diseño de mezclas en pavimentos más afines y mayor relevancias en diseño de mezclas asfálticas en frío, también se Planteó un flujograma de diseño de mezcla para las condiciones propuestas.

1.2.2. Justificación social.

Los primeros beneficiarios son los estudiantes de la Universidad Andina del Cusco, porque a partir de los pasos metodológicos, pruebas realizadas y fundamento teórico aplicado, tienen una base para continuar las investigaciones que se espera aportar con este estudio, además de replicarlo en otros contextos y proponer otras alternativas de estudio en base a la misma, así también puede ser útil para otras investigaciones, con otros estudiantes, investigadores, profesionales de otras universidades, instituciones y particulares de la Región del País y del mundo, que también pueden revisar esta investigación y considerarla en sus propios trabajos.

1.2.3. Justificación por viabilidad.

Dentro de la justificación por viabilidad del trabajo de tesis de investigación se puede afirmar que:

- Se tuvo la disponibilidad de tiempo suficiente para desarrollar todos los Ítems del trabajo de tesis de investigación.
- Se contó con recursos económicos y financieros suficientes para desarrollar la tesis de investigación en lo referente a los ensayos de laboratorio (asfalto y agregado). Además se dispuso de los laboratorios de Materiales, Suelos y Asfaltos de la Universidad Andina del Cusco y del Laboratorio de Estudios Especiales del Ministerio de Transportes y Comunicaciones – Sede Lima.
- Se desarrolló y cumplió la fase de ensayos, pruebas y resultados en el plazo previsto de 5 meses y se concluyó el trabajo de investigación de tesis en 9 meses, sin mayores inconvenientes.
- También se contó con un nutrido material bibliográfico, además de tesis de investigación descargadas de repositorio de Tesis de diferentes Universidades de América Latina.
- Finalmente también se tuvo a disposición las Normas Técnicas Peruanas referentes a materiales específicamente para Pavimentos como el “Manual de Materiales EM-2000 Edición 2016 MTC” y “Manual de Carreteras Especificaciones Técnicas Generales para Construcción EG-



2013 MTC”, normas de Construcción e Instalaciones de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes Mexicanas, Instituto del Asfalto: Americano, Colombiano, Chileno y Argentino.

1.2.4. Justificación por relevancia.

¿Es relevante la investigación de tesis?, Sí porque en nuestra Región son pocos los trabajos o investigaciones realizadas utilizando mezclas asfálticas en frío y mucho menos uso de agregados reciclados probados con emulsiones asfálticas, por tanto es una alternativa constructiva y tecnológica que puede reducir recursos, costos y tiempos.

Implicación Práctica.

¿Ayudará a resolver algún problema real?, ¿Tiene implicaciones trascendentales para una amplia gama de problemas prácticos?

Sí, porque se plantó una dosificación adecuada de los agregados nuevos y reciclados con la emulsión asfáltica, además de un flujograma adecuado a estos diseños.

1.3. Limitaciones de investigación.

El estudio se limitó a:

- Análisis de las propiedades físicas de agregados gruesos y finos extraídos de la carpeta asfáltica reciclada (RAP) de la Av. 24 de junio y Av. T.C. Gordon Magné de la Urbanización Santa Rosa del distrito de Wánchaq de la Provincia del Cusco, los ensayos realizados fueron:
 - Análisis granulométrico de agregado grueso, fino y reciclado, Norma MTC E-204.
 - Peso unitario y porcentaje de vacíos, Norma MTC E-203.
 - Peso específico y absorción de agregado grueso y fino, Norma MTC E-205 y E-206.
 - Porcentaje de humedad de agregados finos y grueso, Norma MTC E-215.
 - Determinación del porcentaje de caras fracturadas, Norma MTC E-210.
 - Partículas chatas y alargadas en agregados, Norma MTC E-223.



- Desgaste de agregado abrasión de los ángeles, Norma MTC E-207.
 - Durabilidad a sulfato de sodio y/o magnesio de agregados, Norma MTC E-209.
 - Equivalente de arena de agregado fino, Norma MTC E-114.
 - Angularidad de agregado fino, Norma MTC E-222.
 - Extracción cuantitativa de asfalto, Norma MTC E-502.
-
- Análisis de las propiedades físicas de agregados gruesos y finos acopiados de las canteras de Huillque y Quelloventanayoc del distrito de Ancahuasi, Provincia de Anta y de la planta de asfaltos de COPESCO Gobierno Regional Cusco; los ensayos realizados fueron:
 - Análisis granulométrico de agregado grueso, fino y reciclado, Norma MTC E-204.
 - Peso unitario y porcentaje de vacíos, Norma MTC E-203.
 - Peso específico y absorción de agregado grueso y fino, Norma MTC E-205 y E-206.
 - Porcentaje de humedad de agregados finos y grueso, Norma MTC E-215.
 - Determinación del porcentaje de caras fracturadas, Norma MTC E-210.
 - Partículas chatas y alargadas en agregados, Norma MTC E-223.
 - Desgaste de agregado abrasión de los ángeles, Norma MTC E-207.
 - Durabilidad a sulfato de sodio y/o magnesio de agregados, Norma MTC E-209.
 - Equivalente de arena de agregado fino, Norma MTC E-114.
 - Angularidad de agregado fino, Norma MTC E-222.
-
- Análisis de las propiedades físicas de la Emulsión asfáltica de rotura lenta; los ensayos realizados fueron:
 - Penetración de materiales bituminosos, Norma MTC E-304.
 - Carga de partículas de emulsiones asfálticas, Norma MTC E-407.
 - Recubrimiento y adherencia, Manual Americanos MS-14.
 - Viscosidad Saybolt Furol de emulsiones asfálticas, Norma MTC E-403.
 - Destilación de emulsiones asfálticas, Norma MTC E-401.



- Análisis de las propiedades Físico-mecánicas de mezclas diseñadas (tanto para el diseño patrón y el diseño con reemplazo de agregados reciclados al 25%, 33.33% y 50; con emulsión asfáltica de rotura lenta al 4.75%, 5.25%, 5.75%, 6.25%, 6.75% porcentaje en peso de la briqueta y 2% de agua en la mezcla asfáltica; los ensayos realizados fueron:
 - Peso específico aparente y peso unitario de mezclas asfálticas compactadas, empleando especímenes saturados de superficie seca, Norma MTC E-514.
 - Peso específico teórico máximo de mezclas asfálticas, Norma MTC E-508.
 - Porcentaje de vacíos de aire en mezclas asfálticas compactadas densas, Norma MTC E-505.
 - Resistencia a inmersión – compresión de mezclas asfálticas compactadas, Norma MTC E-518.
 - Estabilidad y flujo ensayo Marshall de mezclas asfálticas compactadas, Norma MTC E-504.
 - Resistencia a tracción indirecta de mezclas con emulsión asfáltica compactadas, Norma INV E-785.
 - Análisis volumétrico de mezclas asfálticas compactadas, Norma INV E-799.
 - Modelos de predicción matemáticos para obtener el módulo de rigidez o módulo dinámico de mezclas asfálticas compactadas, método correlacional.



1.4. Objetivos.

1.4.1. Objetivo general

- Se determinó, en qué medida han diferido los valores de las magnitudes de las propiedades físico-mecánicas definidas, de la mezcla asfáltica en frío, elaborado con agregados reciclados y emulsión asfáltica de rotura lenta, en referencia a una mezcla patrón y se verificó que estos se encuentren dentro de los valores mínimos requeridos.

1.4.2. Objetivos específicos

1.4.2.1. Objetivo específico N° 1.

- Se determinó, en qué medida han diferido los valores de las magnitudes: Estabilidad y Flujo, de la mezcla asfáltica en frío, elaborado con agregados reciclados y emulsión asfáltica de rotura lenta, en referencia a una mezcla patrón y se verificó que estos se encuentren dentro de los valores mínimos requeridos.

1.4.2.2. Objetivo específico N° 2.

- Se determinó, en qué medida ha diferido el valor de la magnitud: Resistencia a Inmersión - Compresión de la mezcla asfáltica en frío, elaborado con agregados reciclados y emulsión asfáltica de rotura lenta, en referencia a una mezcla patrón y se verificó que estos se encuentren dentro de los valores mínimos requeridos.

1.4.2.3. Objetivo específico N° 3.

- Se determinó, en qué medida ha diferido el valor de la magnitud: **Resistencia a Tracción Indirecta** de la mezcla asfáltica en frío, elaborado con agregados reciclados y emulsión asfáltica de rotura lenta, en referencia a una mezcla patrón y se verificó que estos se encuentren dentro de los valores mínimos requeridos.

1.4.2.4. Objetivo específico N° 4.

- Se determinó, en qué medida ha diferido el valor de la magnitud: Módulo de rigidez de la mezcla asfáltica en frío, elaborado con agregados reciclados y emulsión asfáltica de rotura lenta, en referencia a una mezcla patrón y se verificó que estos se encuentren dentro de los valores mínimos requeridos.



2. Capítulo II: Marco Teórico

2.1. Antecedentes de la tesis.

2.1.1. Antecedente a Nivel Nacional.

“Criterios de análisis y diseño de una mezcla asfáltica en frío con pavimento reciclado y emulsión asfáltica”.

Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil: Luis Miguel Galván Huamaní, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, 2015.

Revisando este trabajo de investigación de tesis, es útil la información en cuanto al agregado y la emulsión asfáltica, en razón a que el agregado grueso utilizado es de la Región Cusco, específicamente de la cantera Huillque, de donde se tomó parte de los agregados gruesos usados en la presente tesis de investigación, además de la emulsión asfáltica de rotura lenta CSS-1h; la diferencia es que usaron más material grueso por diseñar una mezcla para bases asfálticas y el agregado reciclado de su diseño es el mismo que fue utilizado en la construcción de la vía Cusco-Abancay (cantera Huillque); el otro aporte indicado por este trabajo son los resultados obtenidos en laboratorio que dan la posibilidad de reutilizar el agregado reciclado como sustituto parcial de los agregados naturales y junto con la emulsión asfáltica participar en la elaboración de la mezcla en frío.

Dentro de sus pruebas también nos indica que los reciclados difícilmente cumplen los Husos granulométricos para cualquier diseño que se siga, de hecho se debe requerir de otros agregados nuevos o agregados reciclados; por tal razón teniendo esto como premisa y prevención en nuestro diseño se contó con dos tipos de carpetas asfálticas recicladas para así no correr el riesgo de falta de algún agregado en algunas mallas requeridas y cumplir con lo exigido en la curva granulométrica de diseño; recomienda también no exceder del 50% de reemplazo de agregados reciclados ya que ello garantiza un bajo valor de absorción y una gravedad específica adecuada, en este último punto es tener el control de la densidad de los agregados y mantener el equilibrio del diseño; en cuanto a la emulsión asfáltica, emplearon la emulsión asfáltica de rotura lenta CSS-1h, por sus características de adherencia con casi todo tipo de agregados, teniendo en cuenta este aporte y en vista que nosotros utilizamos más de un tipo de agregado entre nuevos y reciclados era la mejor opción, además de garantizarnos un recubrimiento por encima del 90%.

Por último el contenido de emulsión asfáltica de rotura lenta óptimo que debe tener la mezcla con el uso de agregados reciclados es de 2.9%; mismo que fue obtenido con la fórmula del Instituto Americano de Asfaltos manual Ms-14; al aplicar esta misma fórmula en nuestro trabajo nos da 4%; quiere decir que el



resultado anterior es referencial; pero si nos aporta la fórmula para poder iniciar los cálculos de nuestro diseño.

2.1.2. Antecedente a Nivel Internacional.

“Evaluación del comportamiento mecánico de mezclas asfálticas utilizando pavimento reciclado, ligantes hidráulicos y emulsiones asfálticas”.

Pablo José Hernández Hernández.

Trabajo final de maestría presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería – Geotecnia, Universidad Nacional de Colombia.

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Bogotá, Colombia 2014.

Uno de los aportes dentro de esta investigación de tesis, se refiere principalmente a la aplicación del RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) y como fue utilizado en esta investigación a un 100% de reciclados en el diseño; punto que nos resultó interesante ya que en nuestro medio no podríamos alcanzar este nivel a diferencia de esta investigación por una simple razón, en Colombia cuentan con centros de acopio especializados en reciclados y conocen que características tienen cada uno ellos, esta información nos da una visión ampliada del manejo de este nuevo concepto.

Por otro lado como el título de la investigación está referido a los ensayos mecánicos o físico-mecánicos en mezclas asfálticas compactadas, también nos brindó un gran aporte en este tema, porque ayudó a definir que ensayos realizar o no, limitando nuestra tesis de investigación; además de brindarnos tablas comparativas de resultados obtenidos en sus pruebas físico-mecánicas y de otros investigadores, los cuales fueron de mucha utilidad al momento de analizar y comparar nuestros propios resultados y poder deducir si estos eran correctos o no, dentro de los rangos propios de sus tablas y de la normativa peruana manejada.

Otro aporte interesante además de información es el manejo del cemento como filler y mejorador de resistencia, el cual es incorporado a la mezcla asfáltica que según los resultados obtenidos en este trabajo de investigación mejoran el comportamiento de la resistencia conservada (relación de resistencia entre la briqueta húmeda y la seca), tanto en el ensayo de tracción indirecta como en el ensayo de compresión-inmersión, haciéndola menos susceptible al efecto del agua y por ende más duradera, pero este dato es manejable solo con adición hasta un 4% de cemento, un mayor porcentaje hace la mezcla asfáltica rígida y ya no hablaríamos de un pavimento flexible, en

nuestro diseño se adicionó cemento portland tipo I entre 2% y 3% esto con la finalidad de mejorar la resistencia tal como nos indica la información de este trabajo de investigación de tesis.

Tabla 2. Valores de resistencia para la mezcla MBRF+CH 33 4% de cemento.

Ensayo	Valor	IDU 510-11	Cumple	IDU GU-GE-011	Cumple	IDU 450-05/11	Cumple	INVIAS 440-13 INVIAS 461-13	Cumple
Estabilidad (kg-f)	3346	>600 (T. Liviano) >750 (T. Medio) >900 (T. Pesado)	Si	-	-	-	-	-	-
Flujo (mm)	4.83	<4.0 (T. Liviano) <3.5 (T. Medio) <2.0 (T. Pesado)	No	-	-	-	-	-	-
Marshall									
Resistencia seca (kg-f/cm ²)	4.21	-	-	>2.54	Si	>2.54	Si	-	-
Resistencia conservada (%)	87	-	-	>75	Si	>50	Si	-	-
Tracción indirecta									
Resistencia seca (kg-f/cm ²)	45.66	-	-	>20.4	Si	>20.4	Si	>25.5	Si
Resistencia húmedo (kg-f/cm ²)	37.31	-	-	-	-	-	-	>20.4	Si
Resistencia conservada (%)	82	-	-	>75	Si	>75	Si	>75	Si
Inmersión-compresión									

Fuente: Tesis: “Evaluación del comportamiento mecánico de mezclas asfálticas utilizando pavimento reciclado, ligantes hidráulicos y emulsiones asfálticas”, Universidad Nacional de Colombia, pág. 128, 2014.

Tabla 3. Valores de resistencia para la mezcla MBRF+CH 33 4% de cemento; análisis módulo dinámico.

		Unidades	Contenido de cemento %					
			0	1	2	3	4	
Módulo dinámico 9.1°C	frecuencia (Hz)	1	kg-f/cm2	24826.00	21789.00	30454.00	35134.00	33345.00
		4		29255.00	24736.00	34965.00	39038.00	37623.00
		10		32392.00	26188.00	37776.00	41412.00	40492.00
		16		35994.00	27355.00	41550.00	45792.00	41688.00
Módulo dinámico 20.1°C	frecuencia (Hz)	1	kg-f/cm2	14095.00	16859.00	20167.00	25252.00	23962.00
		4		17318.00	19637.00	23737.00	29071.00	27812.00
		10		19724.00	21203.00	26381.00	31459.00	30298.00
		16		22085.00	22776.00	28280.00	33825.00	32258.00
Módulo dinámico 30.1°C	frecuencia (Hz)	1	kg-f/cm2	9823.00	13014.00	15704.00	19910.00	19795.00
		4		12494.00	15468.00	18860.00	23580.00	23322.00
		10		14337.00	17194.00	20832.00	26235.00	25719.00
		16		16212.00	18385.00	24348.00	28894.00	28262.00

Fuente: Tesis: “Evaluación del comportamiento mecánico de mezclas asfálticas utilizando pavimento reciclado, ligantes hidráulicos y emulsiones asfálticas”, Universidad Nacional de Colombia, pág. 128, 2014.

2.2. Aspectos teóricos pertinentes.

2.2.1. Definición de pavimentos.

El pavimento es la capa o capas que se encuentra entre la sub rasante y la superficie de rodamiento cuya función principal es soportar las cargas rodantes y transmitir las al terreno, distribuyéndolas en tal forma que no se produzcan deformaciones perjudiciales sobre ellas (**Mendoza, 2018**).

El pavimento cumple las siguientes funciones:



- Concede una superficie de rodamiento seguro, cómodo y de características permanentes ante las cargas del tránsito a largo tiempo. Durante este periodo debe haber muy pocas acciones de mantenimiento, de poca importancia y costo (**Mendoza, 2018**).
- Soportar las solicitaciones del tránsito previsto durante la vida útil de la vía, y distribuir las presiones verticales ejercidas por las cargas, de tal forma que sólo llegue a la capa subrasante una pequeña fracción compatible con su capacidad de resistencia. Las deformaciones recuperables que se produzcan tanto en la subrasante como en las diferentes capas del pavimento, deberán ser admisibles sin dejar de tomar en cuenta la repetición de cargas y la resistencia a la fatiga de los materiales (**Mendoza, 2018**).
- Conformar una estructura que resista los factores climatológicos, como el agua y la temperatura, por ser los más adversos en el comportamiento del pavimento y de los suelos de cimentación (**Mendoza, 2018**).

2.2.2. Pavimento flexible.

Los pavimentos flexibles son aquellos cuya estructura integra se deflacta o flexiona dependiendo de las cargas que transita sobre él, es usado fundamentalmente en zonas de abundante tráfico como puedan ser vías, aceras o parkings, la conformación de pavimentos flexibles se realiza a base de varias capas de material, cada una de ellas recibe cargas por encima de ellas, cuando la carga supera la carga de la capa esta traslada la restante a la capa inferior, con esto se pretende soportar la carga total en el conjunto de capas (Canal de construcción, 2019).

Las capas se colocan en orden decreciente en capacidad de carga, la capa superior es la que soporta mayor carga, por lo que la inferior es la que soporta menor carga y se encuentra en la base, la durabilidad de un pavimento flexible no debe ser menor a 8 años y con una vida útil de 20 años, la capa superficial o superior que es la que se encuentra en contacto con el tráfico y está constituido por varias capas asfálticas, la capa base está debajo de la capa superficial y normalmente la conforman agregados que pueden estar estabilizados o no, la capa sub – base está debajo de la capa base, la conforma tierra seleccionada, en muchas ocasiones se obvia esta capa (Canal de construcción, 2019).



Figura 2. Vista de Pavimento flexible, (Fuente: Administradora Boliviana de Carreteras).

2.2.2.1. Partes de un pavimento flexible.

- **Terreno de Fundación;** Aquel que sirve de soporte al pavimento después de terminado el movimiento de tierras y que una vez compactado tiene las secciones transversales y pendientes especificadas en el plano de diseño (Eddy Herbs, 2011).
- **Sub-Rasante;** Corresponde al terreno de fundación (Eddy Herbs, 2011).
- **Sub-Base;** Capa de material seleccionado (tierra selecta), que se coloca encima de la sub-rasante (Eddy Herbs, 2011).
- **Base;** Capa de material pétreo, mezcla de suelo-cemento, mezcla bituminosa, o piedra triturada colocada encima de la sub-base (Eddy Herbs, 2011).
- **Carpeta Asfáltica;** Está constituida por la carpeta de rodadura y la base asfáltica que es una capa o serie de capas de materiales granulares seleccionados, ligados con asfalto que conforman la superficie de rodadura del pavimento. Su función principal es estructural, debe proporcionar una superficie de rodadura suave y segura, debiendo impermeabilizar el pavimento (Eddy Herbs, 2011).

Sección Transversal:

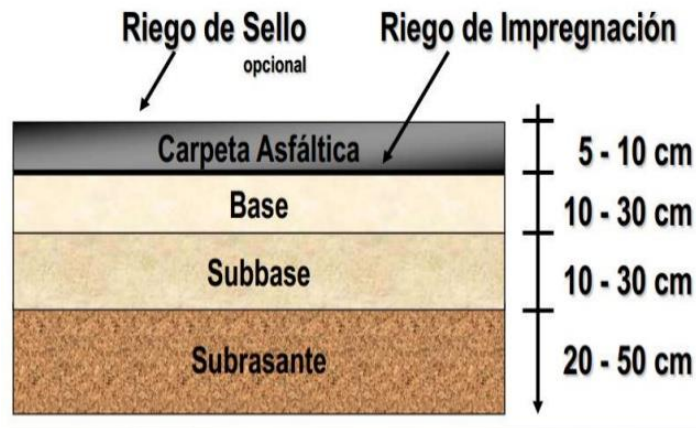


Figura 3. Partes de la carpeta asfáltica, (Fuente: Slideshare.net).

2.2.2.2. Aplicaciones de los Pavimentos Flexibles en frío.

Tratamientos superficiales:

Bicapa; Consiste en aplicar doble capa de ligante asfáltico intercalando una capa de gravilla o grava, sobre la superficie de la carretera a tratar; el periodo medio de duración de esta vía es de 10 años; una variación de esta técnica es un previo tratamiento superficial de grava en seco antes de hacer el riego del ligante (Yenny, 2012).

Lechada asfáltica (slurry seal); Es una técnica de revestimiento de pavimentos de aplicación en frío constituido por una mezcla de emulsión asfáltica de rotura lenta, agregados seleccionados, agua y filler como cemento o cal, distribuidas uniformemente sobre la superficie de un pavimento existente en espesores de 3 a 10 mm (Yenny, 2012).

Es utilizado principalmente en la conservación de pavimentos desgastados o agrietados, que no presenten problemas estructurales, además de servir como capa de protección impermeabilizante, también presenta buenas condiciones antideslizantes, por lo que se emplea en la corrección de tramos lisos o resbaladizos (Yenny, 2012).

Micro pavimentos en frío (micro surfacing); También es una mezcla asfáltica fría de Agregados adecuados, Emulsión Asfáltica con polímero, Agua libre de impurezas, Aditivos Especiales elaborado en laboratorios especializados, se produce y aplica en sitio con equipo especialmente



diseñado, se aplican en capas con lo cual se corrigen defectos de la superficie de la carpeta asfáltica, como hundimientos, desniveles, bacheos, etc. Uso difundido en mantenimiento de vías (Yenny, 2012).

2.2.3. Descripción de componentes.

2.2.3.1. Agregados pétreos.

Son elementos granulares sólidos inertes que se emplean en los firmes de las vías con o sin adición de elementos activos de granulometrías adecuadas; se utilizan para la fabricación de productos artificiales resistentes, mediante su mezcla con materiales aglomerantes como: cementos, cales o ligantes asfálticos (Smith M. R. and L. Collins, 1994).

También se puede decir que son partículas duras de tamaño y forma estable (preferentemente cúbica), que conforman más del 90 % en la constitución de la de la mezcla asfáltica.

Su análisis adquiere gran importancia si se quiere obtener una mezcla de calidad.

2.2.3.1.1. Tipos de Agregados Pétreos.

El tipo de agregado se puede definir, de acuerdo a la procedencia y a la técnica empleada para su aprovechamiento, se tiene los siguientes tipos:

- **Agregados naturales;** Agregados que se usan solamente después de una modificación de su distribución de tamaño para adaptarse al trabajo según su disposición final (Padilla, 2013, p.5).
- **Agregados de trituración;** Agregados que se obtienen de la trituración de diferentes rocas de cantera o de rechazo de los agregados naturales (Padilla, 2013, p.5).
- **Agregados artificiales;** Son subproductos de procesos industriales, como ciertas escorias o materiales procedentes de demoliciones, utilizables y reciclables (padilla, 2013, p.5).
- **Agregados marginales;** Son todos los agregados que no cumplen alguna de las especificaciones o condiciones vigentes para su uso (Padilla, 2013, p.5).



2.2.3.1.2. Clasificación del agregado pétreo.

a) Agregado grueso

Se define como agregado grueso, al agregado pétreo total que queda retenido en el tamiz #4.

El agregado grueso puede estar constituido de grava natural, triturada o agregados metálicos naturales o artificiales.

Características:

- **Granulometría;** Es la cualidad física principal y fundamental de todo conjunto de partículas porque influye de forma muy importante en la resistencia mecánica del conjunto (esqueleto mineral). Normalmente se utilizan granulometrías sensiblemente continuas, a fin de conseguir la máxima compacidad del conjunto, aunque también se emplean granulometrías discontinuas en el caso de algunas mezclas asfálticas (Padilla, 2013, p.11).
- **Resistencia a la deformación;** También llamada capacidad de soporte de una capa de firme depende esencialmente del rozamiento interno del esqueleto mineral y de la cohesión que proporciona el ligante o conglomerante (Padilla, 2013, p.12).
- **Angulosidad del agregado grueso;** Beneficia al esqueleto mineral debido al rozamiento interno que se genera entre las partículas, esto contribuye a que las partículas gruesas permanezcan en su lugar cuando el pavimento entre en funcionamiento y no se produzcan desplazamientos (Padilla, 2013, p.12).

b) Agregado fino

El agregado fino es la parte del agregado pétreo total que pasa el tamiz #4 y queda retenido en el tamiz #200, puede consistir de arena natural o manufacturada, o una combinación de ambas, sus partículas serán limpias, de perfil preferentemente angular, duro, compactado y resistente.

Características:

- El agregado fino procede de la trituración de piedra de cantera o grava natural en su totalidad, o en parte de yacimientos naturales, existen limitaciones en la proporción de agregado fino no triturado a emplear en las mezclas (Padilla, 2013, p.13).

- Normalmente se emplea arena natural en la elaboración de mezclas asfálticas que van a ser empleadas en pavimentos con una baja intensidad de tráfico y niveles de cargas; el agregado fino debe estar libre de terrones de arcilla, materia vegetal y otros materiales extraños, para evitar anomalías dentro de la mezcla, tales como reacciones químicas, pérdida de estabilidad de la mezcla, abundamientos, entre otros; el material que se triture para obtener agregado fino debe cumplir las exigencias del agregado grueso sobre el coeficiente de desgaste, se recomienda usar agregado fino de diferente procedencia ya que mejora otras características como la adhesividad. En relación a la adhesividad del agregado fino – ligante, hay que tener en cuenta que las acciones químicas o físico-químicas en las partículas de menor tamaño son más complejas (Padilla, 2013, p.13).

Según Bellanger y Duriez; el contenido de silicatos determina la polaridad negativa de los agregados en los rangos siguientes: $\text{SiO}_2 > 66\%$ Material agregado ácido, NEGATIVO; SiO_2 entre 55% y 66% Material agregado neutro, NEUTRO. $\text{SiO}_2 < 55\%$ Material agregado básico, POSITIVO.

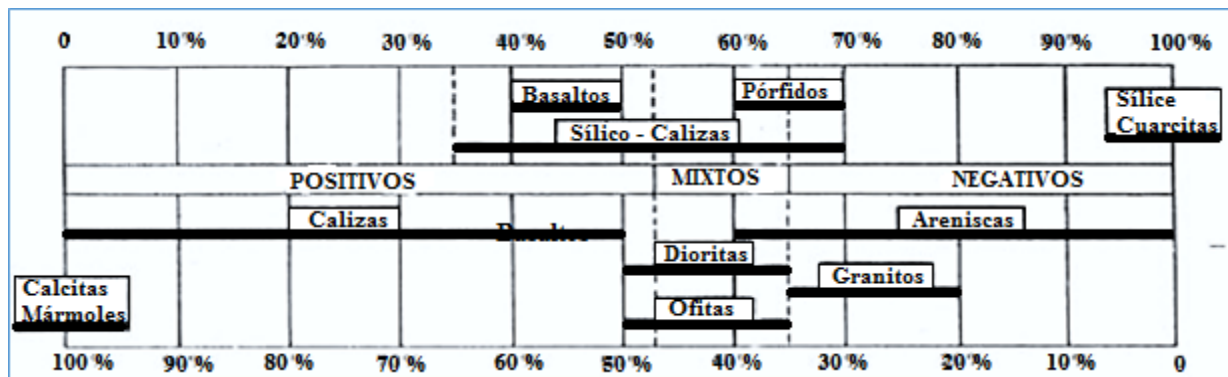


Figura 4. Contenido de óxidos alcalinos, alcalinos térreos, silicatos y feldespatos de los agregados, Fuente: Elaboración y control de Calidad de mezclas Asfálticas, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional La Plata, Argentina.

2.2.3.2. Filler.

El Filler a emplear en mezclas asfálticas es un material finamente molido o pulverizado, cuyo tamaño de partícula pasa por el tamiz número 200 (0.075 mm) (Sandoval, 2011, p.4).



La palabra “filler” proviene del inglés y significa “rellenador o llenante”, debido a que en un principio se consideraba a este material únicamente como relleno de vacíos. Este concepto ha evolucionado y actualmente se considera al filler como un material que al mezclarse íntimamente con el asfalto desempeña cierta actividad que modifica algunas de las propiedades del sistema. (Sandoval, 2011, p.4).

El filler es considerado como parte del sistema de agregados; pero al observar cualquier mezcla asfáltica, es claro que el filler realmente está embebido en el ligante asfáltico, de tal forma que el “mástico” (Sistema filler-asfalto) está fijando o aglomerando los agregados más gruesos; Además la naturaleza y cantidad de filler en la mezcla asfáltica es especialmente importante en ciertos tipos de mezclas asfálticas como las SMA (Stone Mastic Asphalt), en las cuales el filler mineral contribuye significativamente a la compactibilidad, impermeabilidad, durabilidad y desempeño en servicio (Sandoval, 2011, p.4).

Características:

- El filler, al ocupar parcialmente los espacios libres dejados por la estructura granular compactada y conformada por las partículas más gruesas, reduce el volumen de huecos de la mezcla asfáltica, por tanto disminuye la demanda de ligante bituminoso.
- El filler cumple la función de relleno de vacíos, dependiendo del volumen de huecos existentes una vez que se ha compactado la estructura granular y en función también de la granulometría y forma de las partículas de mayor tamaño (Martín, 2007, p.6)

2.2.3.2.1. Cemento.

Se menciona al cemento en la presente tesis por ser utilizado como filler en pequeña proporción, se puede decir que el cemento es un conglomerante formado a partir de una mezcla de calizas y arcillas calcinadas y posteriormente molidas, que tiene la capacidad de endurecer al contacto con el agua, el cemento mezclado con agregados pétreos grava, arena y agua, crea una mezcla uniforme, maleable y plástica que fragua y se endurece, adquiriendo una consistencia pétreo, una vez endurecido conserva su resistencia y estabilidad incluso bajo el agua; el agua en mezclas asfálticas en frío es incorporada así como la emulsión asfáltica que también contiene agua, en consecuencia son miscibles con el cemento y se adhieren muy bien (Sarabia, 2019).



Tipos de cemento portland.

Tipo I; Es el cemento normal, usado en la construcción de obras de concreto en general, viviendas, edificaciones, estructuras etc., se utiliza cuando las especificaciones de construcción no indican el uso de otro tipo de cemento (Canal construcción, 2019).

Tipo II; Este cemento tiene una resistencia media a los ataques de sulfatos, con o sin calor moderado de hidratación, se usa en obras de construcción en general y en construcciones expuestas a la acción moderada de los sulfatos, o que requieren un calor de hidratación moderado, por lo general es utilizado en la construcción de tuberías de concreto y puentes (Canal construcción, 2019).

Tipo III; Este cemento, alcanza una resistencia inicial elevada, su resistencia a la compresión a los 3 días, es igual a la compresión en siete días de los cementos tipos I y II, se usa cuando se necesita un concreto que debe ser desencofrado antes de los 28 días y recibirá cargas muy pronto, como en el caso de los elementos prefabricados o construcciones de emergencia (Canal construcción, 2019).

Tipo IV; Este cemento es usado cuando se necesita un bajo calor de hidratación sin producirse dilataciones durante la etapa de fraguado. El calor desprendido durante la hidratación se produce más lento. Es utilizado en estructuras de concreto muy grandes, como los diques (Canal construcción, 2019).

Tipo V; Este cemento se usa en la construcción de elementos y obras que necesiten una resistencia elevada al ataque concentrado de sulfatos y álcalis, como en las alcantarillas, canales de conducción e infraestructuras portuarias, obras de saneamiento (Canal construcción, 2019).

Los **cementos portland** Tipos Ia, IIa y IIIa tienen la misma composición que los tipos I, II y III normales. La única diferencia es que tienen un agente incorporador de aire que se muele en la mezcla. La cantidad de aire debe cumplir las especificaciones de la ASTM, el aire en este tipo de cementos, mejora la resistencia a la congelación cuando hay bajas temperaturas (Canal construcción, 2019).

2.2.3.3. Agua.

Agua desionizada o agua desmineralizada; El nombre proviene de la desmineralización del agua, proceso que utiliza resinas de intercambio iónico de fabricación especial que eliminan las



sales ionizadas del agua, teóricamente puede eliminar el 100% de las sales, el proceso de desionización normalmente no elimina los compuestos orgánicos, virus o bacterias excepto a través del atrapado “accidental” en la resina y las resinas aniónicas de base fuerte de fabricación especial que eliminan las bacterias Gram negativo presentes en el agua que se quiere desmineralizar (F. N. Kemmer, 1988).

Es similar al agua destilada, en el sentido de que es útil para experimentos científicos; por ejemplo, en el área de la química analítica, donde se necesitan aguas puras, libres de iones interferentes.

Agua destilada; Es agua químicamente pura limpia de contaminantes y microorganismos, pero que no es apta para el consumo humano se compone únicamente por hidrógeno y oxígeno (Queesela, 2019).

2.2.3.4. Asfalto.

El asfalto es un material aglomerante de color oscuro, constituido por mezclas complejas de hidrocarburos no volátiles de alto peso molecular, derivados del crudo de petróleo en el cual están disueltos, pueden obtenerse por evaporación natural de depósitos localizados en la superficie terrestre, tomando el nombre de asfaltos naturales, o por medio de procesos de destilación industrial cuyo componente predominante es el Bitumen (Valenzuela, 2003, p.10).

Los asfaltos destilados del petróleo son producidos por destilación con vapor y aire soplado, la destilación con vapor produce un excelente asfalto para pavimentos, mientras que el producto de destilación por aire soplado tiene una escasa aplicación en pavimentación (Valenzuela, 2003, p.10).

2.2.3.4.1. Tipos de asfaltos.

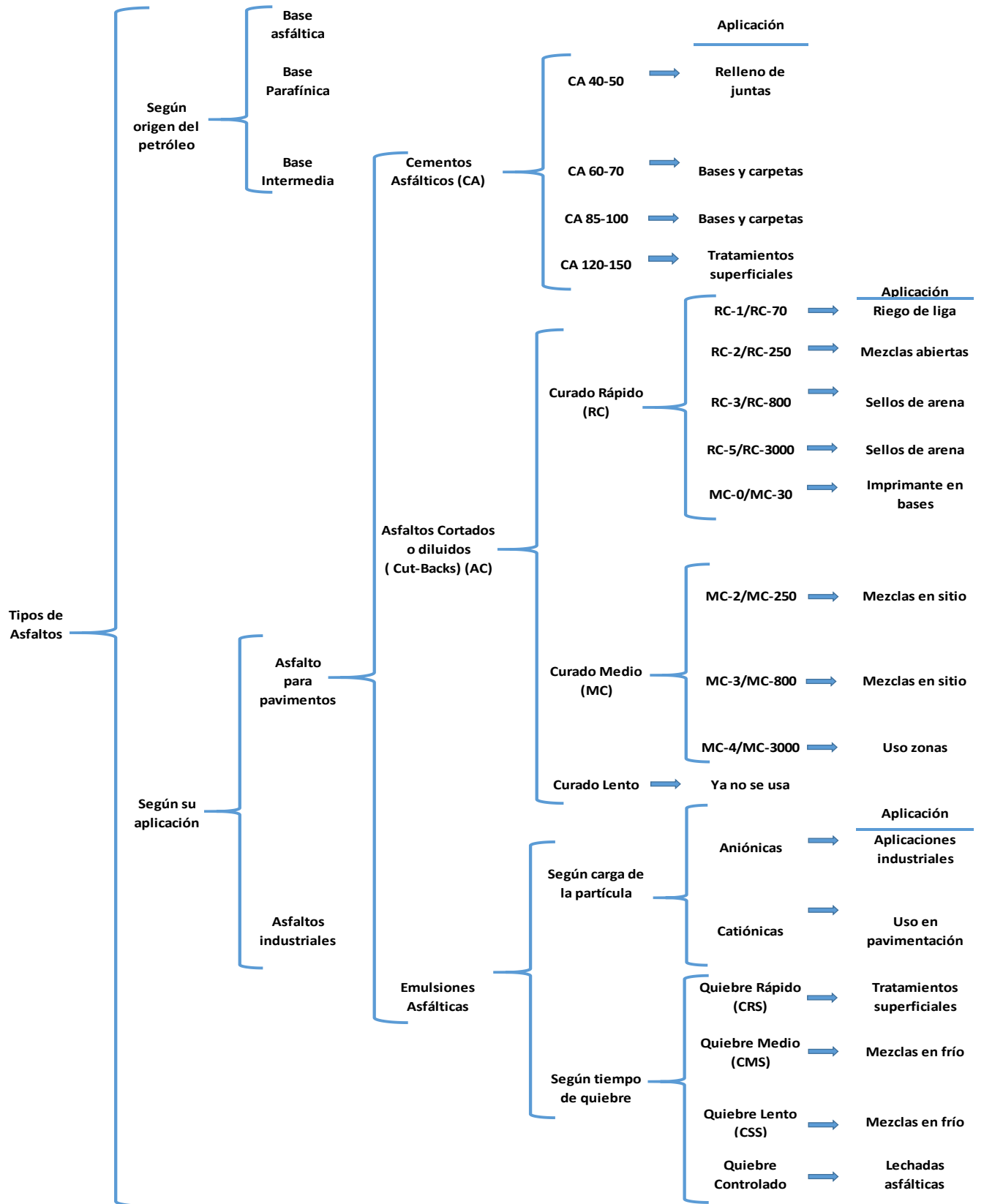


Figura 5A. Tipos de asfalto según origen del petróleo y según su aplicación (Fuente: Elaboración propia).

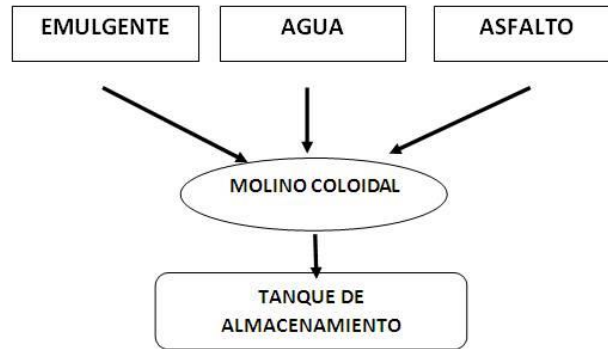


Figura 5B. Esquema para la fabricación de la emulsión asfáltica (Fuente: Lorenzo U., 2012).

2.2.4. Definición de Emulsión de Asfáltica.

Según Rodríguez et. Al. (2001), Una emulsión se define como una dispersión fina más o menos estabilizada de un líquido en otro, los cuales son no miscibles entre sí y están unidos por un emulsificante. Las emulsiones son sistemas formados por dos fases parcial o totalmente inmiscibles, en donde una forma la llamada fase continua (o dispersante) y la otra la fase discreta (o dispersa) **Figura 6.**

Por su concentración se definen dos tipos: La emulsión directa es aquella en la que la fase hidrocarbonada se encuentra dispersa en la fase acuosa y la inversa es en la que la fase acuosa se encuentra dispersa en la fase hidrocarbonada.

En el caso de emulsiones asfálticas, los líquidos no miscibles son el agua y el asfalto, el emulgente el cual se deposita en la interface entre el agua y el asfalto es el que estabiliza la emulsión.

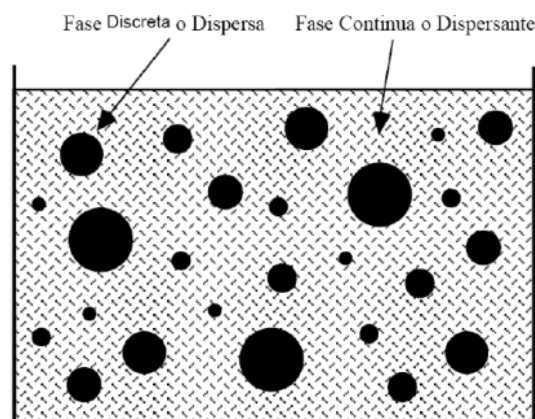


Figura 6. Esquema de una emulsión asfáltica, (Fuente: Rodríguez et al, 2001).

Según Mercado et al. (2008), Después de un tiempo determinado las emulsiones asfálticas depositan sobre la superficie de aplicación una película de asfalto, este fenómeno se denomina rompimiento, Previo al rompimiento esta se convierte en una emulsión de tipo inverso, ya que los glóbulos de asfalto se concentran para perder su totalidad de agua, teniendo como resultado una emulsión totalmente rota, incapaz de volver a su estado original aun en presencia de humedad.

Respecto a la estabilidad de las emulsiones asfálticas, éstas se clasifican en los siguientes tipos:

- **Rotura rápida;** Produce películas resistentes y tienen altas viscosidades que evitan el escurrimiento, una vez formada la capa ésta no se despegue con facilidad, ésta la hace ideal para aplicaciones de rociado, bacheos, sellos y tratamientos superficiales.
- **Rotura media;** Diseñados para su mezcla con agregados en frío o en caliente, estas emulsiones no se rompen inmediatamente al contacto con el agregado, por esta razón pueden ser mezclados en planta y luego transportada al lugar de la pavimentación.
- **Rotura lenta;** Se emplean para un tiempo máximo de mezcla con los agregados, su largo tiempo para la manipulación asegura un buen cubrimiento de agregados con un alto contenido de finos, si se desea aumentar la velocidad de rotura, puede añadirse un porcentaje de cemento Portland o cal hidratada, durante la producción de la mezcla.

Nomenclatura ASTM de emulsiones asfálticas (Sulca, 2013).

Tabla 4. Nomenclatura y uso de emulsiones asfálticas.

Grado de emulsión	Catiónica	Aniónica	Aplicación
Rápida -riegos	CRS	SS	Tratamientos superficiales
Media	CMS	MS	Mezclas abiertas
Lenta	CSS	SS	Mezclas densas
Rápida-mezclas	CQS	-	Mortero asfáltico, micro-pavimentos

Fuente: <https://es.slideshare.net/pietrobert/emulsiones-asfalticas>.

CRS – 2; C = Catiónica, RS = Rotura rápida, 2 = 65% de asfalto.

CSS – 1h; C = Catiónica, SS = Rotura lenta, 1 = 57% de asfalto, h = asfalto duro.

HFMS – 2s; HF = Alta flotación, MS = Rotura media, 2 = 65% de asfalto, s = con solvente.

Tabla 5. Especificaciones técnicas emulsión asfáltica de rotura lenta CSS-1h

Ensayos	Método		Emulsión CSS-1h	
	ASTM	MTC	Mínimo	Máximo
Ensayos sobre la emulsión				
Viscosidad Saybolt Furol a 25°C,ssf	D244	E-403	20	100
Contenido de agua, % volumen	D244	E-402	-	40
Contenido de asfalto residual, %	D244	E-401	57	-
Destilación Contenido de disolventes, %	D244	E-401	-	0
Sedimentación a los 7 días, %	D244	E-404	-	5
Mezcla con cemento, %	D244	E-410	-	2
Prueba de tamiz N°20,%	D244	E-405	-	0.1
Carga de partícula	D244	E-407	Positiva	
Ensayos sobre el residuo de emulsión				
Penetración, 25°C, 100 gr, 5s, dmm	D5	E-304	100	150
Punto de ablandamiento, °C	D36	E-307	45	-
Ductilidad, 5°C, 5cm/min, cm	D113	E-306	10	-
Recuperación elástica torsional, 25°C, %	NTL 329	-	12	-

Fuente: Bitumen asfáltico Chemimax.

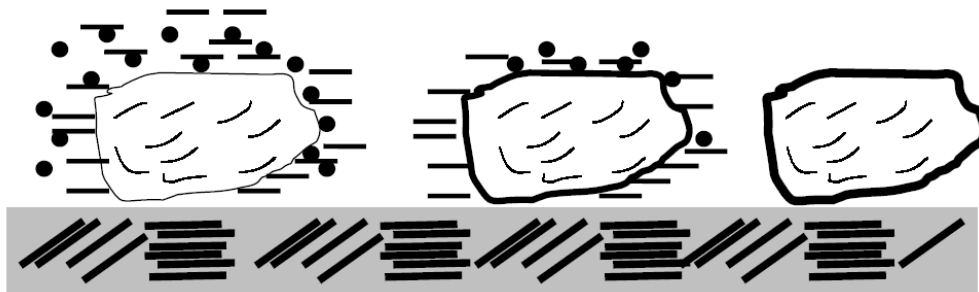


Figura 7. Ruptura de una Emulsión Asfáltica sobre un material pétreo, Fuente: Elaboración y control de calidad de emulsiones asfálticas, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional La Plata, Argentina.

2.2.5. Emulsificante.

El emulsificante también llamado emulgente (agente activo de superficie), es una sustancia capaz de disminuir la tensión superficial entre dos fases o superficies, favoreciendo a un mejor contacto entre ellas (Soengas, 2014, p.2).

El ligante asfáltico es por su naturaleza hidrofóbico (repulsión de agua), en una emulsión asfáltica si chocan las partículas de betún se unen dando lugar a otra de mayor tamaño, lo que

ocasionaría la separación del ligante asfáltico y del agua en dos fases; en **la figura 8**, se puede apreciar la dispersión (Soengas, 2014, p.2).

Para evitar la coalescencia de las partículas de ligante asfáltico y conseguir una buena estabilidad de la emulsión, es necesario que existan productos que eviten esto, para ello es que se adiciona el emulsificante, para que una emulsión posea una estabilidad mínima en el tiempo, es que contenga uno o varios tensioactivos o agentes tensoactivos, estos son compuestos químicos que presentan una actividad superficial que cuando se disuelven en un líquido (agua), reducen su tensión superficial (Soengas, 2014, p.2).

La acción del emulsificante (tensioactivos), es que tienen un extremo que manifiesta afinidad por el agua y una larga cadena hidrocarbonada (naturaleza orgánica) afín con el asfalto, Al ponerse en contacto las fases agua y asfalto en el molino coloidal (mezclado por cizalla) las moléculas del emulsificante se orientan en la interfase, creándose una capa monomolecular orientada (Soengas, 2014, p.2).

Si el emulsificante es de tipo iónico (aniónico o catiónico), los glóbulos están cargados eléctricamente en su superficie, siendo esta carga del mismo signo para todos los glóbulos, la repulsión electrostática contribuye a impedir que los glóbulos se unan entre sí, la carga eléctrica es entonces un factor adicional de estabilización; a continuación se menciona algunos emulsificantes:

Emulsificantes aniónicos; Sales alcalinas de ácidos grasos, sales metálicas de ácidos grasos, sales de base orgánica y ácidos grasos (en general grasas animales y aceites vegetales) (Soengas, 2014, p.3).

Emulsificantes catiónicos; Alquilaminas, alquilamidoaminas, heterociclos de tipo imidazolina (grasas derivadas de bitúmenes y asfaltos) (Soengas, 2014, p.4).

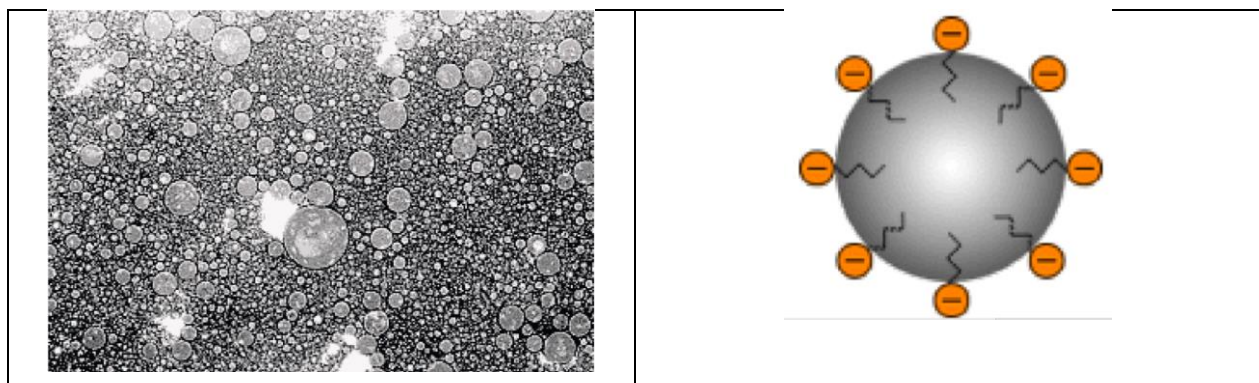


Figura 8. Dispersión de glóbulos y orientación del emulsificante en el glóbulo del ligante, (Fuente: Elaboración y control de emulsiones asfálticas, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional La Plata, Argentina).



2.2.6. Pavimento reutilizable.

2.2.6.1. Pavimento asfáltico reciclado (RAP).

El RAP es un material que se produce a partir de los procedimientos de fresado de las carpetas asfálticas, estos residuos son transportados hasta un lugar de disposición temporal hasta que se requieran para ser reutilizados en estructuras de pavimento nuevas o en rehabilitaciones.

Tomando en cuenta las condiciones mencionadas, se puede decir que el RAP es un material que tiene una gran heterogeneidad (en contenidos de asfalto residual y variada granulometría), con contenidos muy bajos de finos (Hernández, 2014, p.16).

Según Fabela et al. (1999), Menciona en su estudio que por ser el pavimento asfáltico un material con una marcada influencia de la temperatura, el fresado podría facilitarse si se elevara la temperatura de la carpeta asfáltica previamente al procedimiento de corte, no obstante esta práctica no es viable considerando los aspectos relacionados con el medio ambiente y la salud de los trabajadores, así como el enorme incremento en el consumo de energía para transmitirle calor al pavimento objeto del fresado.

Según Fabela et al. (1999), también relaciona investigaciones donde se afirma que la facilidad de fresar un pavimento está en función de la heterogeneidad de los agregados que componen la carpeta asfáltica que se quiere cortar. Partiendo del hecho de que el diente del rodillo rompe la unión producida por el asfalto entre los agregados pétreos sin que necesariamente se fracture el agregado, por lo que puede inferirse que una mezcla asfáltica con un alto contenido de finos es más difícil de fresar que un pavimento con mayor contenido de partículas gruesas.

La norma colombiana no establece parámetros de aceptación para el material fresado más que los límites de las curvas granulométricas que especifica El IDU (Instituto de Desarrollo Urbano), para que el RAP pueda ser reutilizado, la cual se muestra en la **Tabla 6** (Hernández, 2014, p.16).

Considerando que el RAP se constituye principalmente de cemento asfáltico y material granular que conformaron una mezcla asfáltica, la cual después de envejecer fue sometida al procedimiento de fresado, debe de caracterizarse desde dos perspectivas:

Primero; Se realiza la caracterización granulométrica del RAP, con la finalidad de compararlo con otros agregados utilizados en otro tipo de mezclas (Hernández, 2014, p.17).

Segundo; Se realiza la caracterización del asfalto recuperado del RAP (extracción y recuperación del cemento asfáltico), esto con el objeto de establecer el grado de oxidación o envejecimiento del asfalto de la mezcla al momento del fresado (Hernández, 2014, p.17).

Tabla 6. Granulometría admisible para el reciclado de pavimentos RAP.

Tamiz		Porcentaje que pasa
(mm)	U.S. Estándar	
37.5	1 1/2"	100
25	1"	75-100
19	3/4"	65-100
9.5	3/8"	45-75
4.75	Nº4	30-60
2	Nº10	20-45
0.43	Nº40	10-30
0.075	Nº200	5-20

Fuente: Tabla 437-01 Manual de Carretera Especificaciones Técnicas Generales Para la Construcción (EG-2013).

Para la caracterización del RAP se realizan los ensayos igual que para agregados nuevos tales como:

- Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos.
- Contenido de humedad del RAP.
- Porcentaje de Alargamiento y aplanamiento.
- Porcentaje de caras fracturadas en los agregados.
- Resistencia al desgaste de máquina de los ángeles.
- Peso unitario y peso específico.

Los resultados de los ensayos de laboratorio se contrastan los con parámetros establecidos en las normas, para validar o no el uso de estos agregados ya que de ello depende en gran manera la resistencia y durabilidad de la mezcla (Hernández, 2014, p.17).

Por otro lado, para caracterizar el cemento asfáltico recuperado del RAP se practican los ensayos de rigor que normalmente se realizan sobre cementos asfálticos, los cuales como:

- Contenido de asfalto – Extracción.



- Recuperación del asfalto de una solución utilizando el rota vapor.
- Peso específico del asfalto.
- Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato de anillo y bola)
- Penetración, viscosidad y ductilidad de los materiales asfálticos.

Según Reyes (2003), El grado de envejecimiento del cemento asfáltico debido al proceso de mezclado o servicio, puede calcularse en función del porcentaje retenido de la penetración o mediante el índice de envejecimiento, los cuales se calculan como se muestra en la Ecuación 1 y la Ecuación 2 respectivamente.

$$\% \text{ retenido de penetración} = \frac{\text{Penetración del asfalto envejecido}}{\text{Penetración del asfalto original}} * 100$$

$$\text{Índice de envejecimiento} = \frac{\text{Viscosidad del asfalto envejecido}}{\text{Viscosidad del asfalto original}} * 100$$

Es importante entender que las partículas de RAP son granulares de distintos tamaños que aún siguen cohesionados por el efecto del cemento asfáltico y que esta cohesión aun seguirá aportando resistencia en la mezcla bituminosa reciclada. Es por esto que el porcentaje de cemento asfáltico residual del RAP es tenido en cuenta en algunos métodos aplicados para calcular el contenido óptimo teórico de emulsión que debe adicionarse a este tipo de mezcla (Hernández, 2014, p.18).

2.2.6.2. Ventajas y desventajas de las técnicas de reciclado de pavimentos RAP.

Ventajas.

- Aprovechamiento de los materiales envejecidos.
- Homogenización resistente y geométrica del paquete estructural.
- Disminución de la explotación de bancos de préstamo de materiales.
- Rehabilitación individual de carriles.
- Disminución de las molestias por tráfico en la obra.
- Menores costos de rehabilitación.
- Realización simultánea de trabajos de reciclaje.



- Es un método de construcción respetuoso con el medio ambiente y al mismo tiempo económico, al reutilizar todos los materiales y reducir los costos por la explotación, tratamiento y transporte de nuevos materiales,
- Reduciendo entre un 30% a 40% los costos, respecto a las técnicas tradicionales de rehabilitación.
- Es una técnica en frío que consume muy poca energía.
- Disminución notable de la contaminación y las emisiones de gases con efecto invernadero.
- Eliminación de la explotación de nuevas canteras para la explotación de agregados.

Desventajas.

- Posible aparición de fisuras en la superficie, debido a la retracción del material.
- Incremento de la rigidez.
- Protección contra el tráfico a temprana edad, reduciendo la productividad en la ejecución de los trabajos.
- Ejecución por bandas, con la posible aparición de fisuras longitudinales, si no se toman en cuenta las previsiones para disminuir tales eventos.
- Operación más lenta que la del simple refuerzo con capas de mezclas bituminosas.

2.2.7. Mezclas asfálticas.

La mezcla asfáltica la combinación de asfalto y agregados minerales pétreos en proporciones exactas que se utiliza para construir firmes.

Las cantidades relativas de estos minerales determinan las propiedades físicas de la mezcla, así como el rendimiento de la misma, la mezcla asfáltica debe ser duradera, resistente a los desmanes como: Desprendimiento de agregado del asfalto por el agua, abrasión del tránsito, debe resistir las cargas de tránsito a través de su estabilidad, ser impermeable a la acción directa del ambiente, fácil colocación y compactación en el terreno (Cepeda, 2002, citado por Garnica, 2005, p.1).

2.2.7.1. Mezclas asfálticas en frío.

Son regularmente hechas con agregados y asfaltos diluidos (emulsiones), el material pétreo puede ser cualquiera, desde agregados provenientes de canteras aluviales como gravas y arenas,

cantos rodados, arenas limosas y arcillosas, los agregados en mezclas en frío son mezclados sin necesidad de calentarlos, las mezclas en frío de uso en carpetas de rodadura, si esta es diseñada adecuadamente, es apta para tráfico ligero y mediano, en bases y sub-bases (Byo Sv, 2012, p.61).

Tabla 7A. Gradación de agregados para mezclas densas en frío.

Tamiz		Porcentaje que pasa		
Normal	Alterno	MDF-1	MDF-2	MDF-3
38.1mm	1 1/2"	100	-	-
25.0mm	1"	80-95	100	-
19.0mm	3/4"	-	80-95	100
12.5mm	1/2"	62-77	-	-
9.5mm	3/8"	-	60-75	-
4.75mm	N°4	45-60	47-62	50-65
2.36mm	N°8	35-50	35-50	35-50
300um	N°50	13-23	13-23	13-23
75um	N°200	3-8	3-8	3-8

Fuente: Manual de carreteras “Especificaciones Generales para construcción” (EG-2013 MTC), Tabla 424-02, pág. 607.

2.2.7.1.1. Características y comportamiento de la mezcla asfáltica en frío.

El análisis de una mezcla asfáltica está enfocado hacia cuatro características y la influencia que estas puedan tener en el comportamiento de la mezcla las cuales son:

- Densidad de la mezcla compactada, Vacíos de aire en la mezcla compactada, Vacíos en el agregado mineral, Contenido de asfalto (Byo Sv, 2012, p.61).

Además de otras propiedades a considerar en el diseño de mezcla como:

- Estabilidad, durabilidad, impermeabilidad, trabajabilidad, flexibilidad, resistencia a la fatiga, resistencia al deslizamiento (Byo Sv, 2012, p.61).

Densidad de la mezcla.

La densidad es el peso unitario de una mezcla compactada (peso de un volumen específico de la mezcla), es esencial tener una alta densidad en el pavimento terminado para obtener un rendimiento duradero (Byo Sv, 2012, p.62).



La densidad se determina al multiplicar el peso específico total de la mezcla por la densidad del agua (1000 kg/m³), esta densidad hallada en laboratorio es usada como referencia para determinar si la densidad del pavimento terminado es adecuada o no, La normativa indica que la densidad del pavimento en obra sea un porcentaje de la densidad del laboratorio, esto a razón que rara vez la compactación in situ no logra alcanzar las densidades de laboratorio (Byo Sv, 2012, p.62).

Vacíos de aire en la mezcla compactada.

Los vacíos de aire son espacios pequeños o bolsas de aire, que están entre los agregados recubiertos en la mezcla asfáltica compactada, es esencial que todas las mezclas densamente graduadas contengan cierto porcentaje de vacíos bajo el tráfico, que proporcione espacios donde pueda fluir el asfalto durante su compactación adicional (Byo Sv, 2012, p.62).

El porcentaje de vacíos en laboratorio para capas de base y capas superficiales está entre 2% y 8%, dependiendo del diseño específico, la durabilidad de un pavimento asfáltico está en función del su contenido de vacíos, la razón es que cuanto menor es la cantidad de vacíos, menor es la permeabilidad de la mezcla (Byo Sv, 2012, p.62).

Un contenido alto de vacíos proporciona conductos a través de la mezcla, por los cuales ingresa agua y aire ocasionando deterioro del pavimento, por otro lado un contenido demasiado bajo de vacíos produce exudación de asfalto; es decir el exceso de asfalto es exprimido fuera de la mezcla hacia la superficie (Byo Sv, 2012, p.62).

La densidad y el contenido de vacíos están directamente relacionados, entre mayor es la densidad menor es el porcentaje de vacíos en la mezcla (Byo Sv, 2012, p.62).

Vacíos en el agregado mineral (VMA).

El VMA representa el espacio disponible para acomodar todo el volumen de asfalto menos la porción que se pierde en el agregado y el volumen de vacíos necesario para la mezcla, cuanto mayor sea el VMA más espacio habrá disponible para las películas de asfalto, existen valores mínimos para VMA los cuales están especificados en función del tamaño del agregado, estos valores

consideran que cuanto más gruesa sea la película de asfalto que cubre el agregado, más durables será la mezcla, para ello se debe tener valores mínimos de VMA (Byo Sv, 2012, p.62).

Un aumento en la densidad de la graduación de agregado, hasta el punto donde se obtengan valores de VMA por debajo del mínimo, puede resultar en películas delgadas de asfalto con mezclas de baja durabilidad y apariencia, el cual puede ser perjudicial para la calidad del pavimento el disminuir el VMA para economizar el contenido de asfalto (Byo Sv, 2012, p.62).

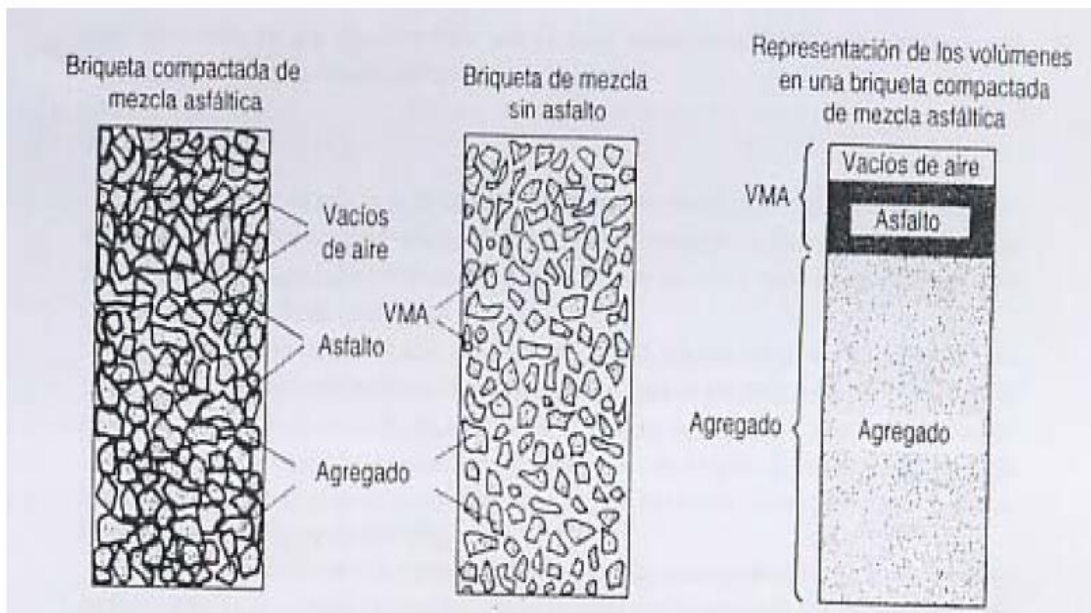


Figura 9. La gráfica muestra el VMA de una briqueleta asfáltica compactada, Fuente: Principios de Construcción de Pavimentos de mezcla asfáltica, Cap.3, pág. 57 del Asphalt Institute MS-22.

Contenido de asfalto en la mezcla compactada.

El contenido óptimo de asfalto de una mezcla depende de las características del agregado como su granulometría y la capacidad de absorción, entre más agregado fino contenga la mezcla, mayor será el área superficial total, por tanto mayor será la cantidad de asfalto para el recubrimiento de todas sus partículas, por otro lado las mezclas gruesas piden menos asfalto por su menor área superficial total (Byo Sv, 2012, p.64).

Los pequeños incrementos en la cantidad de relleno mineral (partículas muy finas), absorben gran cantidad de asfalto ocasionando una mezcla inestable y seca, por el contrario poco relleno mineral resulta en una mezcla muy rica (húmeda) (Byo Sv, 2012, p.64).

La capacidad de absorción (habilidad para absorber asfalto) del agregado usado en la mezcla es importante para determinar el contenido óptimo de asfalto, se tiene que agregar suficiente asfalto a la mezcla para permitir absorción y se puedan cubrir las partículas con una película adecuada de asfalto (Byo Sv, 2012, p.64).

Cuando se refiere al asfalto absorbido se usan dos términos: Contenido total de asfalto y contenido efectivo de asfalto (Byo Sv, 2012, p.64).

Contenido total de asfalto; es la cantidad de asfalto que se debe adicionar para producir las cualidades deseadas en la mezcla. (Byo Sv, 2012, p.64).

Contenido efectivo de asfalto; es el volumen de asfalto no absorbido por el agregado (Byo Sv, 2012, p.64).

El contenido efectivo de asfalto se obtiene al restar la cantidad absorbida de asfalto del contenido total de asfalto, la capacidad de absorción de un agregado es una característica importante en la definición del contenido de asfalto de una mezcla, generalmente se conoce la capacidad de absorción de los agregados, pero es necesario efectuar ensayos cuidadosos cuando son usadas fuentes nuevas (Byo Sv, 2012, p.64).

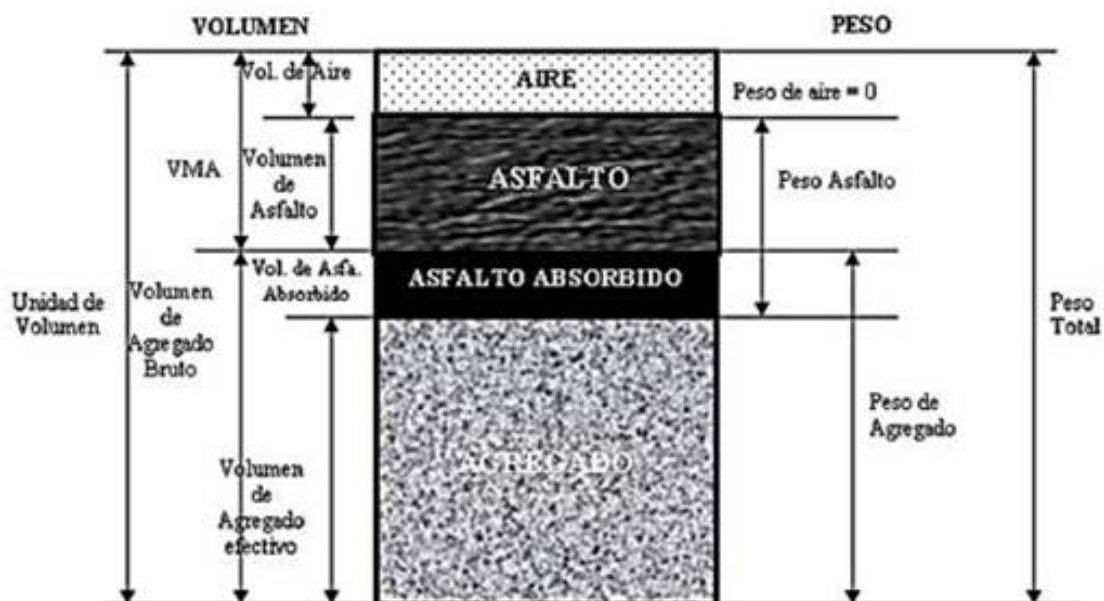


Figura 10. Representación de la composición típica de una mezcla asfáltica, Fuente: Strategic Highway Research program SHRP A-369,1994.



2.2.7.2. Diseño de mezcla Marshall modificado.

El diseño de mezcla es parte fundamental de las investigaciones sobre pavimentos y procedimientos de diseño, tiene como objeto determinar la combinación más efectiva de los materiales que constituyen la carpeta asfáltica, generalmente el diseño adecuado es el más económico y el que cumple satisfactoriamente los criterios establecidos al inicio del proyecto.

Uno de los métodos de diseño más utilizados en la actualidad es el Marshall Modificado, basado en el método Marshall para diseño de mezclas en caliente, el cual es modificado para adecuarse al diseño de mezclas preparadas a temperatura ambiente, su finalidad es proveer la cantidad adecuada de ligante asfáltico que estabilice el material granular y darle la resistencia o estabilidad requerida para soportar la aplicación de carga sin una deformación permanente excesiva o los efectos por cambios bruscos de temperatura, el diseño analiza la relación **Estabilidad-Flujo** en muestras compactadas y la **Densidad-Porcentaje de vacíos** (Galván, 2015, p.37).

La Estabilidad y Flujo reflejan su capacidad de resistir desplazamientos y su deformación bajo las cargas del tránsito; **en la Densidad y Porcentaje de vacíos**, entre más alta la densidad menor será el porcentaje de vacíos, la durabilidad de un pavimento asfáltico es función del contenido de vacíos, cuanto menor es la cantidad de vacíos menor será la permeabilidad de la mezcla (menos espacios donde pueda entrar agua y aire) que malogran el pavimento (Galván, 2015, p.37).

2.2.8. Metodología de diseño Marshall modificado.

2.2.8.1. De la Metodología.

El concepto del método Marshall para diseño de mezclas asfálticas fue formulado por el Departamento de Autopistas del estado de Mississippi, el cuerpo de ingenieros de Estados Unidos, a través de una extensiva investigación y estudios de correlación, mejoró y adicionó ciertos aspectos al procedimiento de prueba Marshall y desarrollo un criterio de diseño de mezclas asfálticas en frío, conocido como método Marshall modificado.

2.2.8.2. Propósito de la Metodología.

El propósito del Método Marshall modificado es determinar el contenido óptimo de emulsión asfáltica a utilizar, para una combinación específica de agregados. El método también provee



información sobre propiedades de la mezcla asfáltica en frío, y establece densidades y contenidos óptimos de vacíos que deben ser cumplidos durante la elaboración de la mezcla.

El método original de Marshall modificado, es aplicable a mezclas asfálticas en frío que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1 pulgada) o menor. El método puede ser usado para el diseño en laboratorio, como para el control de campo de mezclas asfálticas en frío.

2.2.8.3. Descripción General de la metodología.

El método Marshall modificado, usa muestras de ensayo (probetas) de 64 mm (2.5 pulgadas) de espesor por 102 mm (4 pulgadas) de diámetro, una serie de muestras de ensayo, cada una con la misma combinación de agregados pero con diferentes contenidos de Emulsión asfáltica, es preparada usando un procedimiento específico para mezclar y compactar la mezcla asfáltica, los dos aspectos principales del método de diseño son: Análisis de Densidad-Vacíos y el ensayo de Estabilidad y Flujo de los especímenes compactados.

La selección de una curva granulométrica para el diseño de una mezcla asfáltica cerrada o densa, está en función de dos parámetros: El tamaño máximo nominal del agregado y el de las líneas de control o Husos granulométricos (superior e inferior), Las líneas de control son puntos de paso obligado para la curva granulométrica. La **Tabla 7B** presenta los tamaños máximos nominales más utilizados, así como sus líneas de control.

2.2.8.4. Especificaciones de la Metodología.

La selección del contenido óptimo de emulsión asfáltica depende de mucho, un punto inicial para el diseño es escoger el porcentaje de emulsión asfáltica, para el promedio de los límites de vacíos de aire, el cual es 5%. El rango de vacíos de aire es de 4% al 6%, todas las propiedades medidas y calculadas bajo este contenido de asfalto deberán ser evaluadas comparándolas con los criterios para el diseño de mezclas (**Tabla 7C**). Si todos los criterios se cumplen, entonces se tendrá el diseño preliminar de la mezcla asfáltica, en caso de que un criterio no se cumpla, se necesitará hacer ajustes, o rediseñar la mezcla.

Tabla 7B. Granulometría de agregados para mezclas asfálticas cerradas en frío.

Abertura de los tamices	Mezclas Cerradas				
	Tamaño Máximo Nominal del Agregado				
	2" (50 mm)	1 1/2" (37.7 mm)	1" (25.0 mm)	3/4" (19.0 mm)	1/2" (12.5mm)
Gradaciones para mezclas de agregados (grueso, fino y filler)					
2" (50 mm)	100	-	-	-	-
1 1/2" (37.7 mm)	90-100	100	-	-	-
1" (25.0 mm)	-	90-100	100	-	-
3/4" (19.0 mm)	60-80	-	90-100	100	-
1/2" (12.5mm)	-	60-80	-	90-100	100
3/8" (9.5 mm)	-	-	60-80	-	90-100
N°4 (4.75 mm)	20-55	25-60	35-65	45-70	60-80
N°8 (2.36 mm)	10-40	15-45	20-50	-	-
N°16 (1.18 mm)	-	-	-	-	-
N°30 (0.60 mm)	-	-	-	-	-
N°50 (0.30 mm)	2-16	3-18	3-20	5-20	6-25
N°100 (0.15 mm)	-	-	-	-	-
N°200 (0.075 mm)	0-5	1-7	2-8	2-9	2-10
Emulsión asfáltica, porcentaje con respecto al peso total de la mezcla					
	2% a 7%	3% a 8%	3% a 9%	4% a 10%	4% a 12%

Fuente: Tesis Propuesta de Diseño de Mezcla Asfáltica en frío de gradación lenta como alternativa para el mantenimiento de pavimentos flexibles, Universidad Centroamericana, Nicaragua, 2013, p. 64.

Tabla 7C. Criterios de diseño de mezclas Marshall Modificado

Método Marshall	Tráfico ligero		Tráfico medio		Tráfico pesado	
	Carpeta base		Carpeta base		Carpeta base	
Criterio de mezcla	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Compactación, número de golpes en cada uno de los especímenes	35	35	50	50	75	75
Estabilidad N (lb)	3336 (750)	-	5338 (1200)	-	8006 (1800)	-
Flujo, (mm)	3	5	3	5	3	5
Porcentaje de vacíos	4	8	4	8	4	8
% vacíos en agregado mineral (VMA)	Ver Tabla 7D					
% Vacíos llenos de asfalto (VFA)	40	70	40	70	40	70

Fuente: Instituto Mexicano del Transporte, Mezclas asfálticas en frío, (Delgado H., 2004).

Tabla 7D. Mínimo porcentaje de vacíos de agregado mineral (VMA)

Máximo tamaño de partícula nominal		Porcentaje mínimo VMA		
		Porcentaje diseño vacíos de aire		
mm	in	4	5	6
1.18	N° 16	13.98	14.63	15.28
2.36	N°8	12.35	13.00	13.65
4.75	N° 6	10.40	11.05	11.70
9.5	3/8.	9.10	9.75	10.40
12.5	1/2.	8.45	9.10	9.75
19	3/4.	7.80	8.45	9.10
25	1	7.15	7.80	8.45
37.5	1.5	6.50	7.15	7.80

Fuente: Instituto Mexicano del Transporte, Mezclas asfálticas en frío, (Delgado H., 2004).

2.2.8.5. Evaluación y ajustes de una mezcla de diseño asfáltico en frío.

Cuando se desarrolla una mezcla de diseño, es necesario hacer varias mezclas de prueba para encontrar una que cumpla con todos los criterios de diseño, cada una de las mezclas de prueba sirve como una guía para evaluar y ajustar las pruebas siguientes, para diseño de mezclas preliminares o exploratorias, es aconsejable comenzar con una graduación de agregado que se acerque a la media de los límites establecidos. Las mezclas de prueba iniciales sirven para establecer la fórmula de trabajo y verificar que la graduación del agregado este dentro de los límites especificados, cuando las mezclas de pruebas iniciales fallan con los criterios de diseño en cualquier contenido de asfalto seleccionado, será necesario modificar o, en algunos casos, rediseñar la mezcla, para corregir una deficiencia, la manera más fácil de rediseñar una mezcla es cambiar la graduación de los agregados ajustando los porcentajes utilizados, frecuentemente este ajuste es suficiente para cumplir con las especificaciones.

Las curvas granulométricas son de gran ayuda al hacer los ajustes necesarios en los diseños de mezclas, por ejemplo las curvas obtenidas de la ecuación de Densidad máxima de Fuller (**Figura 11a**) representan condiciones de densidad máxima y valores mínimos de vacíos en el agregado mineral (VMA), las mezclas asfálticas que poseen dichas curvas presentan contenidos de vacío que pueden ser demasiado bajos.

Generalmente, cualquier desviación de estas curvas resulta en densidades menores y valores más altos de VMA. La magnitud del cambio en la densidad y en el VMA depende de la cantidad de ajustes hechos en el contenido de agregado grueso o fino de la mezcla.

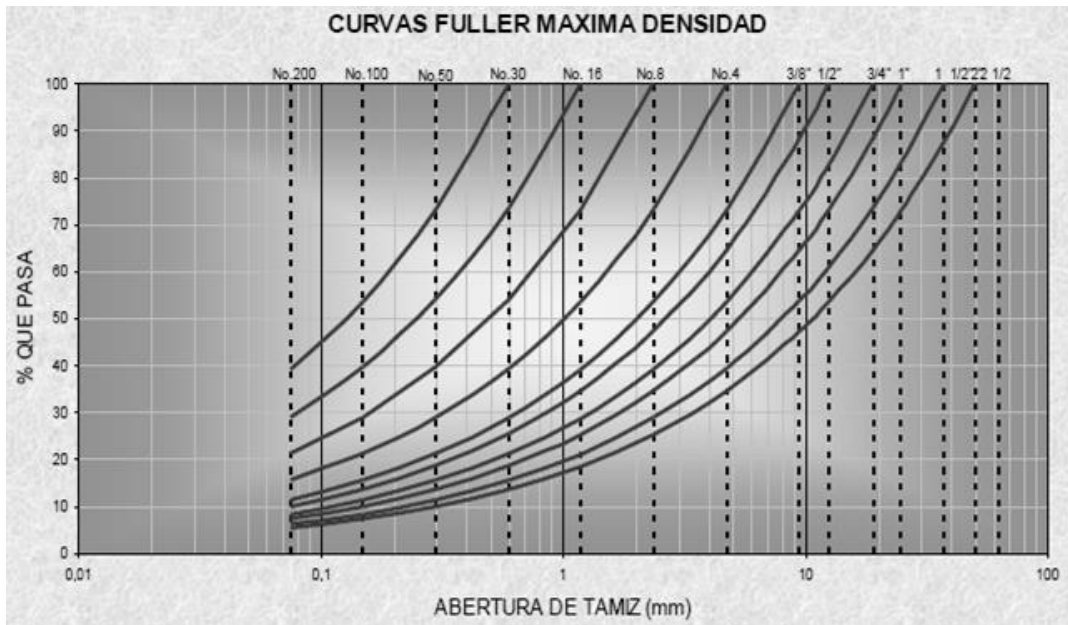


Figura 11a. Curvas Fuller de Máxima Densidad basada en un gráfico normalizado Semi-log de granulometría, (Fuente: Instituto Americano del Asfalto, MS 22).

La **Figura 11b**, muestra curvas de densidad máxima dibujadas sobre un gráfico de granulometría de la Administración Federal de Carreteras (FHWA) (USA) (basada en una escala donde las aberturas de los tamices se elevan a una potencia de 0.45).

Muchos diseñadores encuentran conveniente la gráfica del FHWA para hacer ajustes en la granulometría del agregado, las curvas en la gráfica del FHWA pueden hallarse usando la ecuación de densidad máxima de Fuller, o dibujando una línea recta desde el origen, en la parte inferior izquierda de la gráfica, hasta el tamaño máximo nominal de partícula deseado, en la parte superior. Las granulometrías que se acercan a las líneas rectas tienen, generalmente, valores bajos de VMA, y deben ser ajustadas alejándolas de estas líneas, dichos ajustes aumentan los valores de VMA, permitiendo así obtener máxima durabilidad de la mezcla.

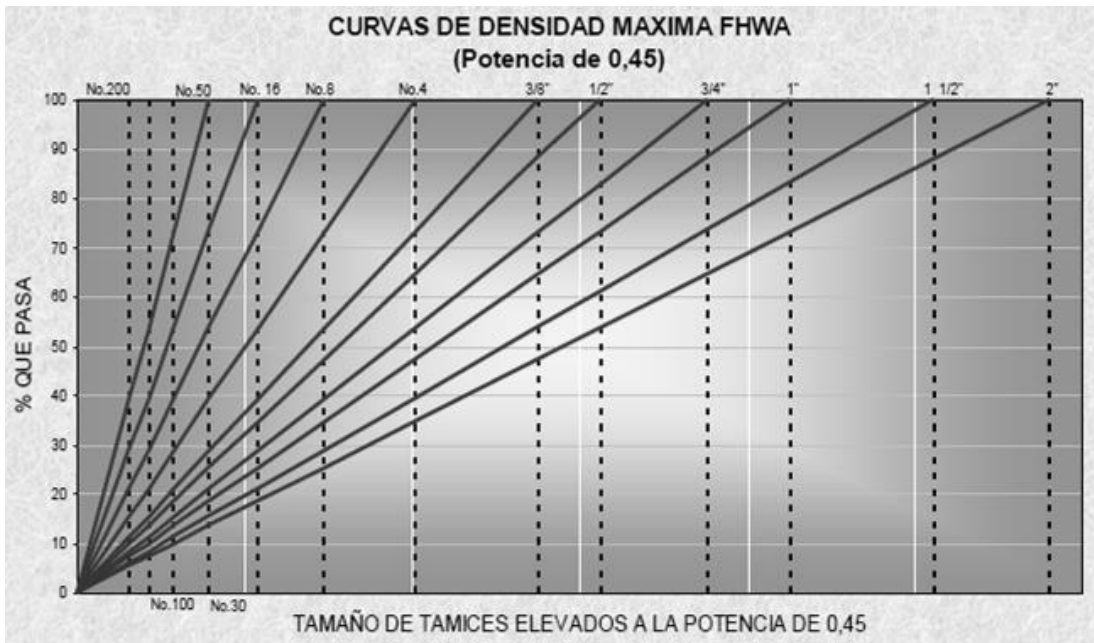


Figura 11b. Curvas de Densidad máxima basadas en un gráfico FHWA (Potencia de 0,45) de granulometría, (Fuente: Instituto Americano del Asfalto, MS 22).

2.2.8.5.1. Lineamientos generales para ajustar las mezclas asfálticas de prueba.

a) Bajo contenido de Vacíos y Estabilidad baja.

Los vacíos pueden incrementarse en diferentes formas, como un acercamiento general para lograr vacíos altos en el agregado mineral (en consecuencia proveer de suficientes espacios, para una adecuada cantidad de asfalto y vacíos de aire), la graduación del agregado debe ajustarse mediante la adición de más agregado grueso o fino.

Si el contenido de asfalto de emulsión asfáltica es más alto de lo normal y el exceso no es necesario para remplazar el absorbido por el agregado, entonces el contenido de emulsión asfáltica deberá reducirse a fin de incrementar el porcentaje de vacíos, proveyendo un adecuado VMA. Se deberá recordar que disminuir el porcentaje de asfalto podrá tender a bajar la durabilidad del pavimento. Demasiada reducción en el contenido de asfalto puede ocasionar fracturación, oxidación acelerada e incremento de la permeabilidad. Si los ajustes anteriores no producen una mezcla estable, el agregado tendrá que cambiarse. Es también posible mejorar la estabilidad e incrementar el contenido de vacíos en el agregado de la mezcla, mediante el incremento del agregado grueso o reducción de la cantidad de material que pasa la malla No. 200. Con la incorporación de arena procesada, el contenido de vacíos puede mejorarse sin sacrificar la estabilidad de la mezcla.

**b) Bajo contenido de Vacíos y Estabilidad satisfactoria.**

Bajos contenidos de vacíos pueden eventualmente resultar en inestabilidad debido a flujo plástico o después de que el pavimento ha sido expuesto al tránsito por un periodo de tiempo ante la reorientación de las partículas y compactación adicional, por su parte, insuficientes vacíos pueden ser producto de la cantidad requerida de asfalto aportado por la emulsión asfáltica, para obtener una durabilidad alta en mezclas finas; sin embargo, la estabilidad es inicialmente satisfactoria por el tránsito específico. Una degradación de agregado pobre durante la producción de la mezcla y/o bajo la acción de tránsito puede ocasionar subsecuentemente inestabilidad y flujo si el contenido de vacíos de la mezcla no es suficiente.

c) Contenido satisfactorio de Vacíos y Estabilidad baja.

La baja Estabilidad cuando los vacíos y la graduación del agregado son satisfactorios, puede indicar algunas deficiencias en el agregado, se deberá tomar consideraciones para mejorar la forma de la partícula de los agregados utilizando material producto de trituración o incrementando el porcentaje de agregado grueso en la mezcla o posiblemente aumentando el tamaño máximo del agregado, partículas de agregado con textura rugosa y superficies menos redondeadas, presentan más estabilidad cuando se mantiene o incrementa el volumen de vacíos.

d) Contenido alto de Vacíos y Estabilidad satisfactoria.

Altos contenidos de vacíos se asocian frecuentemente con mezclas con alta permeabilidad; al permitir la circulación de aire y agua a través de la mezcla asfáltica pueden ocasionar endurecimiento prematuro del asfalto, desprendimiento del agregado, o posible desprendimiento del asfalto en el agregado, aun cuando la estabilidad es satisfactoria, se deberán realizar ajustes para reducir los vacíos, pequeñas reducciones se lograrán mediante la adición de polvo mineral (filler) a la mezcla, podría ser necesario seleccionar o combinar agregados para lograr una graduación, la cual deberá estar cerca de la curva de máxima densidad.

e) Vacíos altos y estabilidad baja.

Se deberán tomar en cuenta dos pasos para este tipo de condiciones; el primero es ajustar el volumen de vacíos mediante los métodos discutidos en los puntos anteriores, si los ajustes no mejoran la estabilidad, deberá hacer una reconsideración de la calidad de los materiales indicado en los ítem (a, b).



2.2.8.6. Ensayos realizados a la mezcla asfáltica en frío compactada.

En el método Marshall modificado se llevan a cabo tres tipos de pruebas para conocer tanto sus características volumétricas como sus propiedades mecánicas.

2.2.8.6.1. Determinación de la gravedad específica Bulk.

El ensayo de gravedad específica Bulk de mezclas asfálticas compactadas utilizando especímenes saturados superficialmente secos puede desarrollarse tan pronto como el espécimen haya cumplido el tiempo de curado; es decir un día dentro del molde y 7 días al aire libre, este ensayo se desarrolla de acuerdo con la norma MTC E-514.

2.2.8.6.2. Ensayo de Estabilidad y Flujo.

El ensayo de Estabilidad se realizará de acuerdo a la norma MTC E-504, esta mide la resistencia a la deformación de la mezcla, la fluencia o flujo mide la deformación, bajo carga, que ocurre en la mezcla.

Se sumerge el espécimen en un baño María a $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($140\text{ }^{\circ}\text{F} \pm 1.8\text{ }^{\circ}\text{F}$) de 30 a 40 minutos antes de la prueba, remueva el espécimen de ensayo del baño María y cuidadosamente se secará la superficie, colocándolo y centrándolo en la mordaza inferior, se procederá a colocar la mordaza superior y se centrará completamente en el aparato de carga, Posteriormente se aplica la carga de prueba al espécimen a una velocidad constante de 50.8 mm/min (2 pulg/min), hasta que ocurra la falla, el punto de falla está definido por la lectura de carga máxima obtenida, el número total de Newton requeridos para que se produzca la falla del espécimen deberá registrarse como el valor de Estabilidad Marshall.

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

2.2.8.6.3. Análisis de Densidad y Vacíos.



Después de completar las pruebas de Estabilidad y Flujo, se realiza el análisis de Densidad y Vacíos para cada serie de especímenes de prueba de acuerdo a la norma MTC E-505 y MTC E-514, resulta conveniente determinar la gravedad específica teórica máxima de acuerdo a la norma MTC E-508, para al menos dos contenidos de asfalto, preferentemente aquellos que estén cerca del contenido óptimo de emulsión asfáltica, un valor promedio de la gravedad específica efectiva del total del agregado se calculará de estos valores, utilizando la gravedad específica y la gravedad específica efectiva del total del agregado; el promedio de las gravedades específicas de las mezclas compactadas; la gravedad específica de la emulsión y la gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica, se calcula el porcentaje de asfalto absorbido en peso del agregado seco, porcentaje de vacíos (Va); porcentaje de vacíos llenados con asfalto (VFA) y el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA), con ayuda del ensayo de volumetría (norma INV E-799).

2.2.8.7. Dosificación de agregados para mezcla patrón y mezcla con agregados reciclados.

2.2.8.7.1. Dosificación de agregados.

La dosificación de agregados tiene por objeto lograr una mezcla cuya gradación se encuentre dentro de los límites recomendados en una especificación determinada, se cuenta con procedimientos analíticos y gráficos; dentro de estos el método de prueba y error es el más utilizado, ya que con la ayuda de programas de computación como Excel es muy fácil elaborar tablas de cálculos y establecer una combinación de varios agregados, por supuesto se debe tener la granulometría de cada agregado a ser combinado, estos métodos son descritos a continuación.

2.2.8.7.2. Método Analítico.

a) Dosificación para dos Agregados.

La fórmula general básica para la combinación de agregados, sin importar el número de agregados o el método utilizado para establecer las proporciones, es la siguiente:

$$P = G \times a + F \times b + M \times c \dots \text{etc.}$$

Donde:

P = Es el porcentaje de material que pasa un tamiz dado para la combinación de agregados, G, F, M, etc...

G, F, M, etc... = Porcentaje de material que pasa un tamiz dado para los agregados G, F, M, etc...



a, b, c, etc... = proporciones de agregados G, F, M, etc. Usadas en la combinación y cuyo total es 1.

El proceso de dosificación resulta relativamente simple cuando se trata de la mezcla de dos agregados; tal es el caso uno grueso y por consiguiente el otro fino, identificados como G y F respectivamente, una primera aproximación se obtiene al calcular el porcentaje que se requiere del material fino (F) de forma tal que se cumpla con la media de la especificación para el tamiz N° 200.

Por lo tanto la ecuación para dos agregados es:

$$G \times a + F \times b = P$$

Debido a que:

$$a + b = 1$$

Sustituyendo y despejando “b” tenemos:

$$b = \frac{P - G}{F - G}$$

También tenemos para “a”:

$$a = \frac{P - F}{G - F}$$

Si consideramos la **Tabla 7E** de granulometría de dos agregados a ser combinados.

Tabla 7E. Especificaciones y granulometrías de dos agregados, uno grueso (G) y otro fino (F).

Tamiz	% Pasa							
	3/4"	1/2"	3/8"	N°4	N°8	N°30	N°100	N°200
Especificación	100	100/80	90/70	70/50	50/35	29/18	16/8	10/4
Gradación								
Media de la especificación	100	90	80	60	42.5	23.5	12	7
A. Gruesos (G)	100	87	75	58	35	17	8	2
A. Fino (F)	100	100	100	100	100	80	53	40

Fuente. Elaboración propia.

Si

a = Cantidad de Material G requerido en la mezcla.

b = Cantidad del material F requerido en la mezcla.

Utilizando las ecuaciones se tiene que:

$$a = 1 - b$$

Y llevando a la ecuación general para dos agregados:

$$P = Gxa + Fxb$$

De la **Tabla 4.8** tomamos los valores del tamiz No. 200, donde P = 7, G = 2 y F = 40 y los reemplazamos en las ecuaciones para hallar “a” y “b”, se tiene:

$$b = \frac{P - G}{F - G} = \frac{7 - 2}{40 - 2} = \frac{5}{38} = 0.132$$

$$b = 13.2\%$$

$$a = 1 - b = 1 - 0.132 = 0.868$$

$$a = 86.7\%$$

La gradación final o mezcla de la combinación de agregados de acuerdo a esta dosificación que se muestra en la **Tabla 7F**.

Tabla 7F. Especificaciones y granulometrías de los dos agregados combinados Agregado grueso (G) y Agregado fino (F).

Tamiz	% Pasa							
	3/4"	1/2"	3/8"	N°4	N°8	N°30	N°100	N°200
Especificación	100	100/80	90/70	70/50	50/35	29/18	16/8	10/4
Gradación								
Media de la especificación	100.00	90.00	80.00	60.00	42.50	23.50	12.00	7.00
A. gruesos (G) (86.8 %)	86.80	75.52	65.10	50.34	30.38	14.76	6.94	1.74
A. Fino (F) (13.2 %)	13.20	13.20	13.20	13.20	13.20	10.56	7.00	5.28
Gradación								
Mezcla de agregados	100.00	88.72	78.30	63.54	43.58	25.32	13.94	7.02

Fuente: Elaboración propia.

Estos resultados se expresan gráficamente tal como se muestra en la **Figura 11c**.

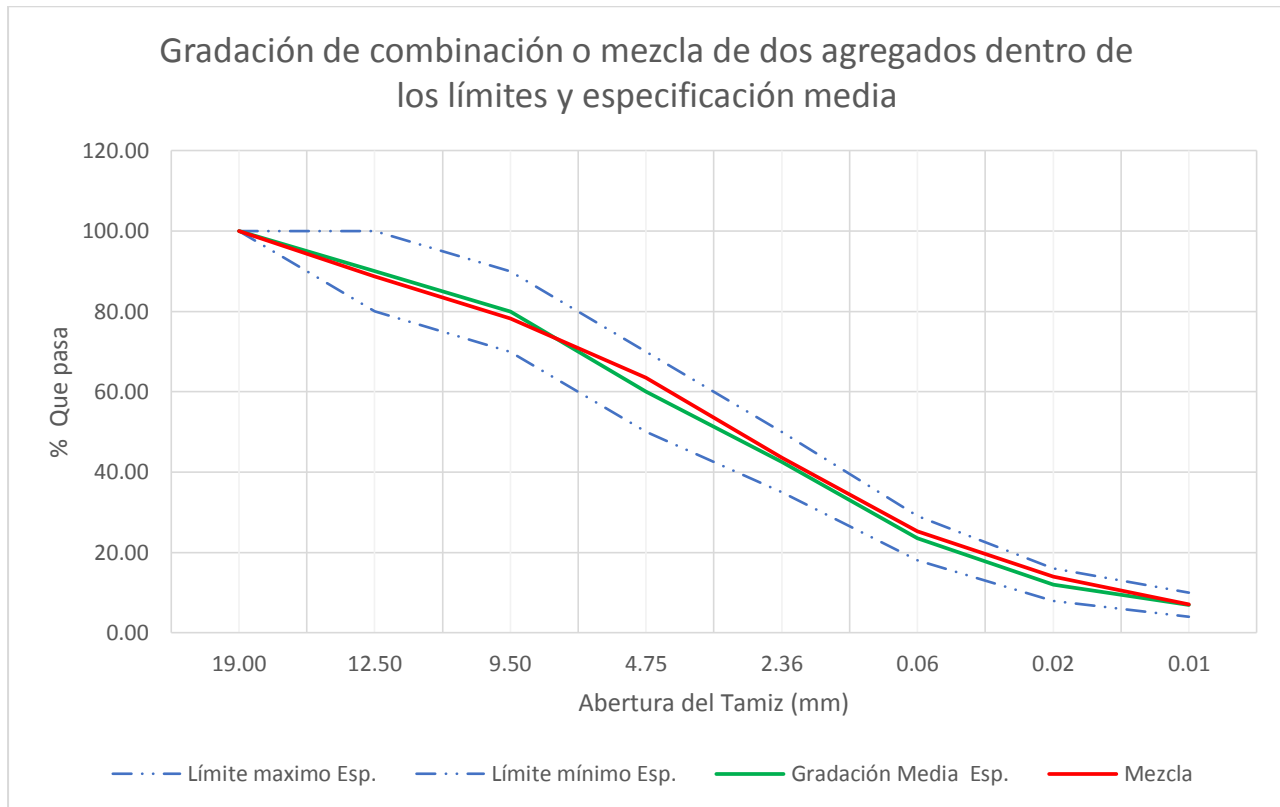


Figura 11c. Grafica de gradación de la especificación y su media; así como la gradación de los dos agregados combinados, (Fuente: Elaboración propia).

4.2.8.8. Procedimiento de diseño de mezclas asfálticas en frío utilizando el método Marshall Modificado.

Una mezcla asfáltica se puede presentar según su tamaño máximo, por ejemplo mezcla de 1 pulgada indica que su tamaño máximo es de una pulgada y que dicho material pasará por completo el tamiz de 1 pulgada o según su tamaño máximo nominal, que suele ser la más utilizada.

El proceso que se explica seguidamente es para diseñar una mezcla densa.

Un diseño de mezcla asfáltica en frío es un proceso muy amplio y complementario en el cual intervienen varios factores de estudio, los cuales comprenden:

- a) Establecer la designación de la mezcla que se desea diseñar.
- b) Para nuestro caso es una Mezcla de 1" en base al tamaño máximo nominal del agregado.
- c) Elección de la especificación bajo la cual se regirá la granulometría, ésta dependerá del tamaño máximo nominal. La banda de control puede ser definida por el contratante, el



diseñador o ser tomado de las especificaciones vigentes en la región donde se realiza el diseño.

- d)** Estudio de los materiales que conformarán la mezcla, los cuales básicamente son dos:
 - a. Agregados pétreos y
 - b. Emulsión asfáltica.
- e)** El estudio de los materiales pétreos comprenderá una serie de ensayos para cada tipo de agregado que se utilice, exigen no menos de cinco agregados acopiados, cada uno con granulometría distinta), los cuales están detallados en los capítulos III y IV referente a agregados pétreos, todos los ensayos son muy importantes, pero el que más influye a la hora de realizar el diseño es el ensayo de análisis granulométrico, ya que la granulometría que presentan las muestras de los diferentes agregados debe ser la que realmente tiene el agregado en bruto apilado en la planta, ésta información es la que se utiliza para establecer una combinación de los diferentes agregados, para que estos cumplan con una determinada especificación que está de acuerdo a la designación de la mezcla. Si el resultado del análisis granulométrico de los diferentes agregados o tan sólo de uno es erróneo, y no es el que realmente presenta el material en bruto apilado, este resultado influirá grandemente a la hora de realizar el diseño. Por lo general nunca se acierta en el diseño a la primera vez, por lo tanto, habrá que realizar correcciones las cuales se hacen en base a las dosificaciones de los agregados.
- f)** Por otra parte también se realizan una serie de ensayos a la Emulsión Asfáltica, los cuales se detallan en los capítulos III y IV referente a Emulsiones Asfálticas; un factor muy importante es determinar la carga de la emulsión ya que esta es influyente en su capacidad de recubrimiento y adherencia con el agregado.
- g)** Una vez que se conoce que los agregados cumplen con las especificaciones correspondientes y se tiene la granulometría de cada uno, así como las características de la emulsión asfáltica a utilizar, se le da seguimiento al proceso de diseño.
- h)** Se realiza el establecimiento de las proporciones de los diferentes tamaños de agregados que intervendrán en el diseño, realizándose una combinación teórica, siendo un método



adecuado de combinación, como el que se indicó anteriormente o un método por tanteos y posteriormente la comprobación granulométrica.

- i) Para el diseño se desarrolló la combinación teórica de agregados y se realizó un tanteo con la ayuda de una hoja de cálculo.
- j) Ya establecidas las proporciones de cada agregado y las diferentes dosificaciones de emulsión asfáltica, así como del agua requerida que se utilizará, se procede a iniciar el mezclado en laboratorio, llenado de briquetas y la respectiva compactación (50 golpes por cara), dejando en el molde un día y curado por 7 días al aire libre, hasta que se complete la rotura de la emulsión asfáltica.
- k) Después que se elaboran las briquetas se da seguimiento a lo que es esencia el método Marshall modificado para mezclas en frío, el cual consiste en tres procedimientos:
 - a. Determinación y análisis del peso específico total.
 - b. Determinación y análisis de la Estabilidad y Flujo.
 - c. Análisis de la Densidad y el contenido de vacíos de las briquetas (éste análisis es enfocado hacia las cuatro características de la mezcla y su influencia en el comportamiento de la mezcla compactada: Densidad, vacíos de aire, vacíos en el agregado mineral y contenido de emulsión asfáltica.
- l) Por último y después de ciertas correcciones en las dosificaciones se logra establecer la fórmula de trabajo, la cual contiene las dosificaciones finales de cada agregado y el porcentaje de emulsión asfáltica de diseño.

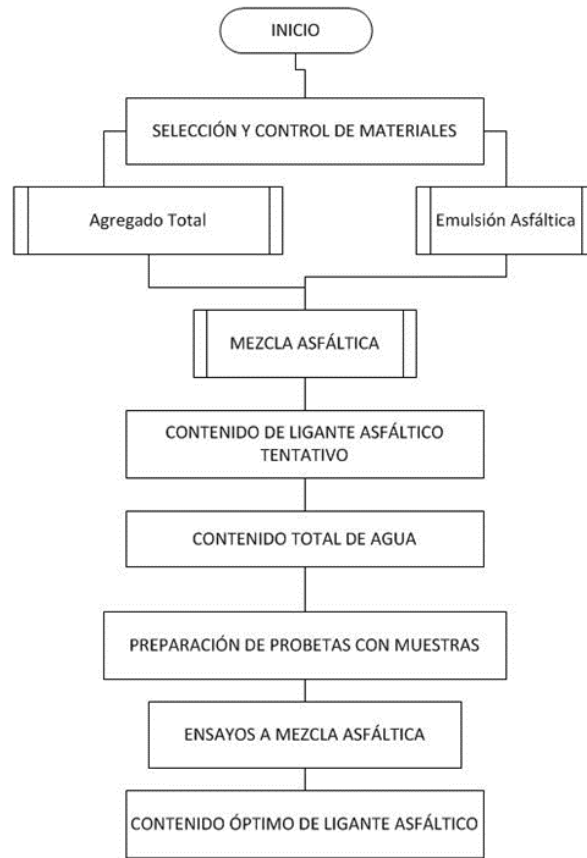


Figura 11d. Flujo metodológico de Diseño de Mezcla Marshall Modificado, (**Fuente:** Tesis Criterios de análisis y diseño de una mezcla asfáltica en frío con Pavimento Reciclado y Emulsión Asfáltica, Galván H., UNI, Lima, 2015).

2.2.9. Ensayos de laboratorio según diseño de ingeniería.

Los ensayos de control de calidad permite definir las características de cada componente que interviene en el diseño de mezclas asfálticas, esto define las condiciones necesarias para su uso dentro de la presente Tesis; además el análisis implica también ensayos físicos-mecánicos a briquetas diseñadas ya compactadas, que deben de estar dentro de las expectativas que se plantea.



2.2.9.1. Ensayos de laboratorio para el material reciclado, agregados, emulsión asfáltica de rotura lenta y briquetas compactadas.

Se realizó los siguientes ensayos dentro del Diseño de Ingeniería propuesto que se menciona a continuación:

- Análisis granulométrico de agregado grueso, fino y reciclado, norma MTC E-204.
- Peso unitario y porcentaje de vacíos, norma MTC E-203.
- Peso específico y absorción de agregado grueso y fino, norma MTC E-205 y E-206.
- Porcentaje de humedad de agregados finos y grueso, norma MTC E-215.
- Determinación del porcentaje de caras fracturadas, norma MTC E-210.
- Partículas chatas y alargadas en agregados, norma MTC E-223.
- Desgaste de agregado abrasión de los ángeles, norma MTC E-207.
- Durabilidad a sulfato de sodio y/o magnesio de agregados, norma MTC E-209.
- Equivalente de arena de agregado fino, norma MTC E-114.
- Angularidad de agregado fino, norma MTC E-222.
- Extracción cuantitativa de asfalto, norma MTC E-502.
- Penetración de materiales bituminosos, norma MTC E-304.
- Carga de partículas de emulsiones asfálticas, norma MTC E-407.
- Recubrimiento y adherencia, manual americanos MS-14.
- Viscosidad Saybolt Furol de emulsiones asfálticas, norma MTC E-403.
- Destilación de emulsiones asfálticas, norma MTC E-401.
- Peso específico aparente y peso unitario de mezclas asfálticas compactadas, empleando especímenes saturados de superficie seca, norma MTC E-514.
- Peso específico teórico máximo de mezclas asfálticas, norma MTC E-508.
- Porcentaje de vacíos de aire en mezclas asfálticas compactadas densas, norma MTC E-505.
- Resistencia a inmersión – compresión de mezclas asfálticas compactadas, norma MTC E-518.
- Estabilidad y flujo ensayo Marshall de mezclas asfálticas compactadas, norma MTC E-504.
- Resistencia a tracción indirecta de mezclas con emulsión asfáltica compactadas, norma INV E-785.
- Análisis volumétrico de mezclas asfálticas compactadas, norma INV E-799



- Modelos de predicción matemáticos para obtener el módulo de rigidez o módulo dinámico de mezclas asfálticas compactadas, método correlacional.

A continuación se describe cada uno de los ensayos mencionados.

2.2.9.1.1. Análisis granulométrico de agregado grueso, fino y reciclado, norma MTC E-204.

Objetivo.

Determinación por medio de una serie de tamices de abertura cuadrada la distribución de partículas de agregados gruesos y finos en una muestra de agregado totalmente seca y de peso conocido.

Finalidad.

Se usa para determinar la gradación de agregados propuestos para ser usado como tales, los resultados son para determinar el cumplimiento de la distribución del tamaño de partículas con los exigidos en la especificación técnica y proporcionar datos necesarios para el control de producción de agregados.

Cálculos.

Se determina el porcentaje que pasa, porcentaje total retenido en cada tamiz con aproximación de 0,1% sobre la base del peso total de la muestra seca, Si la muestra primeramente fue ensayada por el método MTC E 202, incluir el peso del material más fino que el tamiz de 75 μm (No. 200) por lavado en los cálculos de tamizado, usar el total del peso de la muestra seca previamente lavada en el método mencionado, como base para calcular todos los porcentajes.

2.2.9.1.2. Peso unitario y porcentaje de vacíos, norma MTC E-203.

Objeto.

Se determina el peso unitario suelto o compactado y el porcentaje de vacíos de los agregados finos, gruesos o una mezcla de ambos.

El método es aplicado a agregados de tamaño máximo nominal hasta de 150 mm (6”).

**Finalidad.**

Es utilizado siempre para determinar el valor del peso unitario por algunos métodos de diseño de mezclas en concreto, así como para determinar la relación masa/volumen para conversiones en acuerdos de compra donde se desconoce la relación entre el grado de compactación del agregado en una unidad de transporte o depósito de almacenamiento (que usualmente contienen humedad superficial absorbida) y los llevados a cabo por este ensayo que determina el peso unitario seco.

Cálculos.

Cálculo el peso unitario compactado o suelto:

$$M = \frac{(G - T)}{V}$$
$$M = (G - T) \times F$$

Donde:

M = Peso unitario del agregado en kg/m³ (lb/pie³)

G = Peso del recipiente de medida más el agregado en kg (lb)

T = Peso del recipiente de medida en kg (lb)

V = Volumen del recipiente de medida en m³ (pie³), y

F = Factor del recipiente de medida en m⁻³ (pie⁻³)

El peso unitario determinado es para agregado en la condición seca, si se desea calcular el peso unitario en la condición saturada superficialmente seca (SSS), utilice la siguiente expresión:

$$M_{SSS} = M \times [1 + (G - T) \times F]$$

Donde:

M_{SSS} = Peso unitario en la condición de saturado.

A = Porcentaje de absorción del agregado (MTC E-205 o MTC E-206).

El contenido de vacíos en el agregado utilizando es calculado como sigue:



$$\% \text{ Vacíos} = \frac{(AxW) - B}{AxW}$$

Donde:

A = Peso específico aparente según norma MTC E-205.

B = Peso unitario de los agregados en kg/m³ (lb/pie³).

W = Densidad del agua, 998 kg/m³ (62,4 lb/pie³).

2.2.9.1.3. Peso específico y absorción de agregado grueso y fino, norma MTC E-205 y E-206.**Objeto.**

Es determinar el peso específico seco, peso específico saturado con superficie seca, el peso específico aparente y la absorción luego de 24 horas de sumergido en agua el agregado fino o grueso

Finalidad.

El peso específico, es una característica generalmente usada para calcular el volumen que ocupa el agregado en mezclas que contienen agregados con cemento o asfalto y otras mezclas que son proporcionadas y analizadas en base al volumen.

El peso específico aparente afecta al material sólido de las partículas constituyentes y no incluyen los espacios porosos dentro de ellas que son accesibles al agua, este valor no es ampliamente usado en la tecnología de agregados de construcción.

La absorción es utilizada para calcular el cambio de masa del agregado debido al agua absorbida entre los espacios porosos entre las partículas constituyentes, comparado con la condición seca, cuando el agregado ha estado en contacto con el agua el suficiente tiempo para determinar una absorción potencial.

No es aplicable para agregados ligeros por cuanto la inmersión en agua por 24 horas no asegura que los poros se llenen completamente, lo cual es un requisito necesario para poder aplicar el ensayo eficientemente.

Cálculos.

Los equipos y procedimientos para determinar la gravedad específica aparente o Bulk de los agregados finos se detallan en AASHTO T-84 y ASTM C-128.



- A : Peso en el aire del agregado seco al horno (g).
B : Peso del matraz (picnómetro) con agua (g).
C : Peso del matraz (picnómetro) con el agregado y agua hasta la marca (g).
D : Peso del material saturado superficialmente seco (500±10g).

$$\begin{aligned} \text{Gravedad específica seca aparente,} & \quad G_{sa} = \frac{A}{B + A - C} \\ \text{Gravedad específica seca Bulk,} & \quad G_{sb} = \frac{A}{B + D - C} \\ \text{Gravedad específica saturada superficialmente seca Bulk,} & \quad G_{ssb} = \frac{D}{B + D - C} \\ \text{Absorción} & \quad \text{Absorción \%} = \frac{D - A}{A} \times 100 \end{aligned}$$

2.2.9.1.4. *Porcentaje de humedad de agregados finos y grueso, norma MTC E-215.*

Objeto.

Indicar los pasos para determinar el porcentaje total de humedad a evaporarse en una muestra de agregado fino o grueso por secado.

Finalidad.

Las partículas de mayor tamaño especialmente las superiores a 50mm requerirán de más tiempo de secado para que la humedad se desplace del interior hacia la superficie, este método determina empíricamente si los métodos por secado rápido suministran la suficiente precisión para el fin requerido, cuando se sequen partículas de tamaños mayores.

La humedad que se puede evaporar incluye la superficial como la contenida en los poros del agregado, pero no considera el agua que se combina químicamente con los minerales de algunos agregados y que no es susceptible de evaporarse por lo que no está incluido en este método.

Cálculos.

El contenido de humedad total evaporable determina de la siguiente manera:



$$p = \frac{100(W - D)}{D}$$

Donde:

P = Contenido total de humedad de una muestra en porcentaje.

W = Peso de la muestra húmeda (g).

D = Peso de la muestra seca (g).

2.2.9.1.5. Determinación del porcentaje de caras fracturadas, norma MTC E-210.**Objeto.**

Este ensayo indica la técnica de determinación del porcentaje en cantidad o peso, de una muestra de agregado grueso que contiene partículas fracturadas que reúnen ciertos requerimientos especificados dentro de norma.

Finalidad.

Este método de ensayo proporciona un procedimiento estándar para la determinación de la aceptabilidad del agregado grueso, se tienen requerimientos con respecto al porcentaje de partículas fracturadas en los agregados gruesos, un propósito de estos requerimientos es maximizar el esfuerzo cortante mediante el aumento de fricción inter-partícula tanto en las mezclas de agregados sueltos como compactados, otro propósito es suministrar estabilidad a la superficie de agregados y proporcionar fricción incrementada por la textura en los pavimentos de superficie granular.

Las especificaciones varían en el número de caras fracturadas requeridas como del porcentaje en masa o cantidad de partícula a considerar, si no está especificada considerar al menos una cara fracturada y calcular el porcentaje por masa.

Cara fracturada; Superficie angular, áspera, rugosa, de un agregado ocasionada por chancado u otro medio artificial o natural.

Partícula fracturada; Si tiene al menos un número mínimo de caras fracturadas especificadas (una, dos a más).

Cálculos.

Para calcular el porcentaje de masa o porcentaje de conteo de partículas con un número especificado de caras fracturadas se usa la siguiente expresión:

$$P = \frac{F}{F + N} * 100$$

Donde :

- P = Porcentaje de partículas con caras fracturadas.
- F = Masa o cantidad de partículas con el número especificado de caras fracturadas.
- N = Masa o cantidad de partículas que no entran en el criterio de partícula fracturada.

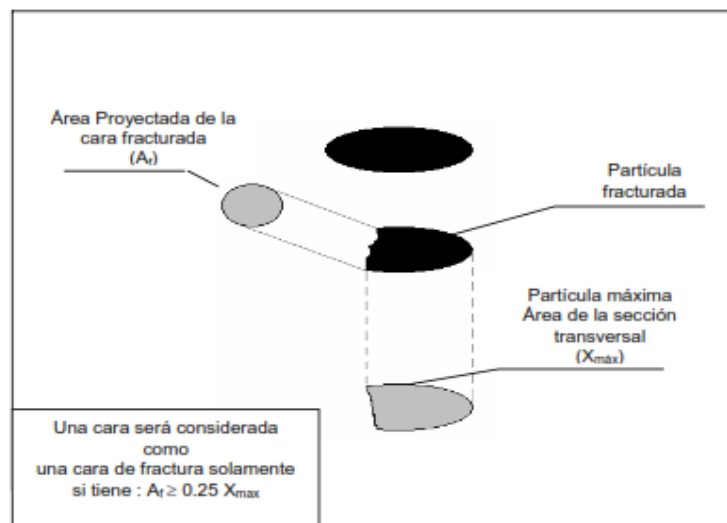


Figura 12. Esquema de una partícula fracturada, (**Fuente:** Manual de EM 2000, edición 2016, norma MTC E 210).

2.2.9.1.6. Partículas chatas y alargadas en agregados, norma MTC E-223.

Objeto.

Este método consiste en la determinación de los porcentajes de partículas chatas o alargadas en el agregado grueso.

Finalidad.

Si se tienen partículas chatas o alargadas en demasía pueden interferir con la consolidación y dificultar la colocación de los materiales, este método provee el medio para verificar si se cumple con los límites para tales partículas o para determinar la forma característica del agregado grueso.

**Cálculo.**

El cálculo se realiza sobre agregado de 3/8" o malla N°4 o mayores no menos de estas mallas, si se requiere el promedio de partículas chatas y alargadas de alguna muestra, asumir que la medida de malla no ensayada (malla de menos del 10% de la muestra) tiene el mismo porcentaje de partículas chatas y alargadas que la siguiente malla menor o la siguiente malla mayor, o utilizar el promedio de ambas mallas según el caso.

2.2.9.1.7. Desgaste de agregado abrasión de los ángeles, norma MTC E-207.**Objeto.**

Indica el procedimiento a seguir para ensayar agregados gruesos de tamaños menores a 37,5 mm (1½") y determinar la resistencia al desgaste utilizando la máquina de los ángeles.

Finalidad.

Establece la degradación de agregados de gradaciones normadas resultantes de una combinación de acciones que incluye abrasión o desgaste, impacto y trituración, en un cilindro de acero en rotación que contiene un número determinado de billas de acero, dependiendo de la gradación de la muestra de a ensayar, al entrar en rotación la muestra y las billas de acero son recogidas por una pestaña transportándolas hasta que son arrojadas al lado opuesto del tambor, creando un efecto de trituración por impacto, este ciclo es repetido mientras gira el tambor con su contenido a un número de revoluciones establecido seguidamente el agregado es retirado y tamizado para medir el porcentaje de pérdida por desgaste.

Cálculos.

La pérdida es estimada por diferencia entre el peso inicial y final de la muestra expresado en porcentaje según la ecuación:

$$\% \text{ desgaste} = \frac{\text{Peso inicial} - \text{Peso final}}{\text{Peso inicial}} \times 100$$

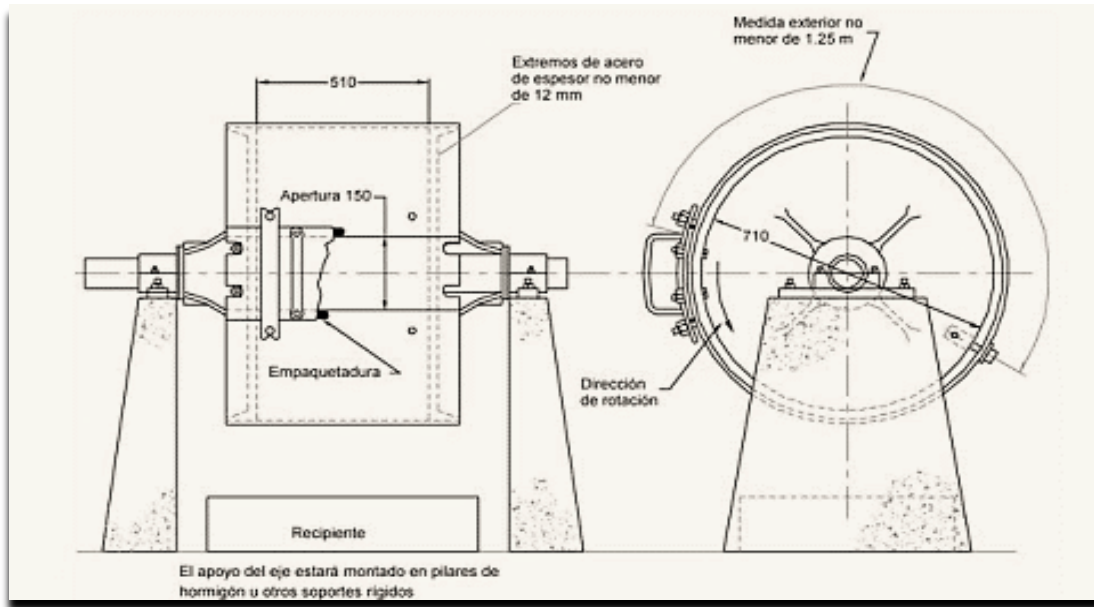


Figura 13. Máquina de abrasión de “los Ángeles”, (Fuente: Manual de ensayo de materiales EM 2000, edición 2016, norma MTC E 207).

2.2.9.1.8. Durabilidad a sulfato de sodio y/o magnesio de agregados, norma MTC E-209.

Objeto.

Definir una técnica de ensayo para determinar la resistencia de los agregados a la desintegración por medio de soluciones saturadas de sulfato de magnesio.

Finalidad.

Mide la desintegración de los agregados gruesos y finos por medio de soluciones saturadas de sulfato de sulfato de magnesio, durante 16 horas pero no más de 18 horas, de tal forma que la solución cubra toda la muestra, después del período de inmersión se saca la muestra de agregado de la solución y se lleva a secar, se repite el proceso alternado de inmersión y secado hasta que se obtenga el número de ciclos requeridos.

Esta información es útil para juzgar la alterabilidad de los agregados expuestos a la intemperie, particularmente cuando no se dispone de información adecuada sobre el comportamiento del material expuesto a condiciones atmosféricas reales.

Los resultados obtenidos por el uso de dos sales, difieren considerablemente y se debe tener el cuidado en establecer los límites correctos en especificaciones para cada uno de ellos.

**Cálculos.****Análisis cuantitativo.**

Luego de completar el ciclo y enfriado la muestra a temperatura ambiente se lava cada fracción para eliminar el sulfato utilizado, los últimos lavados serán hechos con agua destilada y cloruro de bario (BaCl_2) se comprueba que el agua está libre de sales, después se seca cada fracción de la muestra hasta peso constante a 105°C y se anotan los resultados.

El método y duración del tamizado del agregado fino será el mismo de la preparación de la muestra. No deberá emplearse manipulación extra para quebrar las partículas para hacerlas pasar por la malla. Pese el material retenido en cada malla y registre. La diferencia entre cada una de estas cantidades y el peso inicial de la fracción ensayada es la pérdida de peso y será expresada como porcentaje del peso inicial utilizado.

El agregado fino se tamiza a través del mismo tamiz en el cual estaba retenido antes del ensayo, el agregado grueso se tamiza también para cada tamaño apropiado de partícula.

2.2.9.1.9. Equivalente de arena de agregado fino, norma MTC E-114.**Objeto.**

La finalidad de este método es indicar bajo condiciones estándar, las cantidades relativas de suelos arcillosos o finos plásticos o polvo presentes en suelos granulares y agregados finos que pasan el tamiz N°4, el término “equivalente de arena”, expresa el concepto de que la mayor parte de los suelos granulares y agregados finos son mezclas de partículas gruesas y arena deseables y arcillas, finos plásticos y polvo los indeseables.

Finalidad.

El ensayo asigna un valor empírico a la cantidad relativa, fineza, y carácter del material arcilloso presente en la muestra.

Se puede asignar un valor mínimo del equivalente de arena para limitar la cantidad permisible de finos arcillosos en los agregados, este método de ensayo da una forma rápida para determinar cambios en la calidad de los agregados durante la producción o colocación en campo.

**Cálculos.**

Está determinada por la siguiente relación:

$$SE = \frac{\text{Lectura de arena}}{\text{Lectura de arcilla}} \times 100$$

Donde :

SE = Equivalente de arena (%).

2.2.9.1.10. Angularidad de agregado fino, norma MTC E-222.**Objeto.**

Esta norma está referida al contenido de vacíos de un agregado fino no compactada, cuando es medido en cualquier agregado de granulometría conocida el contenido de vacíos provee una indicación de la angularidad de ese agregado, esfericidad y textura de la superficie que pueden ser comparadas con otros agregados finos ensayados con la misma gradación.

Finalidad.

Medir el porcentaje de vacíos con aire presente en las partículas menores de 2,36 mm (pasante malla N° 8), levemente compactados.

Cálculos.

Se utiliza la siguiente ecuación:

$$A^{\circ} = \frac{V - \frac{W}{G_{sb}}}{V} \times 100$$

Donde:

W = Peso del agregado fino (g).

V = Volumen del recipiente cilíndrico conocido (cm³).

G_{sb} = Densidad del agregado (g/cm³).

A° = Angularidad.

Tabla 8. Angularidad (A°) del agregado fino en función del nivel del tránsito y la posición del pavimento.

Tránsito en 10^6 ESALS	Prof. Desde superf. <100 mm	Prof. Desde superf. >100 mm
< 0.3	-	-
< 1	40	-
< 3	40	40
< 10	45	40
< 30	45	40
< 100	45	45
≥ 100	45	45

Fuente: Manual de ensayo de materiales EM 2000 edición 2016, pág. 390.

2.2.9.1.11. Extracción cuantitativa de asfalto, norma MTC E-502.

Objeto.

- El objetivo principal es determinar la cantidad de asfalto presente en un pavimento asfáltico expresado en porcentaje, así como la granulometría de los agregados utilizados, toma importancia este ensayo cuando se quiere verificar la calidad de una carpeta asfáltica.

Finalidad:

- Conocer las cantidades de agregado y asfalto presentes para poder utilizarlo o realizarlos en otros diseños de mezclas asfálticas.

Cálculos.

Peso muestra:

$$P.muestra = P_{muestra+recipiente} - P_{recipiente}$$

Peso agregado:

$$P.agregado = P_{agregado+recipiente} - P_{recipiente}$$

Contenido de asfalto:

$$\% \text{ de asfalto} = \frac{P. \text{ muestra} - P. \text{ del Agregado}}{P. \text{ m. de asfalto}} * 100$$

2.2.9.1.12. Penetración de materiales bituminosos, norma MTC E-304.

Objeto.

Este ensayo describe el procedimiento a seguir para determinar la penetración asfaltos de carácter sólido y semisólido.

Finalidad y alcance.

El ensayo de penetración es utilizado como una medida para la determinación de la consistencia del asfalto, valores altos de penetración indican una consistencia más suave.

Cálculos

Se toma el promedio de tres penetraciones ejecutadas sobre la muestra ensayada.

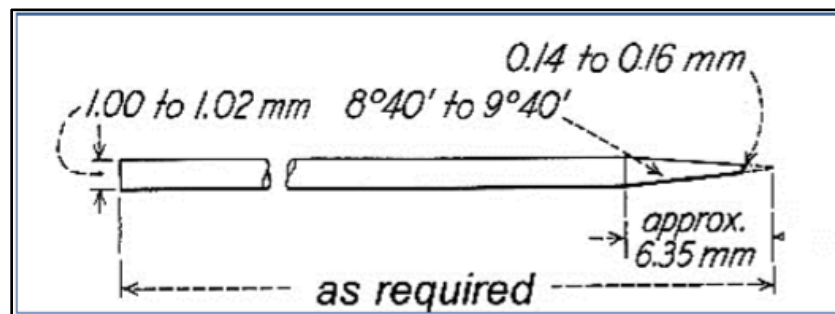


Figura 14. Aguja para prueba de penetración, (Fuente: Manual de ensayo de materiales EM 2000, edición 2016, norma MTC E 304).

2.2.9.1.13. Carga de partículas de emulsiones asfálticas, norma MTC E-407.

Objeto.

Identificar con qué tipo de emulsión asfáltica se va trabajar catiónica o aniónica.

**Finalidad.**

Las emulsiones catiónicas son identificadas por el transporte de las partículas positivas (+) a un electrodo cargado negativamente (-) en una celda electrolítica, la determinación de la polaridad de la emulsión define con que tipos de agregados trabajar sean estos calcáreos (básicos), silicatos (ácidos).

Cálculos.

Solamente se reporta en que electrodo hay recubrimiento que define el tipo de emulsión utilizado además de reportar el nivel de corriente utilizado.

2.2.9.1.14. Recubrimiento y adherencia, manual americanos MS-14.**Objeto.**

Medir de forma visual el nivel de recubrimiento y adherencia en agregados gruesos finos y agregados reciclados.

Finalidad y alcance.

Descartar el uso de un agregado que no llega a satisfacer el examen visual en cuanto a recubrimiento o adherencia; así como sugerir el cambio de emulsión utilizado por otro de características más favorables.

Cálculos.

Solamente se reporta en que electrodo hay recubrimiento que define el tipo de emulsión utilizado además de reportar el nivel de corriente utilizado.

2.2.9.1.15. Viscosidad Saybolt Furol de emulsiones asfálticas, norma MTC E-403.**Objeto.**

Encontrar la viscosidad o consistencia de las emulsiones asfálticas por medio del viscosímetro Saybolt Furol.

Finalidad.

La viscosidad adquiere importancia en las emulsiones asfálticas porque es una propiedad que afecta su empleo cuando es usado en diferentes tipos de aplicación en obras viales, el material debe ser lo bastante delgado para aplicado a través de la barra rociadora del distribuidor, así como bastante grueso y no fluya desde la corona o pendiente del camino, para algunas mezclas la viscosidad puede afectar la misibilidad y grosor de película en el agregado, la viscosidad de las emulsiones es afectada por el esfuerzo de corte, por lo que se necesita excelente adherencia previa al procedimiento de prueba para lograr precisión.

Cálculos.

Se toma el tiempo que demora el fluido de 60 cm³ de emulsión asfáltica que pasa por el sistema, si es necesario se corrige con el factor de calibración, según el orificio utilizado en el viscosímetro Saybolt Furol y a la temperatura a cual se realiza el ensayo.

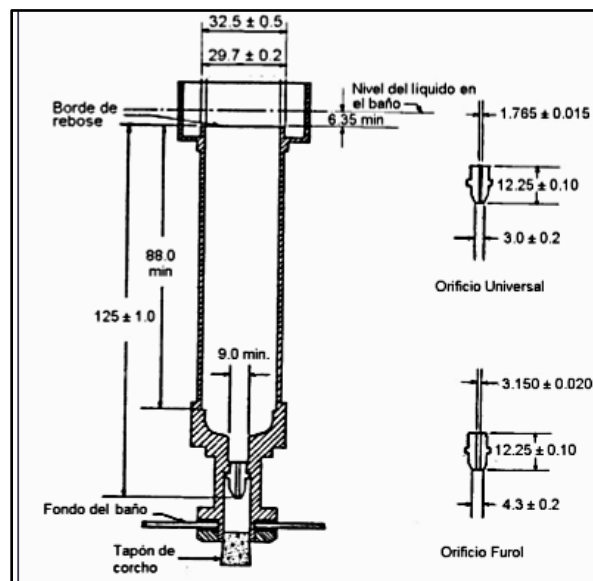


Figura 15. Viscosímetro Saybolt con orificio universal y Furol, (Fuente: Manual de ensayo de materiales EM 2000, edición 2016, norma MTC E 403).

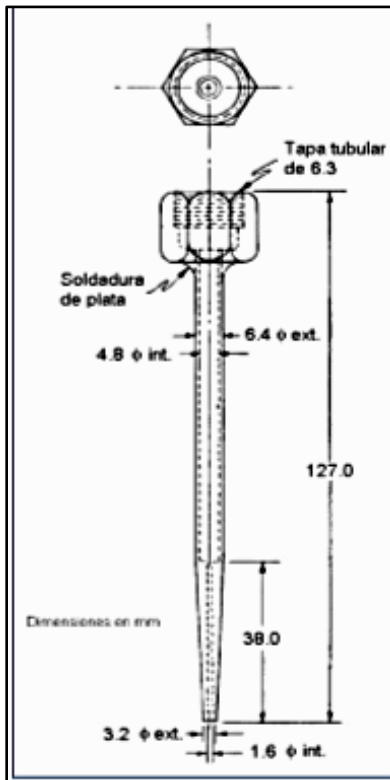


Figura 16. Tubo en forma de pipeta para usarlo con el viscosímetro Saybolt (**Fuente:** Manual de ensayo de materiales EM 2000, edición 2016, norma MTC E 403).

2.2.9.1.16. Destilación de emulsiones asfálticas, norma MTC E-401.

Objeto.

Encontrar los porcentajes de destilado de aceite y residuo de asfaltos emulsionado para tener la aceptación del servicio y el control de la investigación, también se usa este método para realizar más pruebas adicionales al destilado de aceite como al residuo.

Finalidad.

Se destila una muestra de 200g. de emulsión asfáltica hasta una temperatura de 260°C y se determina la cantidad de residuo, importantísimo para el diseño de mezcla, a este residuo también se puede realizar los ensayos de penetración, solubilidad, ductilidad, peso específico y ceniza.

**Cálculos.**

El porcentaje de residuo por destilación y de aceite destilado, se calculan mediante las siguientes expresiones:

$$\text{Residuo por Destilación \%} = \frac{(P_f - P_t) + 1.5}{P_i - P_t} \times 100$$

Donde:

P_t = Peso retorta y accesorios.

P_i = Peso retorta y accesorios + emulsión.

P_f = Peso retorta y accesorios + residuo.

$$\text{Aceite Destilado \%} = \frac{\text{Volumen de Aceite Destilado en cc}}{2}$$

2.2.9.1.17. *Peso específico aparente y peso unitario de mezclas asfálticas compactadas, empleando especímenes saturados de superficie seca, norma MTC E-514.*

Objeto.

Hallar el peso específico aparente y el peso unitario de briquetas de mezclas asfálticas compactadas, para emplearse en diseño de mezclas densas no absorbentes.

Finalidad.

Esta metodología no debe aplicarse a briquetas que absorban más de 2% de agua al momento de ser ensayadas es útil para determinar el porcentaje de vacíos de aire, así como el grado de compactación y el peso unitario de mezclas Asfálticas densas compactadas, el peso específico es adimensional, es necesario una conversión de unidades, esto se hace multiplicando el peso específico a la temperatura dada por el peso unitario del agua a esa temperatura.

Cálculos.

Ecuación para la determinación del peso específico aparente en briquetas compactadas:

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{A}{(B - C)}$$

**Donde:**

- A = Peso de la briqueta seca (g).
 B-C = Peso del volumen de agua de la briqueta a 25°C (g).
 B = Peso en el aire de la briqueta saturada superficialmente seca (g).
 C = Peso de la briqueta sumergida en el agua a 25°C (g).

Peso específico aparente a 25°C = K x peso específico aparente a una temperatura dada

Donde:

K es determinada por **tabla**, esta expresión de valida si no se varia más de 3°C. Para una diferencia de temperatura mayor de 3°C.

Tabla 9. Densidades relativas del agua y factores de conversión K, para varias temperaturas.

Densidades relativas del agua		
Temperatura el agua °C	Densidad relativa del agua	Factor de conversión (K)
18	0.9986244	1.0004
19	0.9984341	1.0002
20	0.9982343	1.0000
21	0.9980233	0.9998
22	0.9978019	0.9996
23	0.9975702	0.9993
24	0.9973286	0.9991
25	0.9970770	0.9989
26	0.9968156	0.9986
27	0.9965451	0.9983
28	0.9962652	0.9980
29	0.9959761	0.9977
30	0.9956780	0.9974

Fuente: Manual de ensayo de materiales EM 2000 edición 2016, pág. 643.

2.2.9.1.18. Peso específico teórico máximo de mezclas asfálticas, norma MTC E-508.

Objeto.

Hallar el peso específico teórico máximo de mezclas asfálticas para pavimento sin compactar.

**Finalidad.**

El peso específico teórico máximo y la densidad de mezclas asfálticas son propiedades fundamentales cuyos valores dependen de la composición de la mezcla en términos de cantidad de agregados y asfalto en este caso emulsión asfáltica.

El peso específico máximo se usa para determinar el porcentaje de vacíos de aire en mezclas asfálticas compactadas, así como la cantidad de asfalto absorbido por el agregado, finalmente da valores referenciales para la compactación de las mezclas.

Cálculos.

Cálculo del peso específico de la muestra en el agua.

$$\text{Peso específico} = \frac{A}{(A - C)}$$

Donde:

A = Peso de la muestra seca al aire en gramos.

C = Peso de la muestra en agua en gramos.

Cálculo del peso específico con el picnómetro a 25°C.

$$\text{Peso en el aire} = \frac{A}{(A + D - E)}$$

Donde:

A = Peso de la muestra seca en el aire (g).

C = Peso del recipiente lleno con agua a 25° C, (g).

E = Peso del recipiente lleno con agua y muestra a 25° C, (g).

Cálculo del peso específico con el picnómetro plástico de tamaño grande Tipo D. Si la temperatura de ensayo está entre 22,2 y 26,7°C, si la temperatura de ensayo difiere significativamente de 25°C:

$$\text{Peso específico} = \frac{A}{[(A + F) - (G + H)]} \times \frac{dw}{0,9970}$$

**Donde:**

A = Peso de la muestra seca al aire (g).

F = Peso del picnómetro (Tipo F) lleno con agua a la temperatura de ensayo (g).

G = Peso del picnómetro (Tipo F) lleno con agua y muestra a la temperatura de ensayo (g).

H = Corrección por expansión térmica del asfalto (g).

dw = Peso unitario del agua a la temperatura de ensayo kg/m³

0,9970 = Peso unitario del agua a 25°C, kg/m³.

2.2.9.1.19. Porcentaje de vacíos de aire en mezclas asfálticas compactadas densas, norma MTC E-505.**Objeto.**

Hallar el valor del porcentaje de vacíos en mezclas asfálticas compactadas densas.

Finalidad.

El valor del porcentaje de vacíos de mezclas asfálticas es usado como criterios tanto en los métodos de diseño, como en la evaluación de la compactación alcanzada en proyectos de pavimentos asfálticos.

Cálculos.

El porcentaje de vacíos de una mezcla asfáltica compactada se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ vacíos de aire} = 100 \times (1 - (\text{Peso específico Aparente} / \text{Peso específico teórico máximo}))$$

2.2.9.1.20. Resistencia a inmersión – compresión de mezclas asfálticas compactadas, norma MTC E-518.**Objeto.**

Determinar que canto influye el agua en la resistencia a la compresión en mezclas asfálticas compactadas que contienen cemento asfáltico (residuo de emulsión asfáltica).

**Finalidad.**

Este ensayo analiza la pérdida de resistencia a la compresión ocasionada por la acción del agua en mezclas asfálticas compactadas que contienen cemento asfáltico, se define un valor numérico de reducción de la resistencia a la compresión que es obtenido de la comparación de dos briquetas recién moldeadas y curadas una de ellas ha sido sumergido en agua bajo ciertas condiciones y la otra no (muestra seca).

En consecuencia la finalidad es usarlo como un indicador de la susceptibilidad a la humedad de mezclas asfáltica compactada (agregado, asfalto).

Cálculos.

El valor de la resistencia inmersión – compresión es hallada mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Resistencia compresión retenida (\%)} = (S2/S1) \times 100$$

Donde:

S1 = Resistencia a la compresión de briquetas secas (primer grupo 1).

S2 = Resistencia a la compresión de briquetas sumergidas en agua 24 horas (segundo grupo 2).

2.2.9.1.21. Estabilidad y flujo ensayo Marshall de mezclas asfálticas compactadas, norma MTC E-504.**Objeto.**

Preparar briquetas compactadas de mezclas asfálticas de 64 mm de altura y 102 mm de diámetro, calcular sus diferentes parámetros de comportamiento, por medio del equipo Marshall.

Finalidad.

La estabilidad y flujo Marshall junto con la densidad, vacíos de aire, vacíos en el agregado mineral o vacíos llenados con asfalto; son empleados para el diseño de mezclas en laboratorio, así también la estabilidad y flujo Marshall son usados para monitorear los procesos productivos de mezcla en planta y como referencia para evaluar diferentes mezclas y sus efectos por acción del agua.



La estabilidad Marshall es la máxima resistencia a la deformación a una razón constante de carga, el flujo Marshall es una medida de la deformación de la mezcla asfáltica, 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.

Cálculos.

Las briquetas moldeadas en laboratorio deben de tener un espesor de $63,5 \pm 2,5$ mm, Los especímenes dentro de la tolerancia de espesor pueden ser corregidos basados en el volumen de la briketa, la razón de correlación es empleada de la siguiente manera:

$$A = B \times C$$

Donde:

A = Estabilidad corregida.

B = Medida de la estabilidad (carga).

C = Razón de correlación.

2.2.9.1.22. Resistencia a tracción indirecta de mezclas con emulsión asfáltica compactadas, norma INV E-785.

Objeto.

Determinar la carga última de falla de una briketa sometida a una fuerza de deformación constante de 50.8 mm/minuto sobre su eje diametral.

Finalidad.

El ensayo de resistencia a la tensión o tracción indirecta se usa para ensayar briquetas de mezcla con asfalto o emulsión asfáltica, compactadas y curadas tanto bajo condición seca como húmeda. La resistencia a la tensión indirecta también es un ensayo físico-mecánico que nos ayuda a definir la capacidad de soporte de la carpeta asfáltica de la vía a diseñar y para qué tipo de tráfico.

**Cálculos.**

La resistencia a tracción indirecta de una briqueta se calcula con la siguiente ecuación, en unidades de kPa:

$$R_t = \frac{2000P}{\pi L D} \quad [kPa]$$

Donde:

R_t = Resistencia a tracción indirecta (kPa).

P = Máxima carga aplicada (N).

L = Altura de la briqueta (mm).

D = Diámetro de la probeta (mm).

2.2.9.1.23. Análisis volumétrico de mezclas asfálticas compactadas, norma INV E-799.**Objeto.**

Este ensayo proporciona los procedimientos para llevar a cabo el análisis volumétrico de briquetas de mezcla asfáltica, para lo cual presenta los métodos para determinar las siguientes características volumétricas como son:

- Porcentaje en volumen de vacíos de aire (V_a) o contenido de vacíos de aire.
- Porcentaje en volumen de vacíos en el agregado mineral (VAM).
- Porcentaje en volumen de vacíos llenos de asfalto (VFA).
- Volumen efectivo de ligante asfáltico (Vbe).
- Contenido de asfalto efectivo, expresado en % de la masa de la mezcla (Pbe).
- Relación de polvo, llenante- asfalto efectivo (P0.075 /Pbe).

Estos valores son determinados a partir de medida de los pesos específicos del ligante asfáltico, de los agregados gruesos y finos, de la mezcla compactada y sin compactar.

Finalidad.

Este ensayo es apropiado para el control en campo de la mezcla asfáltica, los parámetros volumétricos son críticos para alcanzar un comportamiento satisfactorio del pavimento a largo



plazo, por otro lado la norma pretende controlar las características volumétricas de la mezcla asfáltica compactada del diseño en laboratorio para su aplicación en campo.

Cálculos.

Para el cálculo volumétrico de mezclas asfálticas se tiene las siguientes ecuaciones:

Cálculo gravedad específica **Gsb** del agregado combinado:

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \frac{P_3}{G_3}}$$

Donde:

P (1, 2,3,...n) = Peso de cada agregado que interviene en la mezcla como también de la emulsión asfáltica, expresados en porcentaje.

G (1, 2,3,...n) = Peso específico de cada agregado que interviene en la mezcla como también de la emulsión asfáltica, expresados en porcentaje.

Gsb = Peso específico de la combinación de agregados.

Se determina la gravedad específica máxima teórica para cada proporción de agregado y emulsión asfáltica y se reporta como **Gmm**.

Se determina la gravedad específica bulk de cada briqueta compactada y se reporta como **Gmb**.

Cálculo del porcentaje de vacíos entre las partículas del agregado mineral **VAM**:

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

Donde:

Gmb = Gravedad específica aparente de la mezcla compactada.

Ps = Porcentaje de agregado respecto al peso total de la mezcla.

Gsb = Gravedad específica de la combinación de agregados.

VMA = % de Vacíos en el agregado mineral del total del volumen de la mezcla.



Cálculo del porcentaje de vacíos de aire de la mezcla compactada **Pa =Va:**

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

Donde:

Va = Pa = Porcentaje total de vacíos de aire de la mezcla compactada.

Gmm = Peso específico máximo teórico.

Gmb = Peso específico aparente de mezclas compactadas.

Cálculo del porcentaje de vacíos llenos de ligante asfáltico **VFA:**

$$VFA = \frac{VAM - V_a}{VAM} \times 100$$

Donde:

VAM = % de Vacíos en el agregado mineral del total del volumen de la mezcla.

Va = % de aire total en la mezcla compactada.

2.2.9.1.24. Modelos de predicción matemáticos para obtener el módulo de rigidez o módulo dinámico de mezclas asfálticas compactadas, método correlacional.

Objeto

Determinar el Módulo de Rigidez o Dinámico por métodos numéricos de predicción, de acuerdo a fórmulas correlacionales.

Finalidad.

El módulo de rigidez de una mezcla asfáltica se describe como el valor absoluto de la relación entre el esfuerzo máximo y la deformación unitaria máxima, obtenido en un ensayo a compresión uniaxial o triaxial a flexión y tracción indirecta, utilizando cargas en forma cóncava.



Las fórmulas correlaciones, hacen que determinar el módulo de rigidez sea un proceso más corto y preciso; se conocen cuatro métodos de aplicación matemática que permiten conocer el valor del módulo dinámico utilizando diferentes variables, estos son: las fórmulas de Bonnaure, del Instituto del Asfalto, de Heukelomy Klomp y la fórmula de Witczak.

La finalidad de este ensayo es identificar las cargas por fatiga y energía ocasionada por acciones repetitivas que simulan las cargas continuas del tránsito con ello se puede predecir el comportamiento en servicio de las mezclas asfálticas con una mayor precisión.

Cálculos.

a) Fórmulas de Bonnaure.

Considera cuatro factores que son utilizados en la determinación del módulo dinámico del asfalto y a partir de ello se calcula el módulo dinámico de la mezcla asfáltica.

$$1 \quad 10.82 \frac{1.342(100 V_g)}{V_g V_b} \quad (1)$$

$$2 \quad 8.0 \quad 0.00568V_g \quad 0.0002135V_g^2 \quad (2)$$

$$3 \quad 0.6 \text{Log} \frac{1.37V_b^2 - 1}{1.33V_b - 1} \quad (3)$$

$$4 \quad 0.7582(1 - 2) \quad (4)$$

$$\text{Para : } 5 \times 10^6 \text{ N/m}^2 \leq S_b \leq 10^9 \text{ N/m}^2 \quad (5)$$

$$\text{Log} S_m = \frac{4}{2} - \frac{3}{2} \text{Log} S_b - 8 - \frac{4}{2} - \frac{3}{2} / \text{Log} S_b - 8 / 2$$

$$\text{Para : } 10^9 \text{ N/m}^2 \leq S_b \leq 3 \times 10^9 \text{ N/m}^2 \quad (6)$$

$$\text{Log} S_m = 2 - 4 - 2.0959(1 - 2 - 4)(\text{Log} S_b - 9)$$

**Donde:**

S_m = Módulo dinámico de la mezcla asfáltica (N/m²).

V_b = Porcentaje en volumen de asfalto de la mezcla (%).

V_g = Porcentaje en volumen de agregados de la mezcla (%).

S_b = Módulo dinámico del asfalto (N/m²).

Si S_m y S_b se dan en lb/pulg², la ecuación es la siguiente:

$$\log S_m = \frac{4}{2} \log S_b + 4.1612 - \frac{4}{2} \log S_b + 4.1612 + 2 \cdot 3.8388 \quad (7)$$

$$\text{Para: } 145,000 \text{ lb/pulg}^2 \leq S_b \leq 435,000 \text{ lb/pulg}^2 \quad (8)$$

$$\log S_m = 2 + 4 \cdot 2.0959 (\log S_b - 5.1612) + 3.8388$$

b) Fórmulas del Instituto del Asfalto

Este método utiliza unos factores de determinación del módulo dinámico, y su particularidad es el uso de la viscosidad del asfalto como variable.

$$|E^*| = 100,000 \cdot 10^{-1} \quad (9)$$

$$1 + 3 \cdot 0.000005 + 2 \cdot 0.00189 + 2 f^{1.1} \quad (10)$$

$$2 + 4^{0.5} T^{-5} \quad (11)$$

$$3 = 0.553833 + 0.028829 (p_{200} f^{0.1703}) + 0.03476 V_v + 0.070377 + 0.931757 f^{0.02774} \quad (12)$$

$$4 = 0.483 V_b \quad (13)$$

$$5 = 1.3 + 0.49825 \log(f) \quad (14)$$

**Donde:**

- E^* = Módulo dinámico de la mezcla asfáltica (Lb/pulg²).
 F = Frecuencia correspondiente a la velocidad de operación (Hertz).
 T = Temperatura de la mezcla (°F).
 P_{200} = Porcentaje en peso del agregado que pasa tamiz N.º 200 (%).
 V_v = Porcentaje en volumen de vacíos con aire (%).
 V_b = Porcentaje en volumen de asfalto (%) = Viscosidad del asfalto a 70°F (10⁶ poises).

La viscosidad del asfalto se puede estimar a una temperatura de 70 °F con la ecuación:

$$29,508.2(P_{77°F})^{2.1939} \quad (15)$$

Donde:

$P_{77°F}$ = Penetración del asfalto a 77°F (25°C).

c) Fórmulas de Heukelom y Klomp

Permite conocer el módulo dinámico de la mezcla asfáltica a partir del módulo dinámico del asfalto y de los porcentajes en volumen de los constitutivos de la mezcla:

$$S_m = S_b \left[1 + \frac{2.5}{n} \left(\frac{C_v}{1 - C_v} \right) \right]^n \quad (16)$$

Donde:

- E = Módulo dinámico de la mezcla asfáltica (lb/pulg²).
 S_b = Viscosidad del ligante (106 poises).
 f = Frecuencia de carga (hertz).
 V_a = Porcentaje en volumen de aire (%).
 V_{beff} = Porcentaje en volumen efectivo de ligante (%).
 P_{34} = Porcentaje retenido en el tamiz 3/4".

$$n = 0.83 \text{Log} \left(\frac{4 \times 10^4}{S_b} \right) \quad (17)$$

Donde:

Sm y Sb en MPa

Esta fórmula solo aplica si Sb es superior a 10 MPa, y para valores de $0.7 < C_v < 0.9$

Si el valor de vacíos de la mezcla es superior a 3%, Fijin Van Draat (Huang, 2004) recomienda hacer la siguiente corrección:

$$C_v = \frac{V_g}{V_g - V_b} \frac{\text{Volumen de los granulares}}{\text{Volumen (Granular - Bitumen)}} \quad (18)$$

$$C_v = \frac{C_v}{1 - \frac{(V_v - 3)}{100}} \quad (19)$$

Donde:

Vb = Porcentaje en volumen de bitumen o de asfalto.

Vg = Porcentaje en volumen de agregados de la mezcla asfáltica.

Vv = Porcentaje en volumen de vacíos.

d) Fórmula de Witczak

Este método fue desarrollado teniendo en cuenta la composición de la mezcla asfáltica, y se condensa en una única expresión matemática, mostrada a continuación:

$$\text{Log}(E) = 3.750063 - 0.02932P_{200} - 0.001767(P_{200})^2 - 0.002841P_4 - 0.058097V_a - 0.802208 \frac{V_{b\text{eff}}}{V_a} \quad (20)$$
$$\frac{3.871977 - 0.0021P_4 - 0.003958P_{38} - 0.000017(P_{38})^2 - 0.005470P_{34}}{1 - e^{0.603313 - 0.313351\text{Log } f - 0.393532\text{Log } f}}$$

P38 = Porcentaje retenido en el tamiz 3/8".

P4 = Porcentaje retenido en el tamiz N.º 4.

P200 = Porcentaje pasa en el tamiz N.º 200.

2.2.9.1.25. Metodología de diseño de mezcla Marshall modificado, método instituto del asfalto (USA) adaptado a la presente Tesis.

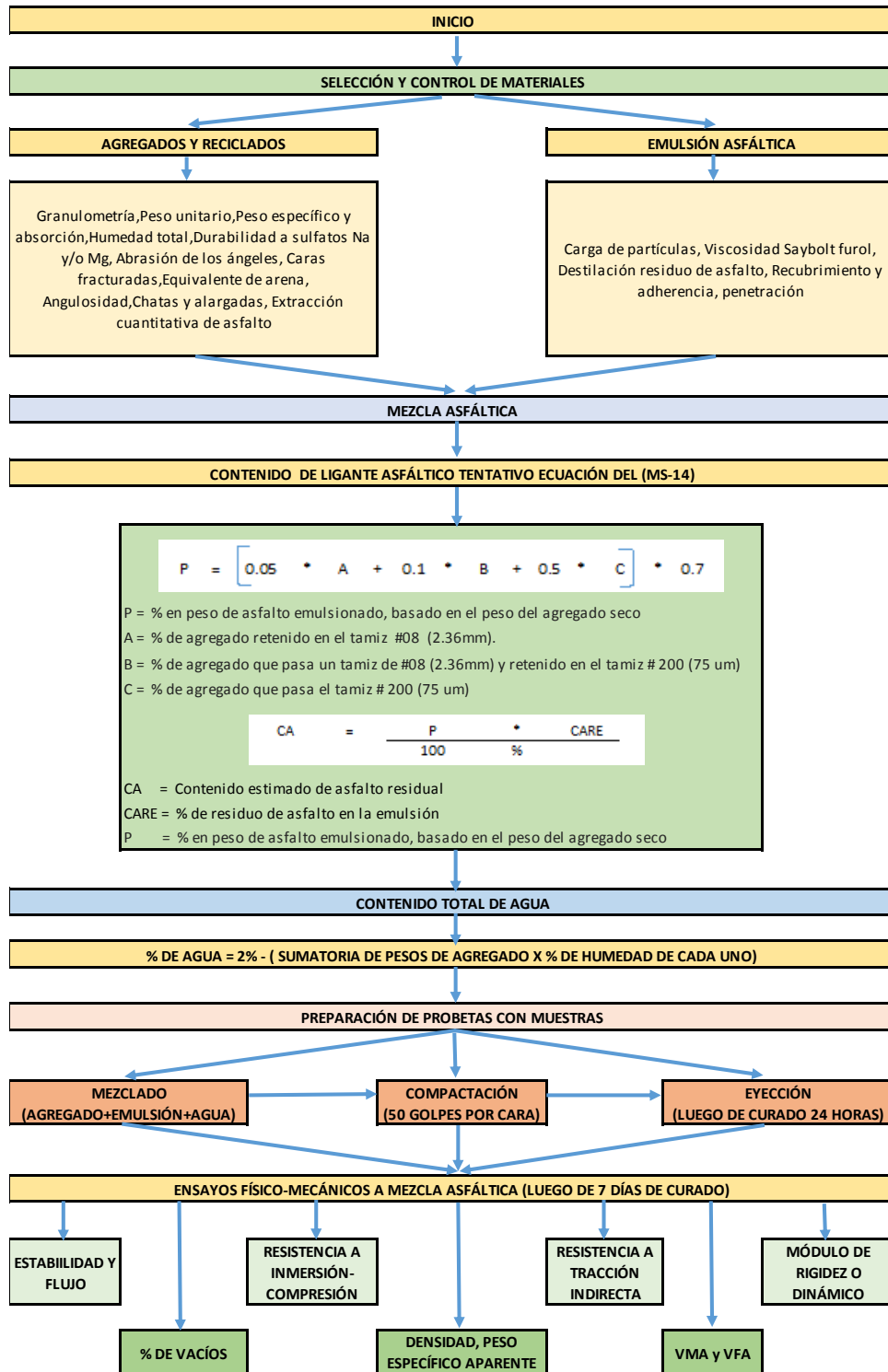


Figura 17. Esquema Metodológico de diseño de mezcla Marshall modificado, (Fuente: Elaboración propia, adaptado del esquema de Galván H., UNI, Lima, 2015).

**Objeto.**

Determinar el contenido tentativo de asfalto y el contenido residual de asfalto en la emulsión asfáltica expresado en porcentaje en peso de la muestra total, mediante la aplicación de fórmulas definidas por norma.

Finalidad.

El contenido de asfalto que debe contener la mezcla es determinado por una ecuación que relaciona los porcentajes de agregado usados en un diseño definido; así mismo el contenido de asfalto residual es el porcentaje de asfalto presente en la emulsión, teniendo estos dos valores se estima la cantidad de emulsión asfáltica aproximada en la mezcla asfáltica; en definición se puede decir que la metodología de diseño Marshall modificado da los porcentajes preliminares al diseño final de la mezcla asfáltica para la realización de los ensayos físico – mecánicos correspondientes.

Cálculos.**a) Contenido de ligante asfáltico tentativo.**

El contenido de Asfalto residual tentativo se determina en base al análisis granulométrico del agregado o de la mezcla de agregados y de la capacidad de absorción de estos, existen varios métodos para determinar el contenido óptimo de Emulsión, siendo el método de Instituto del Asfalto (USA) la más empleada y de aplicación en la presente tesis.

b) Método instituto del asfalto (USA).

El método busca determinar un porcentaje de asfalto residual por peso de la mezcla, iniciando con la aplicación de una fórmula empírica basada en las características granulométricas del agregado:

$$P = (0.05 \times A + 0.1 \times B + 0.5 \times C) \times 0.7$$

Donde:

P = porcentaje (*) por peso de Emulsión Asfáltica, basado en el peso de agregado seco.

A = porcentaje (*) de agregado retenido en la malla N°8.

B = porcentaje (*) de agregado que pasa la malla N° 8 y es retenido en la malla N° 200.

C = porcentaje (*) de agregado que pasa la malla N° 200.

(*) Expresado como un número entero.



Con este valor de P, se obtiene el Contenido Estimado de Asfalto Residual (CA) con la expresión:

$$CA = \frac{P \times CARE}{100}$$

Donde:

CARE = Contenido de Asfalto Residual en la Emulsión (%).

CA = Contenido de Asfalto Residual total por peso de la Mezcla (%).

El CA es un punto de partida para la aplicación del método de diseño, con el cual se calcula el porcentaje de contenido tentativo de Ligante Asfáltico en torno al cual se van haciendo variaciones que pueden ser cada 0.5% (+ 0.5% ó + 1.0%); así dentro de ese rango está el contenido óptimo de emulsión asfáltica.

c) Contenido Total de Agua en la Mezcla.

Comprende la sumatoria de los contenidos de agua en la emulsión asfáltica, humedad natural y agua de pre mezclado.

El contenido de humedad natural de la mezcla, es la relación que existe entre el peso de agua de una muestra del material y el peso sólido del mismo, expresado en porcentaje.

El contenido de agua de pre mezcla es el medio por el cual la emulsión asfáltica puede recubrir el agregado observado en el ensayo de recubrimiento.

Adicionalmente se determina el contenido de agua para la compactación, necesario para maximizar las propiedades de la mezcla deseada, debido a que el contenido de agua define las propiedades de densificación de las briquetas compactadas, su valor se observa en la curva Estabilidad vs Contenido de Agua de compactación, donde el valor óptimo es el punto más alto de la curva después del curado, las briquetas son sometidas a varios ensayos para evaluar sus propiedades de Ingeniería, en este caso los ensayos Físico – Mecánicos propuestos en la presente tesis.



2.3. Hipótesis.

2.3.1. Hipótesis general.

Los valores de las magnitudes de las propiedades físico-mecánicas, de la mezcla asfáltica en frío, elaborado con agregados reciclados y emulsión asfáltica de rotura lenta, **Difieren positivamente en todos los ensayos físico-mecánicos definidos**, en referencia a la mezcla patrón y los resultados obtenidos son superiores a los valores mínimos requeridos.

2.3.2. Sub hipótesis

2.3.2.1. Sub hipótesis N° 1

La Estabilidad y Flujo de la mezcla asfáltica en frío, elaborado con agregados reciclados y emulsión asfáltica de rotura lenta, **Difiere positivamente**, en referencia a la mezcla patrón, y los resultados obtenidos son superiores a los valores mínimos requeridos.

2.3.2.2. Sub hipótesis N° 2

La Resistencia a Inmersión - Compresión de la mezcla asfáltica en frío, elaborado con agregados reciclados y emulsión asfáltica de rotura lenta, **Difiere positivamente**, en referencia a la mezcla patrón, y los resultados obtenidos son superiores a los valores mínimos requeridos.

2.3.2.3. Sub hipótesis N° 3

La Resistencia a Tracción Indirecta de la mezcla asfáltica en frío, elaborado con agregados reciclados y emulsión asfáltica de rotura lenta, **Difiere positivamente**, en referencia a la mezcla patrón, y los resultados obtenidos son superiores a los valores mínimos requeridos.

2.3.2.4. Sub hipótesis N° 4

El Módulo de Rigidez de la mezcla asfáltica en frío, elaborado con agregados reciclados y emulsión asfáltica de rotura lenta, **Difiere positivamente**, en referencia a la mezcla patrón, y los resultados obtenidos son superiores a los valores mínimos requeridos.



2.4. Definición de variables.

2.4.1. Variables independientes.

- Diseño de Mezcla asfáltica Patrón.
- Diseño de Mezcla asfáltica en frío; elaborado con agregados reciclados y emulsión asfáltica de rotura lenta.

2.4.1.1. Indicadores de variables independientes.

- % de agregado grueso.
- % de agregado fino.
- % óptimo de emulsión asfáltica de rotura lenta.
- % de agregados reciclados.
- % de agua.

2.4.2. Variable dependiente.

- Magnitud de las Propiedades Físico-Mecánicas de la mezcla asfáltica en frío, elaborado con agregados reciclados y emulsión asfáltica de rotura lenta.

2.4.2.1. Indicadores de Variables Dependientes

- Fuerza y longitud.
- Fuerza sobre área.
- Fuerza sobre área.
- Fuerza sobre área.

2.4.3. Cuadro de operacionalización de variables.

Tabla 10. Cuadro de operacionalización de variables.

¿En qué medida difieren los valores de las magnitudes de las propiedades físico-mecánicas de una mezcla asfáltica en frío, elaborado con agregados reciclados y emulsión asfáltica de rotura lenta, en referencia a una mezcla patrón?						
OPERACIONALIZACION DE VARIABLES						
Nombre de la Variable	Descripcion	Nivel	Indicador	Unidades del Indicador	Instrumento Metodologico	Instrumentos de Ingenieria
VARIABLE DEPENDIENTE						
VARIABLE DEPENDIENTE Magnitud de las Propiedades Físico-Mecánicas de la mezcla asfáltica en frío, elaborado con agregados reciclados y emulsión asfáltica de rotura lenta.	Se refiere a las pruebas de carga a las que son sometidas las briquetas compactadas, fabricadas con el fin de saber cuanto puede resistir favorable o desfavorablemente un diseño de mezcla a proporciones de agregado y emulsión asfáltica diferentes y encontrar la dosificación más adecuada que reúna las condiciones requeridas para su uso en carreteras, determinadas a partir de ensayos de laboratorio normados.	Estabilidad y flujo, Resistencia a Inmersión-Compresión, Resistencia a Tracción indirecta, Módulo de Rigidez.	Fuerza y longitud, Fuerza sobre área, Fuerza sobre área, Fuerza sobre área.	kN y mm kg-f/cm ² kg-f/cm ² kg-f/cm ²	Formatos, Fichas, Tablas, Gráficos, Abacos, Hojas de calculo, Fórmulas teóricas.	Equipo: Estabilidad y flujo Marshall, Baño Maria, Ejector de Muestras de Asfalto, Balanza de flotabilidad, Balanza Electronica, Universal de compresión Axial, Compresión Diametral, Máquina de los Angeles, Horno Eléctrico. Herramientas: Bandejas y recipientes, espátula, Briquetas, Vernier, escuadra, Manual de ensayo de Materiales EM 2000 MTC, Manual de Carreteras Especificaciones Generales para Construcción (EG-2013), Otros manuales, Software Estadístico Especializado.
VARIABLE INDEPENDIENTE						
VARIABLE INDEPENDIENTE Diseño de Mezcla Patrón.	Se define el diseño de mezcla bituminosa en frío, compuesta por: agregado de cantera, emulsión asfáltica de rotura lenta, agua; de acuerdo a curvas granulométricas para agregados de mezclas en frío; así mismo se obtiene el porcentaje óptimo de emulsión asfáltica y la cantidad de agua requerida, de acuerdo a las Normas establecidas en el Manual de ensayo de materiales EM 2000 MTC, Manual de Carreteras "Especificaciones Técnicas Generales para Construcción" (EG-2013) y Otros Manuales Internacionales.	Diseño mezcla asfáltica patrón.	% de agregados grueso y fino de acuerdo a curvas granulométricas. % óptimo de Emulsión Asfáltica de rotura lenta. % óptimo de agua.	%	Formatos, Fichas, Tablas, Gráficos, Abacos, Hojas de calculo, de uso para todos los ensayos.	Equipo: Extractor Centrifuga para asfalto, Penetrometro de Asfalto, Tamizador Mecánico, Balanza de flotabilidad, Balanza Electrónica, Máquina de los Angeles, Viscosímetro. Herramientas: Bandejas y recipientes, espátula, Briquetas, Vernier, escuadra, Manual de ensayo de Materiales EM 2000 MTC, Manual de Carreteras Especificaciones Generales para Construcción (EG-2013), Otros manuales, Software Estadístico Especializado.
VARIABLE INDEPENDIENTE Diseño de Mezcla con agregados reciclados	Se define el diseño de mezcla bituminosa en frío, compuesta por: agregado de cantera y agregado reciclado, emulsión asfáltica de rotura lenta, agua; de acuerdo a curvas granulométricas para agregados de mezclas en frío; así mismo se obtiene el porcentaje óptimo de emulsión asfáltica y la cantidad de agua requerida, de acuerdo a las Normas establecidas en el Manual de ensayo de materiales EM 2000 MTC, Manual de Carreteras "Especificaciones Técnicas Generales para Construcción" (EG-2013) y Otros Manuales Internacionales.	Diseño de mezcla con agregados reciclados	% de agregados grueso, fino y reciclado de acuerdo a curvas granulométricas. % óptimo de Emulsión Asfáltica de rotura lenta. % óptimo de agua.	%	Formatos, Fichas, Tablas, Gráficos, Abacos, Hojas de calculo, de uso para todos los ensayos.	Equipo: Extractor Centrifuga para asfalto, Penetrometro de Asfalto, Tamizador Mecánico, Balanza de flotabilidad, Balanza Electrónica, Máquina de los Angeles, Viscosímetro. Herramientas: Bandejas y recipientes, espátula, Briquetas, Vernier, escuadra, Manual de ensayo de Materiales EM 2000 MTC, Manual de Carreteras Especificaciones Generales para Construcción (EG-2013), Otros manuales, Software Estadístico Especializado.

FUENTE: ELABORACION PROPIA



3. Capítulo III: Metodología.

3.1. Metodología de la investigación.

3.1.1 Enfoque de la investigación.

Investigación del tipo cuantitativo.

Dentro de trabajo de investigación de Tesis se pretende demostrar que tanto varían las magnitudes de las propiedades físico-mecánicas de pavimentos reciclados en mezclas con emulsión asfáltica para lo cual se dice o se usa el concepto cuantitativo porque determinaremos cantidades en peso, volúmenes y porcentajes u otra magnitud medible, los cuales deben ser verificales y comparados con una mezcla patrón también de magnitudes medibles, a un porcentaje definido y con las dosificaciones de sus componentes pertinentes, en ese sentido se definen números y cifras que son cuantificables y comparables que conlleva a resultados.

3.1.2. Nivel o alcance de la investigación.

Nivel descriptivo – correlacional.

Se dice que será una investigación descriptiva porque desde el punto de vista de la investigación se describirán todos los pasos y procedimientos realizados tanto desde la recolección de información hasta los ensayos realizados a detalle, se procesan los datos que son comparados con el diseño patrón y se finaliza con los resultados que finalmente llevará a las conclusiones del trabajo de investigación.

Por otro lado también se correlaciona estos resultados ya que se cuenta con un diseño patrón verificable y con las briquetas ensayadas se puede realizar una correlación que debe definir el nivel de confianza del trabajo realizado.



3.1.3. Método de investigación.

Hipotético-deductivo.

Se propone una hipótesis a partir de los datos que se manejan, en una primera instancia se prueba la hipótesis mediante procedimientos inductivos y en una segunda instancia mediante procedimientos deductivo, con ello se sacan conclusiones particulares a partir de la hipótesis y que después se comparan experimentalmente.

3.2. Diseño de la investigación.

3.2.1. Diseño metodológico.

Diseño cuasi experimental.

Se dice que el proyecto es de carácter cuasi experimental porque en su desarrollo se realiza una serie de ensayos en laboratorio que verifica calidades de agregados, asfalto emulsionado y mezclas asfálticas sometido a diversas pruebas tanto físicas como mecánicas el carácter cuasi experimental del mismo es porque los ensayos primordialmente de las briquetas son comparadas con una briqueta patrón de características definidas cuyos resultados deducirán si son o no confiables los valores alcanzados.

3.2.2. Diseño de Ingeniería.

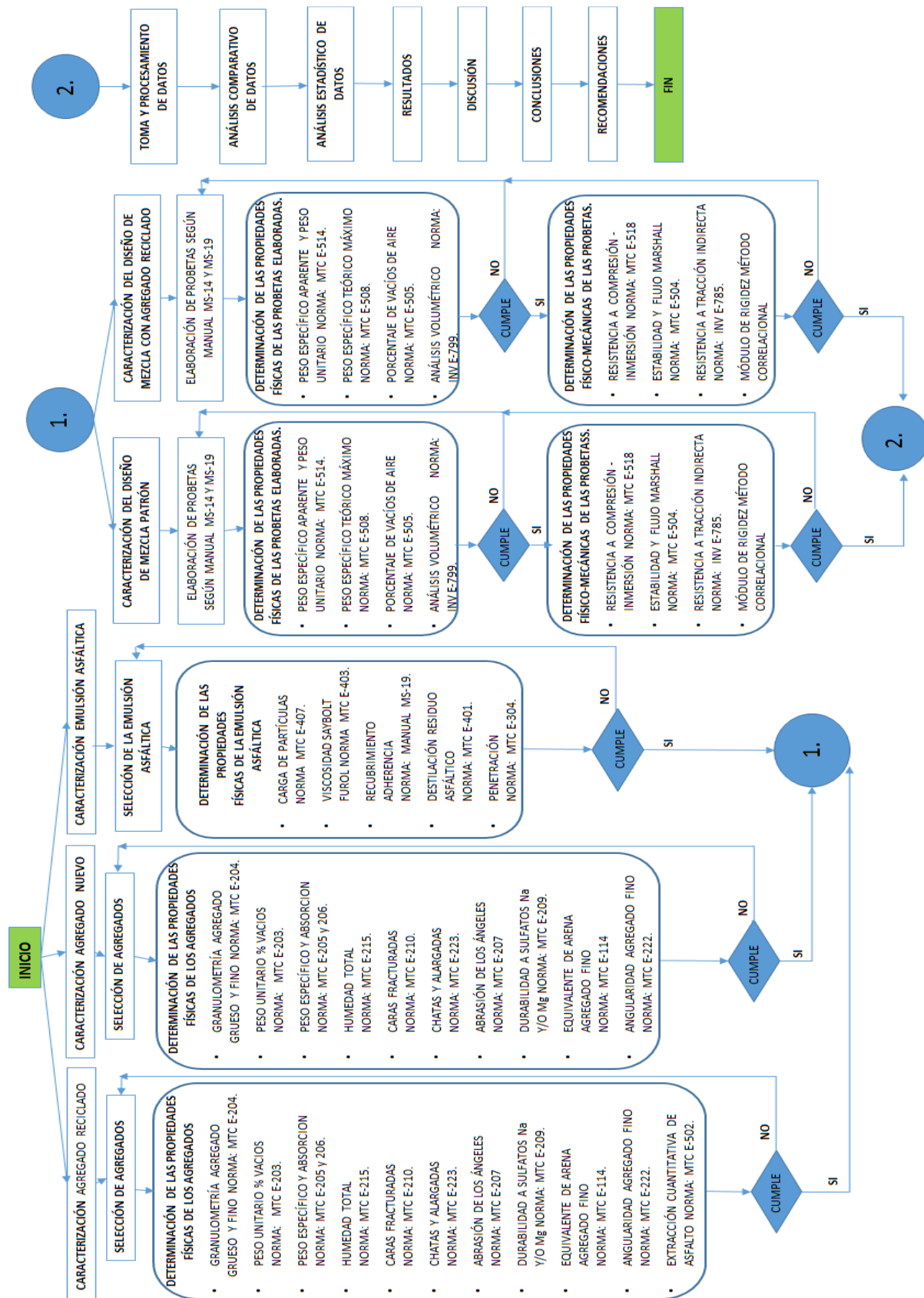


Figura 18. Flujiograma de Diseño de Ingeniería de aplicación en la presente tesis, (Fuente: Elaboración propia).



3.3. Población y muestra.

3.3.1. Población.

3.3.1.1. Descripción de la población.

- Se toma el Pavimento asfáltico (**Reciclado 1**); extraído de la Av. 24 de Junio del distrito de Wánchaq de la Provincia del Cusco; longitud de vía 310m, ancho de vía 7.2 m y espesor de vía 0.0508m (2 pulgadas), volumen total de 113.38 m³ de material asfáltico, tal como se indica en la **Figura 19, pág. 91**.

- Se Toma el Pavimento asfáltico (**Reciclado 2**); extraído de la Av. T.C. Gordon Magné de la Urbanización Santa Rosa del distrito de Wánchaq de la Provincia del Cusco; longitud de vía 365m, ancho de vía 6.5 m y espesor de vía 0.0508 m, volumen total de 120.52 m³ de material asfáltico, tal como se indica en la **Figura 20, pág. 92**.

- Cantera Huillque – Quelloventanayoc (**Agregado grueso 1**); ubicado en el distrito de Ancahuasi, Provincia de Anta, carretera Cusco-Abancay entre los kilómetros 914 y 917; agregado grueso, volumen de cantera 200,000 m³, coordenadas UTM zona 18L 785024E, 8511677S, tal como se indica en la **Figura 21, pág. 93**.

- Centro de acopio planta de asfaltos de COPESCO ubicado en distrito de Lucre sector Huacarpay, agregado grueso y fino, de las canteras:
 - Amaru Pampa (**Agregado Grueso 2 y Fino 2**); distrito de San salvador, Provincia de Calca, coordenadas UTM: 19L 204774 E, 8494650 S.
 - Combapata (**Agregado Fino 1**); distrito de Combapata, provincia de Canchis, coordenadas UTM: Norte 8 442 000.00, Este 240 000.00, tal como se indica en la **Figura 22, pág. 94**.

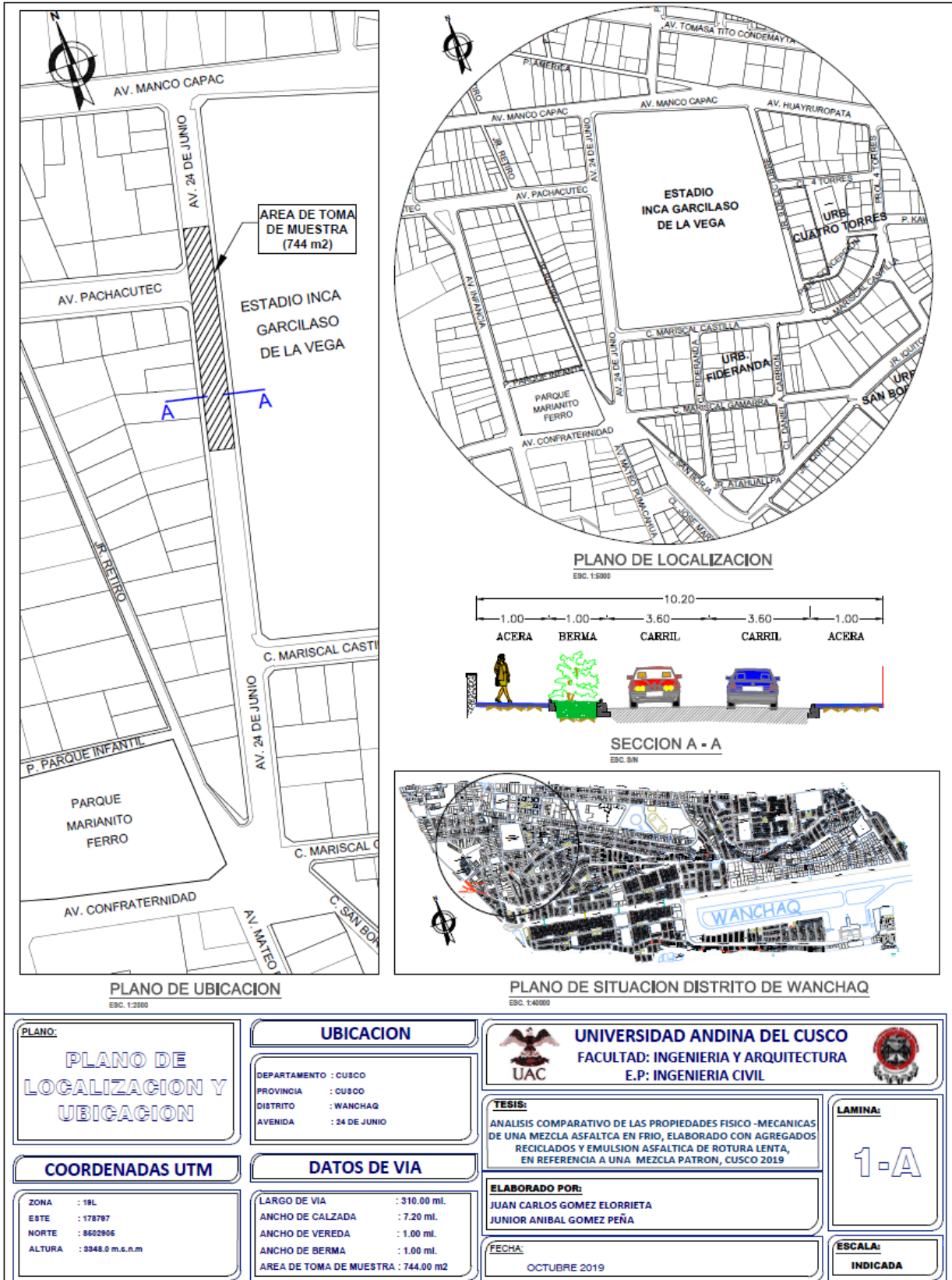


Figura 19. Plano de localización y ubicación de fuente de agregado reciclado N°1, (Fuente: Plano catastral de la ciudad del Cusco 2018, georeferenciación y digitalización propia).



Figura 20. Plano de localización y ubicación de fuente de agregado reciclado N°2. (Fuente: Plano catastral de la ciudad del Cusco 2018, georeferenciación y digitalización propia)

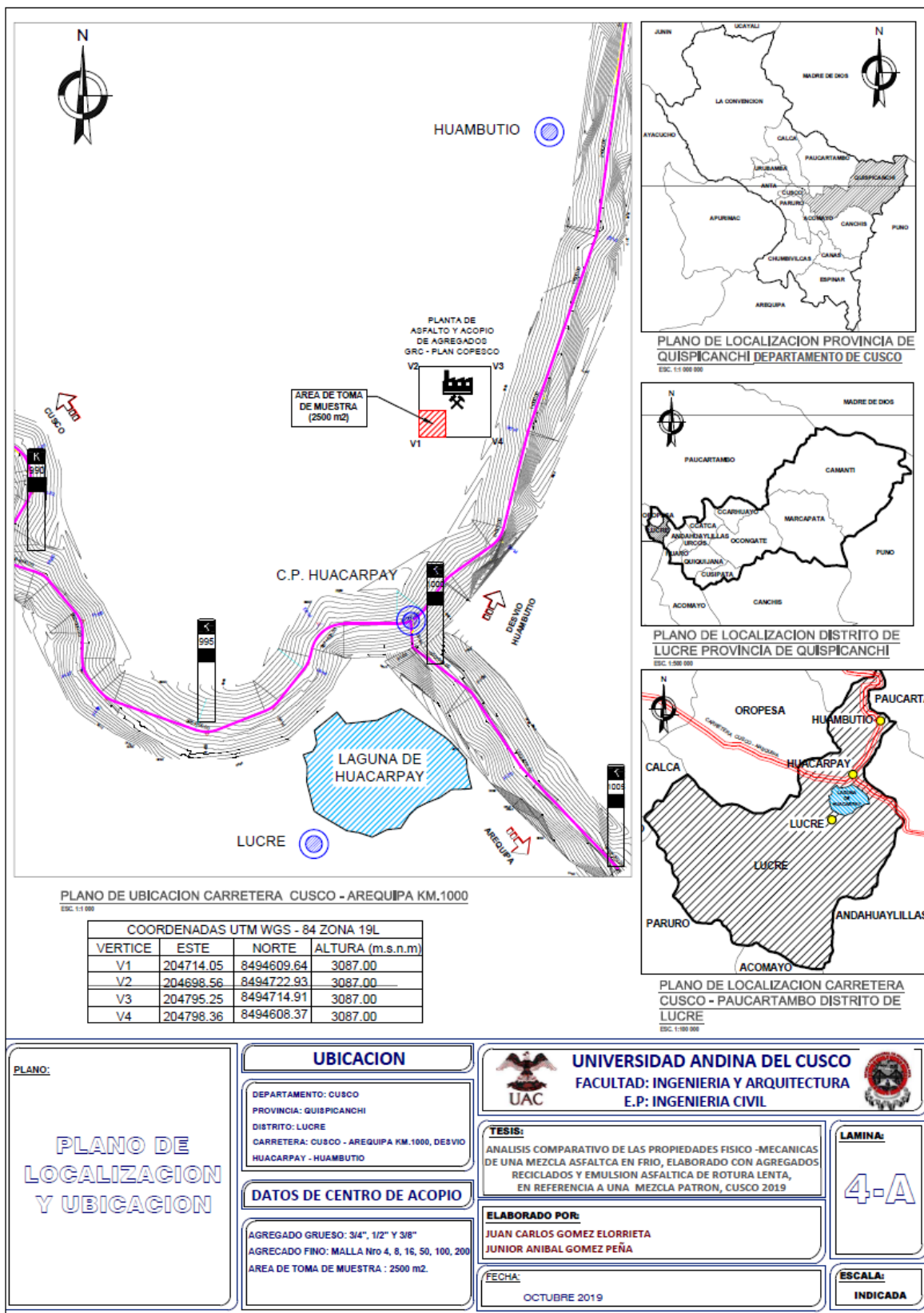


Figura 22. Plano de localización y ubicación de fuente de agregados gruesos y finos, Planta de asfaltos Plan COPESCO - Gobierno Regional Cusco. (Fuente: Mapas cartográficos del Departamento del Cusco, georeferenciación y digitalización propia).

3.3.1.2. *Cuantificación de la población (cuantos elementos componen la población).*

La cuantificación de la población es igual a la cuantificación de la muestra; por lo tanto la evaluación de cuantificación se realiza a la muestra.

3.3.2. Muestra.

3.3.2.1. *Descripción de la muestra.*

- **Reciclado 1;** longitud 310m, ancho 7.2m y espesor 0.0508 m, volumen 113.38 m³ de material asfáltico.
- **Reciclado 2;** longitud 365m, ancho 6.5m y espesor 0.0508 m, volumen 120.53 m³ de material asfáltico.
- **Agregado grueso 1;** Cantera Huillque-Quelloventanayoc, volumen de cantera 200,000 m³.
- **Agregado grueso 2 y fino 2;** Cantera Amaru Pampa; volumen de 2513.27 m³.
- **Agregado fino 1;** Cantera Combapata; volumen de 2513.27 m³.

3.3.2.2. *Cuantificación de la muestra (cuantos elementos componen la muestra).*

Fórmula para cálculo de la muestra poblaciones finitas.

La fórmula para calcular el tamaño de muestra finita o cuando se conoce el tamaño de la población es la siguiente:

$$n = \frac{N \times Z_a^2 \times p \times q}{d^2 \times (N - 1) + Z_a^2 \times p \times q}$$

Donde:

n = Número de muestras.

N = Tamaño de la población.

Z = Nivel de confianza.

P = Probabilidad de éxito, o proporción esperada.

Q = Probabilidad de fracaso.

D = Precisión (Error máximo admisible en términos de proporción).

El coeficiente de Z_α varía, así:

- Si la seguridad Z_α fuese del 90% el coeficiente sería 1.645
- Si la seguridad Z_α fuese del 95% el coeficiente sería 1.96
- Si la seguridad Z_α fuese del 97.5% el coeficiente sería 2.24
- Si la seguridad Z_α fuese del 99% el coeficiente sería 2.576

**Tabla 11. Criterios cálculo de muestra de poblaciones finitas.**

n = Tamaño de la muestra	Por definir
N = Población	Por definir
Z = Confianza al 95%	1.96
P = Éxito al 50%	0.5
Q = Fracaso al 50%	0.5
D = Error 10%	0.1

Fuente: Análisis y criterio de elaboración Propios.

Cálculo de tamaño de población y muestra.

Volumen de material asfáltico reciclado de vías:

$$\text{Volumen} = \text{Largo} \times \text{Ancho} \times \text{Espesor}$$

Tabla 12. Volumen de material reciclado de pavimento en vías.

	Largo (m)	Ancho(m)	Espesor(m)	Volumen(m3)
Reciclado 1	310.00	7.20	0.05	113.38
Reciclado 2	365.00	6.50	0.05	120.52

Fuente: Recolección de datos de campo, elaboración Propia.

Volumen Agregados utilizados:

$$V = \text{Volumen de un cono} = \pi * r^2 * \frac{h}{3}$$

Donde:

$$\pi = 3.141592654$$

r = Radio del cono en metros.

h = Altura del cono en metros.

Datos:

$$r = 10 \text{ m.}$$

$$h = 6 \text{ m.}$$

Reemplazando en la ecuación:

$$V = \frac{\pi \cdot 10^2 \cdot 6}{3} = 628.31 m^3$$

Tabla 13. Peso de agregados totales de cantera y reciclado de pavimento.

	Volumen (m3) (reciclado 1)	Volumen (m3) (reciclado 2)	Volumen (m3) (A. Grueso1)	Volumen (m3) (A. Grueso 2)	Volumen (m3) (A. Fino1)	Volumen (m3) (A. Fino 2)
Peso unitario/Peso específico (kg/m3)	113.38	120.52	628.32	628.32	628.32	628.32
PU (A. Grueso 1)	1345.24		845238.97			
PU (A. Grueso 2)	1373.25			862840.18		
PU (A. Fino 1)	1502.62				944125.31	
PU (A. Fino 2)	1544.64					970524.68
Pe (reciclado 1)	2400.00	272125.44				
Pe (reciclado 2)	2400.00		244754.40			

Fuente: Datos obtenidos en laboratorio y campo, elaboración propia.

Tabla 14. Población (N) y tamaño de muestra (n) para agregados y reciclado de pavimento.

Pesos	N		n
	kg.	0.5 kg.	
A. Grueso 1	845238.97	1690477.94	96.03
A. Grueso 2	862840.18	1725680.36	96.03
A. Fino 1	944125.31	1888250.62	96.04
A. Fino 2	970524.68	1941049.36	96.04
P. Reciclado 1	272125.44	544250.88	96.02
P. Reciclado 2	244754.40	489508.80	96.02

Fuente: Datos obtenidos en laboratorio y campo, elaboración propia.

3.3.2.3. Método de muestreo.

Se toma el **Método de muestreo probabilístico o aleatorio**, el cual busca que todos los sitios de muestreo se seleccionen de una manera imparcial, basada únicamente en el azar.

La elección de los sitios de muestreo es tan importante como el ensayo mismo. Para que los resultados de los ensayos sean significativos, es necesario que los sitios de muestreo sean

seleccionados aleatoriamente, generalmente con el uso de una tabla de números aleatorios como la incluida en esta investigación (**Anexo 8**).

Muestra aleatoria.- Muestra obtenida de un lote de material, de manera que todas las partes del lote tengan una oportunidad conocida de quedar incluidas dentro de la muestra.

Muestreo de camiones cargados utilizado en el pavimento reciclado.

Se determinó el número de camiones el cual es de 9 camiones ($113.38\text{m}^3/12\text{m}^3$) para el pavimento asfáltico reciclado 1 y de 8 camiones ($101.98\text{m}^3/12\text{m}^3$) para el pavimento reciclado 2. Para determinar cuántos camiones se deben muestrear, se hallan “n” números aleatorios y se multiplican por el número de camiones del lote, dando 2 camiones para el reciclado 1 y 8 camiones para el reciclado 2.

Para determinar en qué cuadrante del plantón del camión se toma la muestra, se escogen otros “n” números y se multiplica cada uno de ellos por 4 (número de cuadrantes) el cual se muestra a continuación:

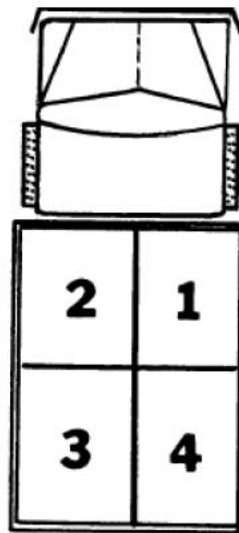


Figura 23. Cuadrantes para la toma aleatoria de muestras de un camión cargado, (**Fuente:** Instituto Nacional de Vías, Norma de ensayo de Materiales para Carreteras, Colombia, 2013).

Tabla 15. Número de muestras tomadas por cuadrante y por camión determinados aleatoriamente para Pavimento reciclado N°1.

N° de Muestra de 500 gr	N° de Cuadrante	N° de Camión	N° de Muestra de 500 gr	N° de Cuadrante	N° de Camión	N° de Muestra de 500 gr	N° de Cuadrante	N° de Camión
1	3	1	33	2	1	65	4	2
2	2	1	34	1	1	66	2	2
3	4	1	35	1	1	67	1	2
4	1	1	36	1	1	68	1	2
5	4	1	37	4	1	69	3	2
6	3	1	38	1	1	70	2	2
7	3	1	39	3	1	71	1	2
8	3	1	40	3	1	72	1	2
9	4	1	41	3	1	73	1	2
10	4	1	42	2	1	74	4	2
11	2	1	43	3	1	75	3	2
12	3	1	44	2	1	76	2	2
13	2	1	45	4	1	77	4	2
14	4	1	46	4	1	78	1	2
15	3	1	47	3	1	79	2	2
16	1	1	48	4	1	80	3	2
17	3	1	49	4	2	81	1	2
18	4	1	50	2	2	82	2	2
19	3	1	51	2	2	83	1	2
20	3	1	52	2	2	84	2	2
21	2	1	53	2	2	85	3	2
22	3	1	54	3	2	86	3	2
23	4	1	55	2	2	87	2	2
24	3	1	56	1	2	88	1	2
25	3	1	57	1	2	89	4	2
26	1	1	58	1	2	90	3	2
27	4	1	59	2	2	91	4	2
28	1	1	60	2	2	92	1	2
29	4	1	61	4	2	93	1	2
30	3	1	62	2	2	94	2	2
31	3	1	63	1	2	95	2	2
32	3	1	64	2	2	96	1	2

Fuente: Datos obtenidos en laboratorio y campo, elaboración propia (Apoyo Anexo 8 Tabla 730-1, p.380).

Tabla 16. Numero de muestras tomadas por cuadrante y por camión determinados aleatoriamente para Pavimento reciclado N°2.

N° de Muestra de 500 gr	N° de Cuadrante	N° de Camión	N° de Muestra de 500 gr	N° de Cuadrante	N° de Camión	N° de Muestra de 500 gr	N° de Cuadrante	N° de Camión
1	1	1	33	3	3	65	4	6
2	3	1	34	2	3	66	4	6
3	1	1	35	1	3	67	2	6
4	4	1	36	2	3	68	4	6
5	1	1	37	1	4	69	1	6
6	3	1	38	2	4	70	2	6
7	2	1	39	3	4	71	2	6
8	2	1	40	2	4	72	2	6
9	4	1	41	4	4	73	2	7
10	1	1	42	1	4	74	1	7
11	3	1	43	3	4	75	3	7
12	2	1	44	1	4	76	2	7
13	1	2	45	2	4	77	1	7
14	3	2	46	4	4	78	1	7
15	2	2	47	4	4	79	1	7
16	1	2	48	3	4	80	1	7
17	3	2	49	3	5	81	3	7
18	1	2	50	2	5	82	3	7
19	3	2	51	4	5	83	2	7
20	1	2	52	2	5	84	1	7
21	2	2	53	3	5	85	2	8
22	3	2	54	3	5	86	1	8
23	2	2	55	2	5	87	2	8
24	1	2	56	1	5	88	2	8
25	1	3	57	1	5	89	1	8
26	4	3	58	3	5	90	1	8
27	1	3	59	2	5	91	3	8
28	4	3	60	4	5	92	1	8
29	3	3	61	4	6	93	4	8
30	3	3	62	3	6	94	3	8
31	4	3	63	4	6	95	3	8
32	3	3	64	2	6	96	3	8

Fuente: Datos obtenidos en laboratorio y campo, elaboración propia (Apoyo Anexo 8 Tabla 730-1, p.380).

Muestras tomadas de una pila de almacenamiento.

Para el caso de los agregados estos están apilados; por lo tanto las muestras se obtienen al azar 96 porciones aproximadamente iguales (500 gramos) y se combinan para formar una muestra, cuyo tamaño debe ser igual o exceder al mínimo indicado en la **Tabla 17**.

Tabla 17. Guía para estimar la cantidad necesaria de muestra.

Tamaño máximo nominal de los agregados (A)	Mezcla suelta	
	Masa mínima aproximadamente kg (lb)	Volumen aproximado litros (galones)
2.36 mm (N°8)	10 (22)	8 (2)
4.75 mm (N°4)	10 (22)	8 (2)
9.5 mm (3/8")	16 (35)	12 (3)
12.5 mm (1/2")	20 (45)	15 (4)
19.0 mm (3/4")	20 (45)	15 (4)
25.0 mm (1")	24 (52)	18 (5)
37.5 mm (1 1/2")	30 (66)	22 (6)
50.0 mm (2")	35 (75)	22 (6)

(A) El tamaño máximo nominal del agregado es la mayor abertura del tamiz de la especificación aplicable sobre el cual se permite la retención de alguna cantidad de material.

Fuente: Instituto Nacional de Vías, Norma de ensayo de Materiales para Carreteras, Colombia, 2013.

De acuerdo a la **Tabla 17**, de estimación de cantidad de muestra, para nuestro caso se tiene 4 diferentes agregados y dos tipos de Carpeta asfáltica reciclada de los cuales se requiere la cantidad de:

- **Agregado grueso 1** (Tamaño máximo nominal de 3/4") = 96 muestras x 0.5 kg. = 48 kg, Según **Tabla 17**, se requiere 20kg; si se cumple el requerido en la tabla.
- **Agregado grueso 2** (Tamaño máximo nominal de 1/2") = 96 muestras x 0.5 kg. = 48 kg, Según **Tabla 17**, se requiere 20 kg; si se cumple el requerido en la tabla.
- **Agregado fino 1** (Tamaño máximo nominal malla #4) = 96 muestras x 0.5 kg. = 48 kg, Según **Tabla 17**, se requiere 10 kg; si se cumple el requerido en la tabla.



- **Agregado fino 2** (Tamaño máximo nominal malla #4) = 96 muestras x 0.5 kg. = 48 kg, Según **Tabla 17**, se requiere 10 kg; si se cumple el requerido en la tabla.
- **Pavimento reciclado 1** (Tamaño máximo nominal 3/4") = 96 muestras x 0.5 kg. = 48 kg, Según **Tabla 17**, se requiere 20 kg; si se cumple el requerido en la tabla.
- **Pavimento reciclado 2** (Tamaño máximo nominal 3/4") = 96 muestras x 0.5 kg. = 48 kg, Según **Tabla 17**, se requiere 20 kg; si se cumple el requerido en la tabla.

3.3.2.4. Criterios de evaluación de muestra.

Las muestras se evaluaron de acuerdo al manual de ensayo de materiales EM edición 2016 del MTC y el manual de Carreteras “Especificaciones Técnicas Generales para Construcción” (EG-2013), vigentes.

3.3.3. Criterios de inclusión.

Para ser incluidos (considerados) dentro del presente trabajo de tesis los materiales deben de cumplir los rangos establecidos en los ensayos de pre-evaluación de Diseño de Ingeniería propuesto; tanto del manual de ensayo de materiales EM edición 2016 del MTC y el manual de Carreteras “Especificaciones Técnicas Generales para Construcción” (EG-2013), vigentes; es decir para :

- Agregado grueso y fino nuevo, agregado reciclado de pavimento asfáltico.
- Emulsión Asfáltica de rotura lenta.
- Cemento portland tipo I.


3.4. Instrumentos.

3.4.1. Instrumentos metodológicos o instrumentos de recolección de datos.

Los instrumentos metodológicos utilizados serán principalmente los formatos de recolección de datos elaborados para cada ensayo, tanto en fase de pre-evaluación y evaluación respectivamente.

3.4.1.1. Análisis granulométrico de agregados Norma MTC E-204.



Tabla 18. Formato análisis granulométrico agregado grueso.

	<p>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL</p>																																																																																																										
<p>TESIS: “ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO – MECÁNICAS, DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO, ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS Y EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROTURA LENTA, EN REFERENCIA A UNA MEZCLA PATRÓN, CUSCO 2019”.</p>																																																																																																											
Ensayo:	Análisis granulométrico de agregado grueso.																																																																																																										
Fecha:	Norma técnica:	MTC E-204																																																																																																									
Fuente agregados:	Provincia:	Distrito:																																																																																																									
Muestra:	Peso inicial:	_____ g																																																																																																									
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 20px;"> <thead> <tr style="background-color: #ffff00;"> <th># Tamiz</th> <th>Tamiz(mm)</th> <th>Peso 1</th> <th>Peso 2</th> <th>Peso 3</th> <th>Peso 4</th> <th>Peso 5</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>25.4</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3/4</td><td>19.05</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>1/2</td><td>12.5</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3/8</td><td>9.5</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td># 4</td><td>4.75</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td># 8</td><td>2.36</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td># 16</td><td>1.18</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td># 30</td><td>0.6</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td># 50</td><td>0.3</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td># 100</td><td>0.15</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td># 200</td><td>0.075</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>fondo</td><td>Fondo</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td>Sub total</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td colspan="6" style="text-align: right;">Total</td><td></td></tr> </tbody> </table>			# Tamiz	Tamiz(mm)	Peso 1	Peso 2	Peso 3	Peso 4	Peso 5	1	25.4						3/4	19.05						1/2	12.5						3/8	9.5						# 4	4.75						# 8	2.36						# 16	1.18						# 30	0.6						# 50	0.3						# 100	0.15						# 200	0.075						fondo	Fondo							Sub total						Total						
# Tamiz	Tamiz(mm)	Peso 1	Peso 2	Peso 3	Peso 4	Peso 5																																																																																																					
1	25.4																																																																																																										
3/4	19.05																																																																																																										
1/2	12.5																																																																																																										
3/8	9.5																																																																																																										
# 4	4.75																																																																																																										
# 8	2.36																																																																																																										
# 16	1.18																																																																																																										
# 30	0.6																																																																																																										
# 50	0.3																																																																																																										
# 100	0.15																																																																																																										
# 200	0.075																																																																																																										
fondo	Fondo																																																																																																										
	Sub total																																																																																																										
Total																																																																																																											
		g																																																																																																									
		g																																																																																																									
Observaciones: _____																																																																																																											

Fuente: Elaboración propia.



3.4.1.2. *Peso unitario y porcentaje de vacíos Norma MTC E-203.*

Tabla 19. Formato peso unitario agregados grueso, fino, reciclado y porcentaje de vacíos.

	<p>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL</p>	
<p>TESIS: “ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO – MECÁNICAS, DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO, ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS Y EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROTURA LENTA, EN REFERENCIA A UNA MEZCLA PATRÓN, CUSCO 2019”.</p>		
<p>Ensayo: <u>Peso unitario agregados y porcentaje de vacíos</u></p>		
<p>Fecha: _____</p>		<p>Norma técnica: MTC E-203</p>
<p>Fuente de agregados: _____</p>		<p>Provincia: _____ Distrito: _____</p>
<p>Muestra: _____</p>		<p>P. inicial: _____</p>
<p>Medidas molde:</p>	<p>D = _____ mm</p>	<p>D = _____ m</p>
	<p>h = _____ mm</p>	<p>h = _____ m</p>
<p>Agregado sin compactar 1</p>		
<p>Peso del molde: _____ g</p>	<p>_____ g</p>	<p>Peso agregado: _____ g</p>
<p>Molde lleno sin compactar: _____ g</p>	<p>_____ g</p>	
<p>Agregado sin compactar 2</p>		
<p>Peso del molde: _____ g</p>	<p>_____ g</p>	<p>Peso agregado: _____ g</p>
<p>Molde lleno sin compactar: _____ g</p>	<p>_____ g</p>	
<p>Agregado sin compactar 3</p>		
<p>Peso del molde: _____ g</p>	<p>_____ g</p>	<p>Peso agregado: _____ g</p>
<p>Molde lleno sin compactar: _____ g</p>	<p>_____ g</p>	
<p>Agregado compactado 1</p>		
<p>Peso del molde: _____ g</p>	<p>_____ g</p>	<p>Peso agregado: _____ g</p>
<p>Molde lleno compactado: _____ g</p>	<p>_____ g</p>	
<p>Agregado compactado 2</p>		
<p>Peso del molde: _____ g</p>	<p>_____ g</p>	<p>Peso agregado: _____ g</p>
<p>Molde lleno compactado: _____ g</p>	<p>_____ g</p>	
<p>Agregado compactado 3</p>		
<p>Peso del molde: _____ g</p>	<p>_____ g</p>	<p>Peso agregado: _____ g</p>
<p>Molde lleno compactado: _____ g</p>	<p>_____ g</p>	
<p>Observaciones: _____</p>		
<p>_____</p> <p>Tesistas</p>	<p>_____</p> <p>Jefe Laboratorio</p>	<p>_____</p> <p>Asesor Tesis</p>

Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.3. *Peso específico y porcentaje de absorción Norma MTC E-205, E-206.*Tabla 20. *Formato peso específico y porcentaje de absorción agregado grueso y reciclado.*

	UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL	
TESIS: "ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO – MECÁNICAS, DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO, ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS Y EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROTURA LENTA, EN REFERENCIA A UNA MEZCLA PATRÓN, CUSCO 2019".		
Peso específico a. grueso y reciclado, % de absorción		
Ensayo: _____	Norma técnica: MTC E- 206	
Fecha: _____		
Fuente de agregados: _____	Provincia: _____	Distrito: _____
Muestra: _____	Peso inicial: _____ g	
A= Peso seco		
A= Peso bandeja +	Agregado seco	=
A= _____ g +	[] g	= _____ g
B= Peso saturado superficialmente seco (sss)		
B= Peso bandeja +	Agregado sss	=
B= _____ g +	[] g	= _____ g
C= Peso sumergido		
C= Peso bandeja +	Agregado sumergido	=
C= _____ g +	[] g	= _____ g
Observaciones: _____		
_____	_____	_____
Tesistas	Jefe Laboratorio	Asesor Tesis

Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.4. Porcentaje de humedad de los agregados y agregado reciclado Norma MTC E-215.

Tabla 21. Formato porcentaje de humedad de los agregados y agregado reciclado de pavimento.

	UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL		
TESIS: “ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO – MECÁNICAS, DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO, ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS Y EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROTURA LENTA, EN REFERENCIA A UNA MEZCLA PATRÓN, CUSCO 2019”.			
Ensayo:	_____ % de humedad agregados y reciclados		
Fecha:	_____	Norma técnica:	_____ MTC E-215
Fuente de agregados:	_____	Provincia:	_____ Distrito: _____
Muestra:	_____	Peso inicial:	_____ kg
Peso agregado secado al horno			
Peso bandeja:	_____ g		
Bandeja:	_____ g	Agregado:	<input style="background-color: yellow;" type="text"/> g Total: _____ g
Peso agregado humedecido al aire 24 hrs			
Peso bandeja:	_____ g		
Bandeja:	_____ g	Agregado:	<input style="background-color: yellow;" type="text"/> g Total: _____ g
Observaciones: _____ _____			
_____	_____	_____	
Tesistas	Jefe Laboratorio	Asesor Tesis	

Fuente: Elaboración propia.



3.4.1.5. *Desgaste de agregados abrasión en máquina de los ángeles Norma MTC E-207.*Tabla 22. *Formato abrasión en máquina de los ángeles.*

	UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL	
TESIS:		
“ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO – MECÁNICAS, DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO, ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS Y EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROTURA LENTA, EN REFERENCIA A UNA MEZCLA PATRÓN, CUSCO 2019”.		
Ensayo: <u>Abrasión de los ángeles agregados y reciclados</u>		
Fecha: _____	Norma técnica: _____	MTC E-207
Fuente de agregados: _____	Provincia: _____	Distrito: _____
Muestra: _____	Peso inicial: _____ kg	Método: <u>B</u>
Peso agregado antes de abrasión		Agregado: <u>3/4", 1/2"</u>
Peso bandeja: _____ g		
Bandeja: _____ g	Agregado: _____ g	Total: _____ g
Peso agregado después de abrasión		
Peso bandeja: _____ g		
Bandeja: _____ g	Agregado: _____ g	Total: _____ g
Observaciones: _____		
_____	_____	_____
Tesis	Jefe Laboratorio	Asesor Tesis

Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.6. Determinación del porcentaje caras fracturadas Norma MTC E-210.

Tabla 23. Formato caras fracturadas agregado grueso y reciclado.

	UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL										
TESIS: “ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO – MECÁNICAS, DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO, ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS Y EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROTURA LENTA, EN REFERENCIA A UNA MEZCLA PATRÓN, CUSCO 2019”.											
Ensayo: <u>Caras fracturadas agregado grueso y reciclado.</u>											
Fecha: _____		Norma técnica: _____ MTC E-210									
Fuente de agregados: _____		Provincia: _____ Distrito: _____									
Muestra: _____	Peso inicial 3/8": _____ g	Método: _____ A									
	Peso inicial 1/2": _____ g	Agregado: 3/8", 1/2"									
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 20%;">Tamaño máximo nominal abertura ,mm (pulgadas)</th> <th style="width: 80%;">Masa mínima de la muestra, g (lb aprox.)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">9.5 3/8"</td> <td style="text-align: center;">200 (0.5)</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">12.5 1/2"</td> <td style="text-align: center;">500 (1.0)</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">19 3/4"</td> <td style="text-align: center;">1500 (3.0)</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">25 1"</td> <td style="text-align: center;">3000 (6.5)</td> </tr> </tbody> </table>	Tamaño máximo nominal abertura ,mm (pulgadas)	Masa mínima de la muestra, g (lb aprox.)	9.5 3/8"	200 (0.5)	12.5 1/2"	500 (1.0)	19 3/4"	1500 (3.0)	25 1"	3000 (6.5)	$P = \left[\frac{F + Q/2}{F + Q + N} \right] \times 100$
Tamaño máximo nominal abertura ,mm (pulgadas)	Masa mínima de la muestra, g (lb aprox.)										
9.5 3/8"	200 (0.5)										
12.5 1/2"	500 (1.0)										
19 3/4"	1500 (3.0)										
25 1"	3000 (6.5)										
P= % de partículas con el número especificado de caras fracturadas. F= Peso o cantidad de partículas fracturadas con al menos el número especificado de caras fracturadas. Q= Peso o cantidad de partículas cuestionables. N= Peso o cantidad de partículas en la categoría de no fracturadas que cumplen el criterio de fractura.											
F = _____ g +	Q = _____ g +	N = _____ g									
Total = _____ g											
Observaciones: _____ _____											
Tesistas	Jefe Laboratorio	Asesor Tesis									

Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.7. *Partículas chatas y alargadas en agregados Norma MTC E-223.*

Tabla 24. Formato partículas chatas y alargadas agregado grueso y reciclado.

	<p>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL</p>				
<p>TESIS:</p> <p>"ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO – MECÁNICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO, ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS Y EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROTURA LENTA, EN REFERENCIA A UNA MEZCLA PATRÓN, CUSCO 2019".</p>					
<p>Ensayo: <u>Chatas y alargadas agregado grueso</u></p>					
<p>Fecha: _____</p>		<p>Norma técnica: _____ MTC E-223</p>			
<p>Muestra grueso 1: _____ Unidad</p>		<p>Peso grueso 1 malla 3/8" _____ g</p>			
<p>Muestra grueso 2: _____ Unidad</p>		<p>Peso grueso 2 malla 3/8" _____ g</p>			
<p>Muestra reciclado 1: _____ Unidad</p>		<p>Peso reciclado 1 malla 3/8" _____ g</p>			
<p>Muestra reciclado 2: _____ Unidad</p>		<p>Peso reciclado 2 malla 3/8" _____ g</p>			
Agregado	N° partículas planas	N° partículas alargadas	N° partículas que cumplen ambos criterios	N° partículas que no cumplen ningún criterio	N° total de elementos
Grueso 1					
Grueso 2					
Reciclado 1					
Reciclado 2					
<p>Observaciones: _____</p> <p>_____</p>					
<p>_____</p> <p>Tesistas</p>		<p>_____</p> <p>Jefe Laboratorio</p>	<p>_____</p> <p>Asesor Tesis</p>		

Fuente: Elaboración propia.



3.4.1.8. Durabilidad al sulfato de sodio y magnesio Norma MTC-E-209.

Tabla 25. Formato durabilidad al sulfato de sodio y magnesio del agregado fino y reciclado.

	<p>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL</p>				
<p>TESIS: “ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO – MECÁNICAS, DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO, ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS Y EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROTURA LENTA, EN REFERENCIA A UNA MEZCLA PATRÓN, CUSCO 2019”.</p>					
<p>Ensayo: Durabilidad al sulfato de sodio y magnesio agregado fino, reciclado</p>					
<p>Fecha: _____</p>		<p>Norma técnica: MTC E-209</p>			
<p>Fuente de agregados: _____ Provincia: _____ Distrito: _____</p>					
<p>Muestra: _____</p>		<p>Peso muestra original _____ g</p>			
<p>Durabilidad del agregado fino en solución de.....</p>					
Malla pasa	Malla retenido	% retenido muestra original	Peso de las fracciones antes del ensayo	% pérdidas después de ensayo	% de pérdidas corregidas
9.5 mm	3/8"	4.75 mm	N°4		
4.75 mm	N°4	2.36 mm	N°8		
2.36 mm	N°8	1.18 mm	N°16		
1.18 mm	N°16	0.6 mm	N°30		
0.6 mm	N°30	0.3 mm	N°50		
0.3 mm	N°50	0.15mm	N°100		
0.15mm	N°100	-	-		
TOTALES					
Sulfato de sodio				Sulfato de magnesio	
				x	
<p>Observaciones: _____</p> <p>_____</p>					
<p>Tesistas</p>		<p>Jefe Laboratorio</p>		<p>Asesor Tesis</p>	

Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.9. *Equivalente de arena de agregado fino Norma MTC E-114.*Tabla 26. *Formato equivalente de arena de agregados finos.*

			
UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL			
TESIS: "ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO – MECÁNICAS, DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO, ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS Y EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROTURA LENTA, EN REFERENCIA A UNA MEZCLA PATRÓN, CUSCO 2019".			
Ensayo: Equivalente de arena de agregados finos			
Fecha: _____		Norma técnica: _____ MTC E-114	
Muestra de agregado: _____		Provincia: _____ Distrito: _____	
N° de muestra	Peso (g)	Lectura de arcilla (mm)	Lectura de arena (mm)
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
Observaciones: _____ _____			
TESISTAS		JEFE LABORATORIO	ASESOR TESIS

Fuente: Elaboración propia.





3.4.1.10. Angularidad de agregado fino Norma MTC E-222.

Tabla 27. Formato angularidad de agregado fino.

						
UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL						
TESIS: “ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO – MECÁNICAS, DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO, ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS Y EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROTURA LENTA, EN REFERENCIA A UNA MEZCLA PATRÓN, CUSCO 2019”.						
Ensayo: Angularidad de agregado fino						
Fecha: _____		Norma técnica: MTC E-222				
Muestra: _____		Provincia: _____ Distrito: _____				
N° muestra	N° malla	Agregado	PESO (g)	Densidad (gr/cm3)	Volumen de recipiente (cm3)	Angularidad (%)
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
Observaciones: _____						
_____		_____		_____		
TESISTAS		JEFE LABORATORIO		ASESOR TESIS		

3.4.1.11. *Extracción cuantitativa de asfalto, lavado de asfalto Norma MTC E-502.*Tabla 28. *Formato extracción cuantitativa de asfalto, lavado de asfalto..*

		UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL			
TESIS: "ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO – MECÁNICAS, DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO, ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS Y EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROTURA LENTA, EN REFERENCIA A UNA MEZCLA PATRÓN, CUSCO 2019".					
Ensayo: <u>Extracción cuantitativa de asfalto, lavado de asfalto de pavimento asfáltico reciclado.</u>					
Fecha: _____		Norma técnica: _____		MTC E-502	
Fuente de reciclado: _____		Provincia: _____		Distrito: _____	
N° de muestra	Peso pavimento asfáltico reciclado	Peso agregado lavado	peso asfalto	% agregado lavado	% asfalto
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
Observaciones: _____					
_____		_____		_____	
Tesistas		Jefe Laboratorio		Asesor Tesis	

Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.12. Penetración de los materiales bituminosos Norma MTC E-304.

Tabla 29. Formato penetración de materiales bituminosos.

		UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL				
TESIS: "ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO – MECÁNICAS, DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO, ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS Y EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROTURA LENTA, EN REFERENCIA A UNA MEZCLA PATRÓN, CUSCO 2019".						
Ensayo: Penetración de materiales bituminosos						
Fecha: _____		Norma técnica: _____		MTC E-304		
Fuente de asfalto: _____		Provincia: _____		Distrito: _____		
N° de muestra	Peso (g)	Diámetro (mm)	Espesor (mm)	Temperatura (°C)	Tiempo (s)	Penetración (dmm)
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
Observaciones: _____						
_____		_____		_____		
Tesis		Jefe Laboratorio		Asesor Tesis		

Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.13. *Carga de partículas de emulsión asfáltica, Norma MTC E-407.*Tabla 30. *Formato carga de partículas de emulsión asfáltica.*

					
UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL					
TESIS: "ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO – MECÁNICAS, DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO, ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS Y EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROTURA LENTA, EN REFERENCIA A UNA MEZCLA PATRÓN, CUSCO 2019".					
Ensayo: <u>Carga de las partículas emulsión asfáltica</u>					
Fecha: _____		Norma técnica: _____		MTC E-407	
Tipo de asfalto: _____		Provincia: _____		Distrito: _____	
N° de muestra	Amperaje inicio (mA)	Amperaje final (mA)	Tiempo (minutos)	Electrodo negativo (cátodo)	Electrodo positivo (ánodo)
1					
2					
3					
4					
5					
Observaciones: _____					
_____		_____		_____	
Tesisistas		Jefe Laboratorio		Asesor Tesis	

Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.14. *Recubrimiento y adherencia, manual americano MS-19.*

Tabla 31. Formato recubrimiento y adherencia.

	<p>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL</p> <p>TESIS: “ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO – MECÁNICAS, DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO, ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS Y EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROTURA LENTA, EN REFERENCIA A UNA MEZCLA PATRÓN, CUSCO 2019”.</p> <p>Ensayo: <u>Recubrimiento y adherencia</u></p> <p>Fecha: _____ Norma técnica: <u>Manual MS-19</u></p> <p>Tipo de asfalto: _____ Provincia: _ _ Distrito: _____</p>					
N° de muestra	Peso agregado + humedad	Grado de recubrimiento aceptable	Grado de recubrimiento inaceptable	Peso mezcla curada 24 horas	Grado de adherencia aceptable	Grado de adherencia inaceptable
1						
2						
3						
4						
5						
<p>Observaciones: _____</p> <p>_____</p> <p style="display: flex; justify-content: space-around;"> _____ _____ _____ </p> <p style="display: flex; justify-content: space-around;"> Tesistas Jefe Laboratorio Asesor Tesis </p>						

Fuente: Elaboración propia.



3.4.1.15. *Viscosidad saybolt furol de emulsiones asfálticas, Norma MTC E-403.*Tabla 32. *Formato viscosidad saybolt furol de emulsiones asfálticas.*

		UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL				
TESIS: “ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO – MECÁNICAS, DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO, ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS Y EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROTURA LENTA, EN REFERENCIA A UNA MEZCLA PATRÓN, CUSCO 2019”.						
Ensayo: <u>Viscosidad saybolt furol</u>						
Fecha: _____			Norma técnica: _____		MTC E-403	
Tipo de asfalto: _____		Provincia: _____		Distrito: _____		
N° muestra	Tipo de asfalto	Peso (g)	Temperatura (°C)	Tiempo (s)	Volumen (cm3)	Viscosidad (SSU)
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
Observaciones: _____						
_____		_____		_____		
Tesistas		Jefe Laboratorio		Asesor Tesis		

Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.16. Destilación de emulsiones asfálticas, Norma MTC E-401.

Tabla 33. Formato destilación de emulsiones asfálticas.

					
UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL					
TESIS: "ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO - MÉCANICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO, ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS Y EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROTURA LENTA, EN REFERENCIA A UNA MEZCLA PATRÓN, CUSCO 2019".					
Ensayo: % de residuo de asfalto por destilación					
Fecha: _____		Norma técnica: _____		MTC E-401	
Tipo de asfalto: _____		Provincia: _____		Distrito: _____	
N° muestra	Tipo de asfalto	Peso retorta + accesorios	Peso retorta + accesorios + emulsión	Peso retorta + accesorios + residuo	% residuo por destilación
1					
2					
3					
4					
5					
Observaciones: _____					
_____		_____		_____	
Tesisistas		Jefe Laboratorio		Asesor Tesis	

Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.17. *Peso específico aparente y peso unitario de mezclas asfálticas compactadas, Norma MTC E-514.*



Tabla 34. *Formato peso específico aparente y peso unitario de mezclas asfálticas compactadas.*

					
UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL					
TESIS: "ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO - MÉCANICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO, ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS Y EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROTURA LENTA, EN REFERENCIA A UNA MEZCLA PATRÓN, CUSCO 2019".					
Peso específico aparente(bulk) y peso unitario de mezclas asfálticas compactadas empleando especímenes					
Ensayo: <u>de superficie seca</u>					
Fecha: _____		Norma técnica: _____ MTC E-514			
Tipo de asfalto: _____		Provincia: _____ Distrito: _____			
Mezcla patrón 6.75 % de emulsión asfáltica					
N° de muestra	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso seco en gramos (A)	Peso sumergido en agua a 25°c en gramos (C)	Peso superficialmente seco SSS en gramos (B)
Observaciones: _____					
_____		_____		_____	
Tesistas		Jefe Laboratorio		Asesor Tesis	

Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.18. *Peso específico teórico máximo de mezclas asfálticas, Norma MTC E-508.*



Tabla 35. Formato Peso específico teórico máximo de mezclas asfálticas.

	<p>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL</p>					
<p>TESIS: "ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO - MÉCANICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO, ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS Y EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROTURA LENTA, EN REFERENCIA A UNA MEZCLA PATRÓN, CUSCO 2019".</p>						
<p>Ensayo: <u>Peso específico máximo de mezclas asfálticas.</u></p>						
<p>Fecha: _____</p>		<p>Norma técnica: <u>MTC E-508</u></p>				
<p>Tipo de asfalto: _____</p>	<p>Provincia: _____</p>	<p>Distrito: _____</p>				
% emulsión asfáltica	Peso muestra seca (g) (Wmuestra)	Peso picnómetro seco y vacío (g) (Wpicnómetro)	Peso picnómetro + muestra (g) (Wpicnómetro + muestra)	Peso picnómetro lleno de agua a 25°C (g) (Wpicnómetro + agua)	Peso picnómetro + muestra + agua a 25°C (g) (Wdespués del ensayo)	Peso específico máximo de la muestra (gmm)
Mezcla patrón						
4.75						
5.25						
5.75						
6.25						
6.75						
Mezcla reciclada 25%						
4.75						
5.25						
5.75						
6.25						
6.75						
Mezcla reciclada 33.33%						
4.75						
5.25						
5.75						

Fuente: Elaboración propia

3.4.1.19. *Porcentaje de vacíos de aire en mezclas asfálticas compactadas densas, Norma MTC E.505.*

Tabla 36. *Formato porcentaje de vacíos de aire en mezclas asfálticas compactadas densas.*

			
UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL			
TESIS: "ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO - MÉCANICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO, ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS Y EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROTURA LENTA, EN REFERENCIA A UNA MEZCLA PATRÓN, CUSCO 2019".			
Ensayo:	Porcentaje de vacíos de aire en mezclas asfálticas compactadas.		
Fecha:		Norma técnica:	MTC E-505
Tipo de asfalto:		Provincia:	Distrito:
% emulsión asfáltica	Peso específico máximo de la muestra (Gmm)	Peso específico aparente (Bulk)	Vacíos de aire mezcla compactada (Pa)
Mezcla patrón			
4.75			
5.25			
5.75			
6.25			
6.75			
Mezcla reciclada 25%			
4.75			
5.25			
5.75			
6.25			
6.75			

Fuente: Elaboración propia

3.4.1.20 *Resistencia a inmersión - compresión de mezclas bituminosas compactadas,*
Norma MTC E-518.



Tabla 37. Formato resistencia a la compresión de mezclas bituminosas compactadas.

					
UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL					
TESIS:					
"ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO - MÉCANICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO, ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS Y EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROTURA LENTA, EN REFERENCIA A UNA MEZCLA PATRÓN, CUSCO 2019".					
Ensayo: Resistencia a inmersión – compresión de mezclas bituminosas.					
Fecha: _____		Norma técnica: _____		MTC E-518	
Tipo de asfalto: _____		Provincia: _____		Distrito: _____	
Reciclado 33.33% seco					
Muestra	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (g)	Carga (kg-f)	Resistencia (kg-f/cm²)
BC1A					
BC1B					
BC1C					
Promedio					
Reciclado 33.33% en inmersión					
Muestra	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (g)	Carga (kg-f)	Resistencia (kg-f/cm²)
BC2A					
BC2B					
BC2C					
Promedio					
Reciclado 50% seco					
Muestra	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (g)	Carga (kg-f)	Resistencia (kg-f/cm²)
CC1A					
CC1B					
CC1C					
Promedio					

Fuente: Elaboración propia

3.4.1.21. Estabilidad y flujo ensayo Marshall, Norma MTC E-504.



Tabla 38. Formato Estabilidad y flujo ensayo Marshall.

	<p>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL</p> <p>TESIS: "ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO - MÉCANICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO, ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS Y EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROTURA LENTA, EN REFERENCIA A UNA MEZCLA PATRÓN, CUSCO 2019".</p> <p>Ensayo: Estabilidad y flujo Fecha: _____ Norma técnica: MTC E-504</p> <p>Tipo de asfalto: _____ Provincia: _____ Distrito: _____</p>				
% de emulsión asfáltica 4.75					
Muestra rec 50%	Diámetro	Altura	Peso	Estabilidad	Flujo
BM1					
BM2					
BM3					
Promedio					
% de emulsión asfáltica 5.25					
Muestra rec 50%	Diámetro	Altura	Peso	Estabilidad	Flujo
BM4					
BM5					
BM6					
Promedio					
% de emulsión asfáltica 5.75					
Muestra rec 50%	Diámetro	Altura	Peso	Estabilidad	Flujo
BM7					
BM8					
BM9					
Promedio					
% de emulsión asfáltica 6.25					
Muestra rec 50%	Diámetro	Altura	Peso	Estabilidad	Flujo
BM10					
BM11					
BM12					
Promedio					

Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.22. Resistencia a tracción indirecta de mezclas de materiales bituminosos en frío,
Norma INV E-785.



Tabla 39. Formato resistencia a tracción indirecta de mezclas de materiales bituminosos en frío.

						
<p>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL</p>						
<p>TESIS: "ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO - MÉCANICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO, ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS Y EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROTURA LENTA, EN REFERENCIA A UNA MEZCLA PATRÓN, CUSCO 2019".</p>						
<p>Ensayo: Resistencia a tracción indirecta de mezclas de materiales bituminosos</p>						
<p>Fecha: _____</p>	<p>Norma técnica: INV E-785</p>					
<p>Tipo de asfalto: _____</p>	<p>Provincia: _____ Distrito: _____</p>					
Patrón seco						
Muestra	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (g)	Carga (KN)	Resistencia (KN/cm2)	kg-f/cm2
PT1A						
PT1B						
PT1C						
Promedio						
Patrón saturado						
Muestra	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (g)	Carga (KN)	Resistencia (KN/cm2)	kg-f/cm2
PT2A						
PT2B						
PT2C						
Promedio						
Reciclado 25% seco						
Muestra	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (g)	Carga (KN)	Resistencia (KN/cm2)	kg-f/cm2
R25T1A						
R25T1B						
R25T1C						
Promedio						
Reciclado 25% saturado						
Muestra	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (g)	Carga (KN)	Resistencia (KN/cm2)	kg-f/cm2
R25T2A						
R25T2B						
R25T2C						
Promedio						

Fuente: Elaboración propia

3.4.1.23. Análisis volumétrico de mezclas asfálticas compactadas, Norma INV E-799.

Tabla 40. Formato análisis volumétrico de mezclas asfálticas compactadas.

						
<p>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL</p>						
<p>TESIS: "ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO - MÉCANICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO, ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS Y EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROTURA LENTA, EN REFERENCIA A UNA MEZCLA PATRÓN, CUSCO 2019".</p>						
<p>Ensayo: Análisis volumétrico de mezclas asfálticas compactadas</p>						
<p>Fecha: _____</p>		<p>Norma técnica: _____</p>			<p>INV E-799</p>	
<p>Tipo de asfalto: _____</p>		<p>Provincia: _____</p>			<p>Distrito: _____</p>	
<p>Reciclado 33.33%</p>						
% emulsión asfáltica	Gmb	Ps	Gbs	VMA (%)	Pa	VFA (%)
4.75						
5.25						
5.75						
6.25						
6.75						
<p>Reciclado 50%</p>						
% emulsión asfáltica	Gmb	Ps	Gbs	VMA (%)	Pa	VFA (%)
4.75						
5.25						
5.75						
6.25						
6.75						
<p>Observaciones: _____</p>						
<p>_____</p> <p>Tesistas</p>		<p>_____</p> <p>Jefe Laboratorio</p>			<p>_____</p> <p>Asesor Tesis</p>	

Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.24. Modelos de predicción matemática para obtener el módulo de rigidez de mezclas asfálticas compactadas, método correlacional.



Tabla 41. Formato modelos de predicción matemático para obtener el módulo de rigidez

	<p>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL</p>				
<p>TESIS:</p> <p>"ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO - MÉCANICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO, ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS Y EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROTURA LENTA, EN REFERENCIA A UNA MEZCLA PATRÓN, CUSCO 2019".</p>					
<p>Ensayo: Análisis predictivo matemático módulo dinámico</p>					
<p>Fecha: _____</p>		<p>Norma técnica: A. correlacional</p>			
<p>Análisis N°: _____</p>	<p>Provincia: _____</p>	<p>Distrito: _____</p>			
<p>Mezcla patrón</p>					
<p>Método 1 = HWAING - WITCZAK</p>					
Frecuencia (f)(Hz)	Temperatura (°F)	% Pasa malla N°200 (P200)	% vacíos de aire (Va)	Viscosidad a 70°F (10 ⁶ poise)	% asfalto en la mezcla (%)
<p>Método 2 = WITCZAK</p>					
Frecuencia (Hz)	Agregado retenido malla 3/4"(P34)	Agregado retenido malla 3/8"(P38)	Agregado retenido malla N°4 (P4)	Volumen de asfalto efectivo (%) (Vbeff)	Gravedad específica máxima de la mezcla (Gmm)
Viscosidad (n) (10 ⁶ poise)	Porcentaje total de la mezcla suelta (Pmm)	% de asfalto total de la mezcla (Pb)	Gravedad específica del asfalto (Gb)	Gravedad específica bulk del agregado combinado (Gsb)	Gravedad específica del agregado (Gse)
<p>Observaciones: _____</p>					
<p>_____</p> <p>Tesistas</p>		<p>_____</p> <p>Jefe Laboratorio</p>		<p>_____</p> <p>Asesor Tesis</p>	

Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.25. Metodología de diseño Marshall modificado adoptado a la presente tesis.

Tabla 42. Formato metodología de diseño Marshall modificado.

		<p>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL</p>								
<p>TESIS:</p> <p>"ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO - MÉCICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO, ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS Y EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROTURA LENTA, EN REFERENCIA A UNA MEZCLA PATRÓN, CUSCO 2019".</p>										
Ensayo:		Diseño de mezcla marshall modificado								
Fecha:		NORMA TÉCNICA:				MS-14				
Muestra:		Provincia:		Distrito:						
Distribución Granulométrica, 50% de reciclado										
Tamiz	Tamiz (mm)	Av. 24 junio	Santa Rosa	Grueso 1	Grueso 2	Fino 1	Fino 2	Filler	Peso (g)	% Peso
1"										
3/4"										
3/8"										
#4										
#8										
#50										
#200										
Fondo										
	Pesos									
	% Peso									
% de emulsión y agua para una briqueta, 50% de reciclado										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Mezcla de agregado (g)										
% de emulsión asfáltica en la mezcla (%)										
% asfalto residual en la mezcla (%)										
Agua de premezcla (%)										
Observaciones: _____										
		Tesisistas			Jefe Laboartorio			Asesor Tesis		

Fuente: Elaboración propia.



3.4.2. Instrumentos de ingeniería.

Dentro del proyecto de tesis titulado: **“Análisis comparativo de las propiedades físico – mecánicas de una mezcla asfáltica en frío, elaborado con agregados reciclados y emulsión asfáltica de rotura lenta, en referencia a una mezcla patrón, Cusco 2019”**; se tiene previsto la utilización de los siguientes instrumentos de ingeniería que mencionamos a continuación:

- Juego de tamices Tyler, numerados en la mallas: 1”, 3/4”, 1/2”, 3/8”, N°4, N°8, N°10, N°16, N°30, N°40, N°80, N°100, N°200.
- Equipo de tamizado mecánico en seco Tyler de 8 tamices.
- Equipo de ensayo de Estabilidad Marshall y accesorios como mordazas.
- Equipo Extractor centrífugo para asfalto.
- Equipo de Baño María o Serológico.
- Equipo Penetrómetro de asfalto y agujas estandarizadas.
- Equipo Eyector de muestras asfálticas.
- Balanza de flotabilidad de precisión 0.1gr.
- Balanza de precisión 0.1gr; de capacidad 300 gr, 600gr, 1600 gr.
- Equipo de Ensayo de Abrasión de los Ángeles.
- Horno de secado de materiales rango de 0 °C a 160 °C.
- Equipo de compresión uniaxial.
- Bandejas y recipientes de acero inoxidable.
- Termómetro de laboratorio.
- Cinta métrica, vernier.
- Moldes de ensayo próctor modificado de 4 y 6 pulgadas.
- Moldes y anillos para compactación Marshall 101x76x60mm.
- Equipo compactador y moldes de ensayo Marshall.
- Hornilla de secado y calentamiento.
- Bomba de vacío.
- Materiales de vidrio: fiola de 500 ml, matraz de 1000 ml, vasos de precipitados.



3.5. Procedimientos de recolección de datos necesaria para la investigación.

3.5.1. Recolección de datos, Granulometría de agregado grueso, fino y agregado reciclado, Norma MTC E-204.

a. Equipos utilizados en la prueba.

- Balanza electrónica de precisión 0.1 gramos.
- Equipo mecánico de tamizado, juego de ocho tamices.
- Juego de tamices 1 ½", 1", ¾", ½", 3/8", N°4, N°8, N°16, N°30, N°50, N°100, N°200, tapa y fondo.
- Horno de secado para materiales pétreos Temperatura de secado de 110 +/- 5°C.
- Cepillo metálico, espátula, brocha, escobilla, franela, recipientes y bandejas metálicas.

b. Procedimiento.

- Se toma la muestra de agregado grueso, fino o agregado reciclado de peso aproximado entre 1500 a 2000 gr, que previamente fue cuarteado (muestra representativa).
- Se arma el juego de tamices de acuerdo al agregado que se va utilizar; para el agregado grueso se tiene los tamices: 1 ½", 1", ¾", ½", 3/8", N°4, N°8 y fondo.
- Para el agregado fino se tiene los tamices: N°4, N°8, N°16, N°30, N°50, N° 100, N° 200, fondo.
- De igual forma para el análisis del agregado reciclado de pavimento asfáltico, tanto para grueso y fino; se usaron los tamices: 1", ¾", ½", 3/8", N°4, N°8, N°10, N°40, N°50, N°200, fondo; también este ensayo influye en el diseño de mezcla ya que hace el ajuste a la curva granulométrica de acuerdo al diseño elegido en este caso mezcla asfáltica densa en frío, cuyo juego de tamices es: 1", ¾", 3/8", N°4, N°8, N°50, N° 200, fondo.
- La combinación en diseño es de agregados gruesos, finos y reciclados de pavimento asfáltico gruesos y finos.
- Se llena el material al primer tamiz que se encuentra en la parte superior del juego, aproximadamente la mitad del material previo peso (peso inicial), esto con el objeto de no saturar el equipo o estropear los tamices y tener un zarandeo adecuado.
- Se deja zarandear o agitar por espacio de 2 minutos 30 segundos.

- Se retira del equipo y se procede a pesar por tamiz
- Se saca el primer tamiz, pero antes se zarandea manualmente (1 minuto aproximadamente), ya que el zarandeo mecánico no es muy efectivo y por lo regular retiene material que debería pasar, el primer tamiz contiene el tamaño máximo nominal= primer retenido.
- Se pesa el material retenido en cada tamiz, previamente puesto en bandeja.
- Se repite el mismo procedimiento para los demás tamices del juego.
- Es decir se saca el tamiz correspondiente, se zarandea manualmente para dejar parar el material que pudiera quedar retenido, se coloca en la bandeja, se limpia el tamiz con la brocha en el caso de finos, ese reto también se coloca en la bandeja (previamente pesada) y se procede a pesar (agregado + bandeja).
- Se registra los pesos retenidos de cada tamiz, en la ficha o formato correspondiente.
- Previamente todas las muestras deben estar lavadas y secadas al horno por 24 horas a una temperatura de 110 ± 5 °C.
- Todo esto es para una primera tanda, repetimos todo el proceso hasta tener las cantidades requeridas para este u otros ensayos.



Figura 24. Trabajo de tamizado de agregados, se observa juego de tamices, herramientas, material tamizado en bolsas, al fondo equipo de tamizado mecánico.




Figura 25. Trabajo de pesado y separación de agregados así como su registro.




Figura 26. Se observa equipo de tamizado mecánico, juego de tamices y herramientas, así como agregado separado en bolsas

c. Toma de datos.

Tabla 43. Toma de datos análisis granulométrico agregado grueso 1.



UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS:
 "ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO – MECÁNICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO, ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS Y EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROTURA LENTA, EN REFERENCIA A UNA MEZCLA PATRÓN, CUSCO 2019".

Ensayo: Análisis granulométrico agregado grueso 1

Fecha: 22/10/2018 **Norma técnica:** MTC E-204

Fuente de agregados: Cantera Huillque **Provincia:** Anta **Distrito:** Ancahuasi

Muestra: 1 **Peso inicial:** 5816.9 g

# Tamiz	Tamiz(mm)	Peso 1	Peso 2	Peso 3	Peso 4	Peso 5
1	25.40	28.80	27.00	0.00	17.60	27.80
¾	19.05	617.80	718.10	476.60	583.60	630.60
½	12.50	462.70	376.00	382.10	427.40	455.80
3/8	9.50	28.60	16.40	20.60	22.60	42.20
# 4	4.75	42.18	42.18	42.18	42.18	42.18
# 8	2.36	0	0.00	0.00	0.00	0.00
# 16	1.18	0	0.00	0.00	0.00	0.00
# 30	0.60	0	0.00	0.00	0.00	0.00
# 50	0.30	0	0.00	0.00	0.00	0.00
# 100	0.15	0	0.00	0.00	0.00	0.00
# 200	0.075	0	0.00	0.00	0.00	0.00
Fondo	fondo	48.50	48.50	48.50	48.50	48.50
	Sub Total	1228.58	1228.18	969.98	1141.88	1247.08 g
					Total	5815.70 g

Observaciones: _____

Tesistas

Jefe Laboratorio

Asesor Tesis

Fuente: elaboración propia.



3.5.2. Recolección de datos, Peso unitario y porcentaje de vacíos, Norma MTC E-203.

a) Equipos utilizados en la prueba.

- Equipo balanza electrónica de precisión, pesado de hasta 40 kg., 0.5 gramos de sensibilidad.
- Equipo Horno de secado de 110 +/- 5°C.
- Herramientas: Vernier, flexómetro de 5m, bandejas, brocha, cucharón metálico, moldes próctor de 4" y 6 ", varilla de acero de 3/8".

b) Procedimiento.

Agregado grueso.

- Previamente se cuartea el mineral hasta obtener una muestra de 15kg, se lava y se pone a secar a 110 °C hasta peso constante, se deja enfriar el material seco.
- Se miden los moldes, primero el de agregados gruesos, con la ayuda de un Vernier se toman las medidas del diámetro en dos oportunidades, de la misma manera con la ayuda del flexómetro se mide la altura del molde, esto con el fin de determinar su volumen.
- Se pesa el molde de agregado grueso.
- Se llena el molde con el agregado grueso dejando caer de una altura de 5 cm con la ayuda del cucharón hasta llenar el molde se llena bien y se iguala con la varilla metálica.
- Se pesa y se repite el procedimiento dos veces más para tener tres pesos.
- El anterior es para material suelto en el caso de compactado, primero se llena una tercera parte del molde, se compacta dando 25 golpes con la varilla metálica, se llena otra tercera parte se compacta con la varilla dando 25 golpes en forma circular, se llena la última tercera parte, se compacta con la varilla dando 25 golpes en forma circular, se enrasa y se pesa.
- El paso anterior se repite dos veces más para tener tres pesos.

Agregado fino.

- Previamente se cuartea el mineral hasta obtener una muestra de 15kg, se lava y se pone a secar a 110 °C hasta peso constante, se deja enfriar, y se realiza el mismo procedimiento realizado para el agregado grueso.



Figura 27. Enrasado compactado y sin compactar con varilla de 3/8" de agregado grueso.



Figura 28. Pesado de agregado compactado en molde de 6" para hallar peso unitario.

c) Toma de datos.

Tabla 44. Toma de datos peso unitario agregado grueso 1.

	UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL													
TESIS: "ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO – MECÁNICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO, ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS Y EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROTURA LENTA, EN REFERENCIA A UNA MEZCLA PATRÓN, CUSCO 2019".														
Ensayo: <u>Peso unitario agregado grueso 1, porcentaje de vacíos</u>														
Fecha: <u>25/10/2018</u> Norma técnica: <u>MTC E203</u>														
Fuente de agregados: <u>Cantera Huillque</u> Provincia: <u>Anta</u> Distrito: <u>Ancahuasi</u>														
Muestra: <u>4</u> Peso inicial: <u>15.00 kg</u>														
Medidas molde: <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>D =</td> <td><u>151.90</u></td> <td>mm</td> <td>D =</td> <td><u>0.1519</u></td> <td>m</td> </tr> <tr> <td>h =</td> <td><u>166.60</u></td> <td>mm</td> <td>h =</td> <td><u>0.1666</u></td> <td>m</td> </tr> </table>			D =	<u>151.90</u>	mm	D =	<u>0.1519</u>	m	h =	<u>166.60</u>	mm	h =	<u>0.1666</u>	m
D =	<u>151.90</u>	mm	D =	<u>0.1519</u>	m									
h =	<u>166.60</u>	mm	h =	<u>0.1666</u>	m									
Agregado sin compactar 1														
Peso del molde:	<u>7505.00</u> g													
Molde lleno sin compactar:	<u>11570.00</u> g	Peso agregado: <u>4065.00</u> g												
Agregado sin compactar 2														
Peso del molde:	<u>7505.00</u> g													
Molde lleno sin compactar:	<u>11600.00</u> g	Peso agregado: <u>4095.00</u> g												
Agregado sin compactar 3														
Peso del molde:	<u>7505.00</u> g													
Molde lleno sin compactar:	<u>11590.00</u> g	Peso agregado: <u>4085.00</u> g												
Agregado compactado 1														
Peso del molde:	<u>7505.00</u> g													
Molde lleno compactado:	<u>12020.00</u> g	Peso agregado: <u>4515.00</u> g												
Agregado compactado 2														
Peso del molde:	<u>7505.00</u> g													
Molde lleno compactado:	<u>12080.00</u> g	Peso agregado: <u>4575.00</u> g												
Agregado compactado 3														
Peso del molde:	<u>7505.00</u> g													
Molde lleno compactado:	<u>12050.00</u> g	peso agregado: <u>4545.00</u> g												
Observaciones: _____														
_____	_____	_____												
Tesistas	Jefe Laboratorio	Asesor Tesis												

Fuente: Elaboración propia.



3.5.3. Recolección de datos, Peso específico y absorción de agregado grueso y fino, Norma MTC E- 205 y E-206.

a) Equipos utilizados en la prueba.

- Equipo balanza electrónica de precisión 0.1 gr de sensibilidad.
- Bomba de vacío, presión máxima de 2.3 bar y potencia de 25 w.
- Balanza de flotabilidad precisión 0.1 gr de sensibilidad.
- Horno de secado Temperatura 110 +/- 5°C; cono metálico y apisonador.
- Herramientas: brocha, espátula, cucharón metálico, vaso de precipitado de 500 ml, matraz o picnómetro de 500 ml, tamiz N°4, pizeta, bandejas metálicas, papel absorbente, franela y 2 litros de agua destilada.

b) Procedimiento.

Agregado fino.

- Previamente se cuartea el agregado hasta obtener una muestra de 1 kg. Que pasa el tamiz N°4, se pone a secar en el horno a 110 °C hasta peso constante (24 horas), se enfría a temperatura ambiente, se sumerge en un balde con agua por 24 horas (día anterior al ensayo), esto se realiza para lograr la saturación con agua del agregado fino.
- Transcurrido el tiempo se vierte el agua con mucho cuidado para que no se pierda agregado o partículas finas (limos, arcillas).
- El agregado húmedo se coloca en una bandeja y se lleva al horno a temperatura moderada de 60°C, con la finalidad de que pierda humedad, removiendo constantemente para que la pérdida de humedad sea uniforme y evitar que la muestra se seque más allá del estado superficialmente seco que es lo que queremos llegar.
- Para saber si el agregado está en estado superficialmente seco, se toma el material de la bandeja y se coloca en el cono metálico, se da unos cuantos golpes con el apisonador, se completa otra vez el llenado se golpea de nuevo, se vuelve a llenar y golpear hasta completar 25 golpes.
- Se retira el cono, se observa que el agregado se desmorona pero queda una especie de pirámide central el cual nos indica que está en el punto de superficialmente seco.



- Se pesa 500 gramos, de la muestra superficialmente seca y otros 500 gramos, se lleva a secado.
- Se pesa el matraz (fiola) con agua al nivel de aforo 500 ml.
- La muestra de 500gramos, superficialmente seca es llenado en el matraz(fiola) de 500 ml de aforo, se agrega agua hasta completar los 500 ml, se mezcla bien y se extrae las burbujas de aire del interior usando la bomba de vacío, se agita y se vuelve a extraer el aire, se repite el procedimiento hasta que no quede aire o rastros de burbujas, se completa el nivel de 500ml,se limpia los excedentes y se seca con el papel absorbente, se pesa la mezcla en el matraz (fiola).

Agregado grueso.

- Previamente se lava el agregado y se lleva a secado en el horno a 110°C por 24 horas hasta peso constante, se pone a enfriar a temperatura ambiente y se sumerge en un deposito con agua por 24 horas (día anterior al ensayo), con la finalidad de lograr el estado de saturación del agregado en agua.
- Se vacía el agua, el agregado grueso se seca con la ayuda de la franela hasta lograr el secado superficial que se observa en el material que tiene un aspecto opaco, se cubre el material con una bandeja para evitar la entrada de humedad del aire y se pesa en la balanza normal.
- La siguiente operación es pesar nuevamente el agregado superficialmente seco pero en la balanza de flotabilidad, para ello se coloca el agregado superficialmente seco en la canastilla de pesado y se sumerge en el agua de la balanza de flotabilidad controlando que este bien sumergido, se pesa previo calibrado del equipo.
- Finalmente este agregado es llevado al horno de secado por 24 horas y se vuelve a pesar seco.





Figura 29. Ensayo peso específico de agregado fino, utilizando bomba de vacío, agregado fino 1 y 2.



Figura 30. Ensayo peso específico de agregado fino, utilizando bomba de vacío, agregados reciclados de pavimento 1 y 2.

c) Toma de datos.

Tabla 45. Toma de datos peso específico y absorción agregado fino 1.

	UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL		
TESIS:			
"ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO – MECÁNICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO, ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS Y EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROTURA LENTA, EN REFERENCIA A UNA MEZCLA PATRÓN, CUSCO 2019".			
Ensayo: <u>Peso específico agregado fino 1 ,absorción</u>			
Fecha: <u>24/10/2018</u>		Norma técnica:	<u>MTC E-205</u>
Fuente de agregados: <u>Combapata</u>	Provincia: <u>Canchis</u>	Distrito:	<u>Combapata</u>
Muestra: <u>12</u>	Peso Inicial:	<u>1010.20</u>	<u>g</u>
A =	Peso de material saturado superficialmente seco	=	A <u>500.00</u> g
B =	Peso picnómetro + agua	=	B <u>685.00</u> g
C =	Peso picnómetro + agua + A	=	B + A <u>1185.00</u> g
D =	Peso del material + agua en el picnómetro	=	A + Y <u>993.00</u> g
E =	Volumen de masa + volumen de vacío	=	C-D <u>192.00</u> g
F =	Peso específico de material seco en la estufa	=	F <u>482.00</u> g
G =	Volumen de masa	=	E-(A-F) <u>174.00</u> g
Observaciones: _____ _____			
_____ Tesisistas	_____ Jefe Laboratorio	_____ Asesor Tesis	

Fuente: Elaboración propia



3.5.4. Recolección de datos, Porcentaje de humedad de agregados finos y gruesos, Norma MTC E-215.

a) Equipos utilizados en la prueba.

- Equipo Balanza electrónica de precisión de 0.1 gr de sensibilidad.
- Equipo Horno de secado de agregados temperatura de 110 +/- 5°C.
- Herramientas: Brocha, espátula, cucharón metálico, bandejas metálicas.

b) Procedimiento.

Agregado fino.

- Previamente se cuartea el agregado hasta obtener una muestra aproximada de 1000.00 gramos, se lava y se pone a secar a 110 °C hasta peso constante, se enfría y se deja a la intemperie para que adquiera humedad del ambiente (toda la noche).
- Luego el agregado es tamizado, siguiendo el método de gradación (cantidad de material a usar) seleccionado según **Tabla 46**. (tamiz N°4 = 500 gramos aproximadamente).
- Se pesa primero la bandeja, luego el agregado húmedo más la bandeja (**P1**).
- El agregado fino pesado se lleva al horno de secado por 16 horas a 110 °C hasta obtener peso constante, se saca del horno, se deja enfriar y se vuelve a pesar (**P2 – Peso de la bandeja**).

Agregado grueso.

- Previamente se cuartea el agregado hasta obtener una muestra aproximada de 3500.00 gramos, se lava y se pone a secar a 110 °C hasta peso constante, se enfría y se deja a la intemperie para que adquiera humedad del ambiente (toda la noche).
- Luego el agregado es tamizado, siguiendo el método de gradación (cantidad de material a usar) seleccionado según **tabla 46**. (tamiz 3/4" = 3000.00 gramos aproximadamente).
- Se pesa primero la bandeja, luego el agregado húmedo más la bandeja (**P1**).
- El agregado grueso se lleva al horno de secado por 16 horas a 110 °C hasta obtener peso constante, se saca del horno, se deja enfriar y se vuelve a pesar, el nuevo peso es:

(P2 – Peso de la bandeja).

Tabla 46. Tamaño de la muestra de agregado para determinación de humedad.

Tamaño máximo nominal de agregado mm (pulgada)	Masa mínima de la muestra de agregado de peso normal en kg
4.75 (0.187) (N°4)	0.5
9.5 (3/8)	1.5
12.5 (1/2)	2.0
19.0 (3/4)	3.0
5.0 (1)	4.0
37.5 (2.1/2)	6.0
50.0 (2)	8.0
63.0 (2.1/2)	10.0
75.0 (3)	13.0
90.0 (3.1/2)	16.0
100.0 (4)	25.0
150 (6)	50.0

Fuente: Manual de Ensayo de Materiales EM 2000, edición 2016 MTC, pág. 362.



Figura 31. Secado de agregado grueso en horno para ser puesto a la intemperie (determinación de humedad).



c) Toma de datos.

Tabla 47. Toma de datos porcentaje de humedad de agregado fino 1.

	UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO				
	FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL				
TESIS:					
"ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO – MECÁNICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO, ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS Y EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROTURA LENTA, EN REFERENCIA A UNA MEZCLA PATRÓN, CUSCO 2019".					
Ensayo: <u>Porcentaje de humedad agregado fino 1</u>					
Fecha: <u>25/10/2018</u>		Norma técnica: <u>MTC E-215</u>			
Fuente de agregados: <u>Combapata</u>		Provincia: <u>Canchis</u>		Distrito: <u>Combapata</u>	
Muestra: <u>9</u>			Peso inicial: <u>1000.00</u> g		
Peso agregado secado al horno					
Peso bandeja: <u>84.60</u> g					
Bandeja: <u>84.60</u> g		Agregado: <u>571.30</u> g		Total: <u>655.90</u> g	
Peso agregado humedecido al aire 24 horas					
Peso bandeja: <u>84.60</u> g					
Bandeja: <u>84.60</u> g		Agregado: <u>578.00</u> g		Total: <u>662.60</u> g	
Observaciones: _____					
_____		_____		_____	
Tesistas		Jefe Laboratorio		Asesor Tesis	

Fuente: Elaboración propia.

3.5.5. Recolección de datos, Determinación del porcentaje de caras fracturadas, norma MTC E-210.

a) Equipos utilizados en la prueba.

- Equipo balanza electrónica de precisión 0.1 gramos de sensibilidad.
- Equipo horno de secado temperatura 110 +/- 5°C.
- Herramientas: Brocha, cucharón, bandejas metálicas, juego de tamices 1", 3/4", 1/2", 3/8".

b) Procedimiento.

Método A.

Tabla 48. *Peso mínimo requerido de muestra para ensayo de caras fracturadas método A.*

Tamaño máximo nominal abertura, mm (pulgadas)		Masa mínima de la muestra, g (lb aprox.)
9.5	3/8"	300 (0.5)
12.5	1/2"	500 (1.0)
19	3/4"	1500 (3.0)
25	1"	3000 (6.5)
37.5	1 1/2"	7500 (16.5)
50	2"	15000 (33.0)
63	2 1/2"	30000 (66.0)
75	3"	60000 (132.0)
90	3 1/2"	90000 (198.0)

Fuente: Manual de ensayo de materiales EM 2000 edición 2016 MTC, pág. 338.

- Lavar la muestra sobre la malla designada y remover cualquier fino. Secar
- Determinar la masa de la muestra con una aproximación de 0.1%.
- Extender la muestra seca sobre una superficie plana, limpia y lo suficientemente grande como para permitir una inspección. Para verificar si la partícula alcanza o cumple el criterio

de fractura, sostener el agregado de tal manera que la cara sea vista directamente. Si la cara constituye al menos $\frac{1}{4}$ de la máxima sección transversal, considerarla como cara fracturada.

- Usando la espátula separar en tres categorías:

1.- Partículas fracturadas dependiendo si la partícula tiene el número requerido de caras fracturadas;

2.- Partículas que no reúnen el criterio especificado; y

3.- Partículas cuestionables. Si el número requerido de caras fracturadas no se consigue en las especificaciones, la determinación será hecha sobre la base de un mínimo de una cara fracturada.

Determinar el porcentaje en peso de cada una de las categorías. Si sobre cualquiera de los porcentajes más del 15% del total es cuestionable, repita la evaluación hasta que no más del 15% se repita en esta categoría.

Método B.

Tabla 49. Peso mínimo requerido de muestra para ensayo de caras fracturadas método B

Tamaño del agregado		Peso en gramos.
37.5 a 25.0 mm	1 1/2" a 1"	2000
25.4 a 19.0 mm	1" a 3/4"	1500
19.0 a 12.5 mm	3/4" a 1/2"	1200
12.5 a 9.5 mm	1/2" a 3/8"	300

Fuente: Manual de ensayo de materiales EM 2000 edición 2016 MTC, pág. 338.

- Anótese el a la columna A, el peso exacto de las proporciones de las muestra tomada para el ensayo, comprendidas entre los tamaños especificados.
- En la columna B, anote el peso del material con una cara fracturada para cada tamaño.
- La columna C, representa el porcentaje de material con una cara fracturada para cada tamaño.
- $C = (B/A) \times 100$
- Registre en la columna D, los valores correspondientes del análisis granulométrico de la muestra original.

- $D = A / \sum(\text{Pesos de tamices columna A}) * 100$.
- Después de calcular la columna $E = CxD$ y sumar los valores de cada columna, el porcentaje de caras fracturadas se calcula así, expresándolo con aproximación al 1%.
- %Caras fracturadas = E/D .



Figura 32. Agregado grueso de cantera mostrando caras fracturadas.



Figura 33. Agregado reciclado de pavimento mostrando caras fracturadas.


c) Toma de datos.

Tabla 50. Toma de datos porcentaje de caras fracturadas agregado grueso 1 método A.


	UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL											
TESIS: "ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO – MECÁNICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO, ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS Y EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROTURA LENTA, EN REFERENCIA A UNA MEZCLA PATRÓN, CUSCO 2019".												
Ensayo: <u>caras fracturadas agregado grueso 1</u>												
Fecha: <u>23/10/2018</u>		Norma técnica: <u>MTC E-210</u>										
Fuente de agregados: <u>C. Huillque</u>	Provincia: <u>Anta</u>	Distrito: <u>Ancahuasi</u>										
Muestra: <u>7</u>	P. inicial 3/8": <u>200</u> g	Método: A										
	P. inicial 1/2": <u>500</u> g	Agregado: <u>3/8", 1/2"</u>										
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 50%;">Tamaño máximo nominal abertura, mm (pulgadas)</th> <th style="width: 50%;">Masa mínima de la muestra, gr (lb aprox.)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>9.5 3/8"</td> <td>200 (0.5)</td> </tr> <tr> <td>12.5 1/2"</td> <td>500 (1.0)</td> </tr> <tr> <td>19 3/4"</td> <td>1500 (3.0)</td> </tr> <tr> <td>25 1"</td> <td>3000 (6.5)</td> </tr> </tbody> </table>	Tamaño máximo nominal abertura, mm (pulgadas)	Masa mínima de la muestra, gr (lb aprox.)	9.5 3/8"	200 (0.5)	12.5 1/2"	500 (1.0)	19 3/4"	1500 (3.0)	25 1"	3000 (6.5)	$P = \left[\frac{F + Q/2}{F + Q + N} \right] \times 100$	
Tamaño máximo nominal abertura, mm (pulgadas)	Masa mínima de la muestra, gr (lb aprox.)											
9.5 3/8"	200 (0.5)											
12.5 1/2"	500 (1.0)											
19 3/4"	1500 (3.0)											
25 1"	3000 (6.5)											
<p>P= % de partículas con el número especificado de caras fracturadas. F= Peso o cantidad de partículas fracturadas con al menos el número especificado de caras fracturadas. Q= Peso o cantidad de partículas cuestionables. N= Peso o cantidad de partículas en la categoría de no fracturadas que cumplen el criterio de fractura.</p>												
3/8"												
F = <u>100.00</u> g	Q = <u>16.70</u> g +	N = <u>83.30</u> g										
Total = <u>200.00</u> g												
1/2"												
F = <u>260.00</u> g	Q = <u>30.00</u> g +	N = <u>210.00</u> g										
Total = <u>500.00</u> g												
Observaciones: _____ _____ _____												
_____ Tesistas	_____ Jefe Laboratorio	_____ Asesor Tesis										

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 51. Toma de datos porcentaje de caras fracturadas agregado grueso 1 método B.



UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS:

"ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO – MECÁNICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO, ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS Y EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROTURA LENTA, EN REFERENCIA A UNA MEZCLA PATRÓN, CUSCO 2019".

Ensayo: Caras fracturadas agregado grueso 1

Fecha: 23/10/2018 **Norma técnica:** MTC E-210

Fuente de agregados: Cantera Huillque **Provincia:** Anta **Distrito:** Ancahuasi

Muestra: 7 **Peso inicial 3/8":** 300.00 g **Método:** **B**

Peso inicial 1/2": 1200 g **Agregado:** **3/8", 1/2"**

Datos	3/8"	Datos	1/2"
1 Cara (B)	<u>75.00</u> g	1 Cara (B)	<u>300.00</u> g
2 Caras	<u>200.00</u> g	2 Caras	<u>800.00</u> g
Resto	<u>25.00</u> g	Resto	<u>100.00</u> g
Total (A)	<u>300.00</u> g	Total (A)	<u>1200.00</u> g

Tamaño del agregado		A	B	C	D	E
Pasa tamiz	Retiene tamiz	(g)	(g)	((B/A)*100)	(%)	C*D
2"	1 1/2"					
1 1/2"	1"					
1"	3/4"					
3/4"	1/2"	1200.00	300.00	25.00	80.00	2000.00
1/2"	3/8"	300.00	75.00	25.00	20.00	500.00
	Total	1500.00		Total	100.00	2500.00 g

Observaciones: _____

Tesistas

Jefe
Laboratorio

Asesor Tesis

Fuente: Elaboración propia.



3.5.6. Recolección de datos, Partículas chatas y alargadas en agregados, Norma MTC E-223.

a) Equipos utilizados en la prueba.

- Equipo Dispositivo de calibración Proporcional.
- Equipo Balanza de precisión 0.1 gramos de sensibilidad.
- Equipo horno de secado temperatura $110 \pm 5^\circ\text{C}$.
- Herramientas: Brocha, cucharón, bandejas metálicas, juego de tamices 1", 3/4", 1/2", 3/8".

b) Procedimiento.

- Previamente debe secarse la muestra al horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta peso constante.
- Tamizar la muestra, Usando el material retenido en el tamiz de 9.5mm (3/8 pulgadas) o en el tamiz de 4.75 mm (No.4), como se requiera por la especificación que se esté usando, se debe reducir cada fracción de tamaño presente en una cantidad mayor del 10% o más de la muestra, hasta que se obtengan aproximadamente 100 partículas de cada fracción de tamaño requerido.

Método A.

- Ensayar las partículas en cada fracción de tamaño y colocarlas en uno de los cuatro grupos siguientes: (1) Partículas planas, (2) Partículas alargadas, (3) Partículas que cumplen con ambos criterios de (1) y (2), (4) Partículas que no son ni planas ni alargadas y no cumplen con los criterios del grupo (1) ni del grupo (2).
- Si la partícula se determina como plana pero no alargada se pone en el grupo de las "planas" si se determina que es alargada pero no plana se pone en el grupo de las "alargadas". En algunos es posible que alguna partícula cumpla con los requisitos tanto de partícula plana como de alargada. En este caso, la partícula se pone en el grupo de partículas que cumplan con los criterios de ambos grupos. Si la partícula no se plana ni es alargada, se pone en el grupo que no cumple con los criterios del grupo (1) o del grupo (2).

Uso del calibrador proporcional.

Ensayo de partícula plana – Poner la abertura mayor igual al ancho máximo de la partícula. La partícula es plana si su espesor máximo pasa a través de la abertura menor.

Ensayo de partícula alargada – Poner la abertura mayor igual al largo máximo de la partícula. La partícula es alargada si su ancho máximo puede pasar a través de la abertura menor.

Método B.

Ensayar las partículas de cada fracción del tamaño y colocarlas en dos grupos: (1) planas y alargadas, (2) ni planas ni alargadas.

Usar el dispositivo de calibración proporcional posicionado a la relación de dimensiones adecuada.

Ensayo de partículas planas y alargadas – Poner la abertura mayor igual al largo máximo de la partícula se considera plana y alargada, si el espesor máximo puede pasar por la apertura menor.

Después de que cada una de las partículas haya sido clasificada en los grupos descritos, determinar la proporción de la muestra en cada grupo, ya sea por conteo o por masa, según se requiera.

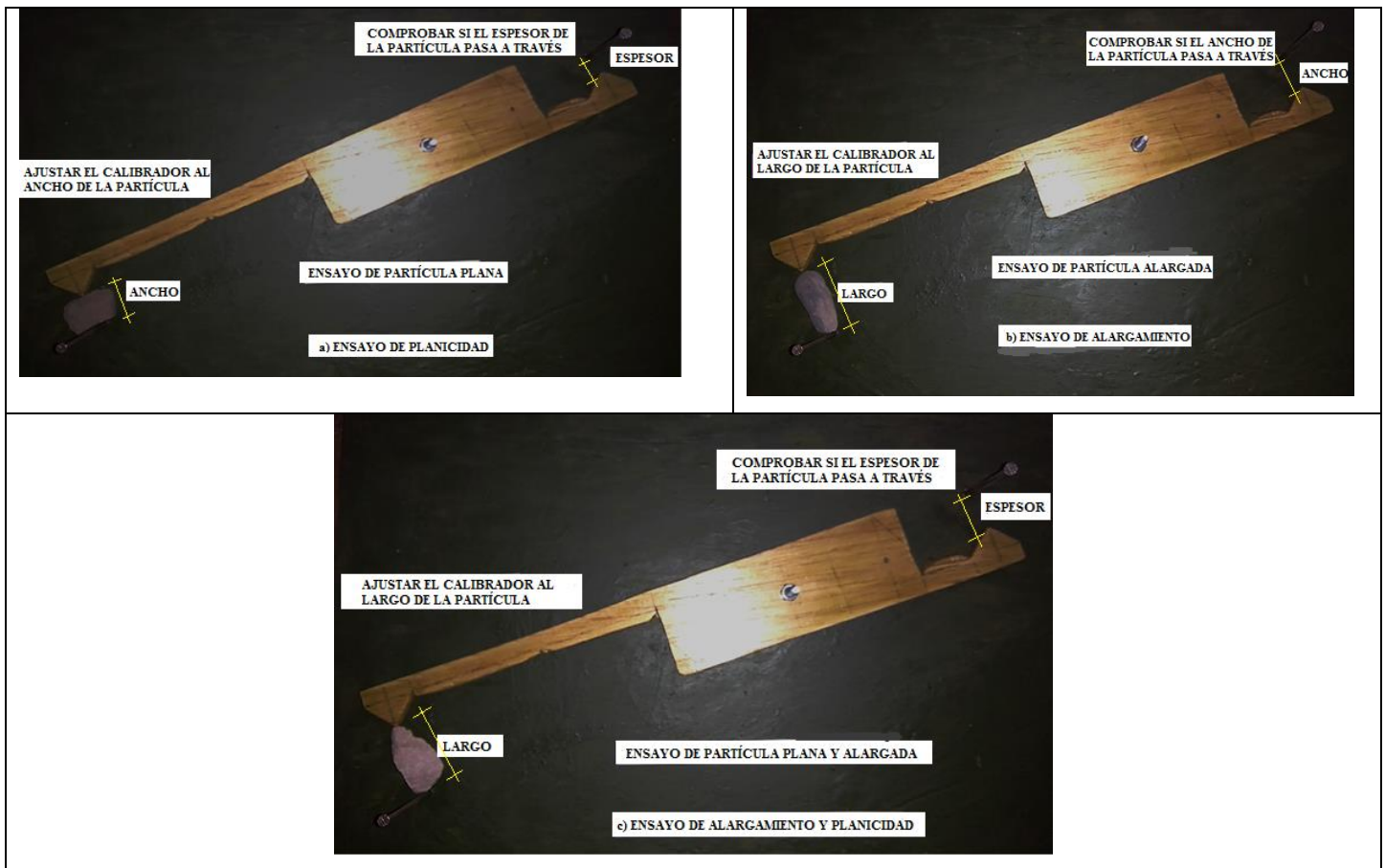


Figura 34. Equipo de ensayo de planicidad, alargamiento y combinado; así como su forma de utilización.

c) Toma de datos.

Tabla 52. Toma de datos chatas y alargadas agregado grueso.

	<p>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL</p>				
<p>TESIS:</p> <p>"ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO – MECÁNICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO, ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS Y EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROTURA LENTA, EN REFERENCIA A UNA MEZCLA PATRÓN, CUSCO 2019".</p>					
<p>Ensayo: <u>Chatas y alargadas agregado grueso</u></p>					
<p>Fecha: <u>27/10/2018</u> Norma técnica: <u>MTC E-223</u></p>					
<p>Muestra grueso 1: <u>100</u> Unidades Peso grueso 1 malla 3/8" <u>1000.00</u> g</p> <p>Muestra grueso 2: <u>100</u> Unidades Peso grueso 2 malla 3/8" <u>1000.00</u> g</p> <p>Muestra reciclado 1: <u>100</u> Unidades Peso reciclado 1 malla 3/8" <u>1000.00</u> g</p> <p>Muestra reciclado 2: <u>100</u> Unidades Peso reciclado 2 malla 3/8" <u>1000.00</u> g</p>					
Agregado	N° partículas planas	N° partículas alargadas	N° partículas que cumplen ambos criterios	N° partículas que no cumplen ningún criterio	N° total de elementos
Grueso 1	5.00	5.00	40.00	50.00	100.00
Grueso 2	4.00	3.00	44.00	49.00	100.00
Reciclado 1	10.00	10.00	50.00	30.00	100.00
Reciclado 2	10.00	15.00	45.00	30.00	100.00
<p>Observaciones: _____</p> <p>_____</p>					
<p>_____ Tesistas</p>		<p>_____ Jefe Laboratorio</p>		<p>_____ Asesor Tesis</p>	

Fuente: Elaboración propia.



3.5.7. Recolección de datos, Desgaste de agregados abrasión de los ángeles, Norma MTC E-207.

a) Equipos utilizados en la prueba.

Equipo:

- Balanza electrónica de precisión pesado de hasta 40 kg, 0.5 g de sensibilidad.
- Máquina de los Ángeles
- Horno de secado temperatura 110 +/- °5C.
- Esferas de acero de 48mm peso entre 390 y 445 g.

Herramientas:

- Brocha, cucharón metálico, bandejas metálicas, juego de tamices: 1", ¾", ½", 3/8", ½", N°10.

b) Procedimiento.

- Previamente se cuartea el agregado hasta obtener una muestra aproximada de 5kg, se lava y se pone a secar a 110 °C hasta peso constante, se enfría, agregado seco.
- El agregado es tamizado, siguiendo el método de gradación (cantidad de material a usar) seleccionado según **Tabla 53**, en nuestro caso se sigue el método B.
- Realizado el tamizado por el método B se pesa el agregado (**P1**), que se lleva a la Máquina de los Ángeles el cual se carga junto con 11 esferas.
- Se enciende la Máquina de los Ángeles dejándose realizar su trabajo de impacto a través de las bolas de acero por un lapso de 15 minutos o 500 revoluciones, determinado por la Norma.
- Cumplidos los 15 minutos se saca el agregado por la compuerta de la Máquina de los Ángeles, sacando primero las bolas metálicas y luego el material por completo con la ayuda de una brocha es colocado a la bandeja.
- Se tamiza y lava todo el agregado extraído de la Máquina de los Ángeles en el **tamiz N°10**, el pasante es descartado.
- El agregado es llevado al horno a temperatura de secado (110°C) hasta peso constante, aproximadamente 24 horas.
- Luego de este tiempo se tiene el peso nuevo de desgaste del agregado grueso (**P2**).

Tabla 53. Gradación de las muestras de ensayo y cantidad según método.

Medida de tamiz (abertura cuadrada)		Masa de tamaño indicado, g			
Que pasa	Retenido sobre	Gradación			
		A	B	C	D
37.5 mm (1 1/2")	25.0 mm (1")	1250 ± 25	-	-	-
25.0 mm (1")	19.0 mm (3/4")	1251 ± 25	-	-	-
19.0 mm (3/4")	12.5 mm (1/2")	1252 ± 10	2500 ± 10	-	-
12.5 mm (1/2")	9.5 mm (3/8")	1253 ± 10	2501 ± 10	-	-
9.5 mm (3/8")	6.3 mm (1/4")	-	-	2500 ± 10	-
6.3 mm (1/4")	4.75 mm (N°4)	-	-	2500 ± 10	-
4.75 mm (N°4)	2.36 mm (N°8)	-	-	-	5000 ± 10
Total		5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10



Fuente: Manual de ensayo de materiales EM 2000, edición 2016, pág. 316.



Figura 35. Operación de carga, descarga, lavado y tamizado en malla N°10 de agregado grueso, E. de los ángeles.

c) Toma de datos.

Tabla 54. Toma de datos desgaste en máquina de abrasión de los ángeles agregado grueso 1.

	UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL		
TESIS: "ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO – MECÁNICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO, ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS Y EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROTURA LENTA, EN REFERENCIA A UNA MEZCLA PATRÓN, CUSCO 2019".			
Ensayo: <u>Abrasión de los ángeles agregado grueso 1</u>			
Fecha: <u>29/10/2018</u>	Norma técnica: <u>MTC E-207</u>		
Fuente de agregados: <u>Cantera Huillque</u>	Provincia: <u>Anta</u>	Distrito: <u>Ancahuasi</u>	
Muestra: <u>7</u>	Peso Inicial: <u>5006.00</u> g	Método: <u>B</u>	
Peso agregado antes de abrasión		Agregado: <u>3/8", 1/2"</u>	
Peso bandeja: <u>1230.00</u> g			
Bandeja: <u>1230.00</u> g	Agregado: <u>5006.00</u> g	Total: <u>6236.00</u> g	
Peso agregado después de abrasión			
Peso bandeja: <u>1230.00</u> g			
Bandeja: <u>1230.00</u> g	Agregado: <u>4153.00</u> g	Total: <u>5383.00</u> g	
Observaciones: _____			
_____	_____	_____	
Tesistas	Jefe Laboratorio	Asesor Tesis	

Fuente: Elaboración propia.



3.5.8. Recolección de datos, Durabilidad a sulfato de sodio y/o magnesio de agregados, Norma MTC E-209.

a) Equipos utilizados en la prueba.

Equipo:

- Balanza electrónica de precisión 0.01 gramo de sensibilidad.
- Horno de secado temperatura 110 +/- °5C.
- Incubadora eléctrica.
- Desionizador de agua.

Herramientas:

- Brocha, espátulas, termómetro de laboratorio, bandejas metálicas, coladores, vasos de precipitados de 50ml a 1000ml, fiola de 1000ml, franela.

Reactivo:

- Sulfato de Magnesio químicamente puro.

b) Procedimiento.

- Se toman 350 gr de Sulfato de magnesio (sal anhidrida), se disuelve en agua ionizada a 25°C, en tres vasos de precipitado de 1000ml de capacidad por separado hasta conseguir la disolución completa, la solución tiene un aspecto aceitoso, se vierte cada vaso en la fiola de capacidad de aforo de 1000ml una vez lleno se sigue mezclado vigorosamente hasta que toda la solución preparada quede homogénea.
- Se introduce las muestras en la solución de sulfato de Mg, durante no menos de 16 horas ni más de 18 horas, de manera tal, que la solución cubra las muestras por lo menos 1,5 cm.
- Se tapan los envases para disminuir la evaporación y evitar el ingreso de sustancias extrañas.
- Las muestras sumergidas en la solución se mantendrán a una temperatura de $21 \pm 1^\circ\text{C}$ durante el período de inmersión, esta se logra dentro de la incubadora.
- Para mantener sumergidos los agregados muy livianos, estos se podrán cubrir con una malla de alambre a las cuales se les agregará pesos y se colocarán sobre la muestra dentro del envase.
- Después del periodo de inmersión se saca la muestra de agregado de la solución, se deja escurrir durante 15 o 20 minutos en los coladores y vasos de precipitado.



- Se coloca en el horno de secado, temperatura del horno a 110°C.
- Se seca la muestra a la temperatura especificada hasta obtener un peso constante. Durante el período de secado, se sacan las muestras del horno y se pesan, sin enfriamiento, a intervalos de 2 a 4 horas. Se puede considerar que se ha alcanzado el peso constante cuando dos pesadas sucesivas para cualquier muestra, realizadas como se describe arriba difieran en menos del 1% del peso de la muestra en 4 horas de secado.
- Después de haber conseguido el peso constante, enfríe la muestra a la temperatura ambiente y luego se sumerge en la solución nuevamente, repitiendo el proceso.
- **Número de ciclos:** Se repite el proceso alternado de inmersión y secado hasta que se obtenga el número de ciclos requeridos.



Figura 36. Preparación de solución de sulfato de magnesio, incubación y colado de 28 muestras.

c) Toma de datos.

Tabla 55. Toma de datos durabilidad al sulfato de sodio y/o magnesio agregado fino 1.

		UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL						
TESIS: "ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO – MECÁNICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO, ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS Y EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROTURA LENTA, EN REFERENCIA A UNA MEZCLA PATRÓN, CUSCO 2019".								
Ensayo: Durabilidad al sulfato de sodio y magnesio agregado fino1								
Fecha: 15/12/2018		Norma técnica: MTC E-209						
Fuente de agregados: Combapata		Provincia: Canchis		Distrito: Combapata				
Muestra: 7		Peso muestra original		3000.00 g				
Durabilidad del agregado fino en solución de.....								
Malla retenido		% retenido muestra original	Peso de las fracciones antes del ensayo	Peso de las fracciones después del ensayo	diferencia de peso antes y después del ensayo	% pérdidas después de ensayo	% de pérdidas corregidas	
4.75 mm	N°4	13.76 %	51.111 g	51.085 g	0.026 g	0.051 %	0.007 %	
2.36 mm	N°8	28.87 %	50.490 g	49.252 g	1.238 g	2.452 %	0.708 %	
1.18 mm	N°16							
0.6 mm	N°30	28.17 %	50.883 g	50.328 g	0.555 g	1.091 %	0.307 %	
0.3 mm	N°50	10.57 %	50.185 g	46.322 g	3.863 g	7.698 %	0.814 %	
0.15mm	N°100							
-	-							
Totales						11.291 %	1.836 %	
Sulfato de sodio			Sulfato de magnesio					x
Observaciones: _____ _____ _____								
_____ Tesistas		_____ Jefe Laboratorio		_____ Asesor Tesis				

Fuente: Elaboración Propia.



3.5.9. Recolección de datos, Equivalente de arena agregado fino, norma MTC E-114.

a) Equipos utilizados en la prueba.

Equipo:

- Cilindro graduado de plástico transparente.
- Tapón de jebe, tubo irrigador, dispositivo de pesado de pie.
- Horno de Secado temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Equipo de agitación mecánico y/o manual.
- Cronómetro o reloj.

Herramientas:

- Brocha, espátulas, bandejas metálicas, cucharón metálico, franela, juego de tamices, guantes de jebe, guantes quirúrgicos, vasos de precipitado, tamiz #04, lata de medición, embudo, botellas de plástico de 3lt, papel filtro, balde de un galón.

Insumos:

- Cloruro de calcio (454 g), glicerina (1640 ml), formaldehido (45 ml).

b) Procedimiento.

- Se ajusta el dispositivo del sifón a una botella o balde de un galón, de la solución de cloruro de calcio. Coloque la botella a 91 cm., sobre la superficie de trabajo.
- Conectar el sifón a la parte superior de la botella con la solución mediante un pedazo corto de tubo, mientras se abre el sujetador.
- Realizar el sifonado 102 mm (indicado en el cilindro graduado) de la solución de trabajo de cloruro cálcico en el cilindro de plástico.
- Llenar uno de los especímenes de ensayo en el cilindro de plástico usando el embudo para evitar derrames.
- Se golpea ligeramente el fondo del cilindro con la palma de la mano varias veces con la finalidad de liberar las burbujas de aire y lograr el humedecimiento total de la muestra.
- Se Mantiene la muestra humedecida y enturbado por 10 minutos

- Al completar los 10 minutos del periodo de humedecimiento, se para el cilindro, se afloja el material del fondo invirtiendo parcialmente el cilindro y agitándolo simultáneamente.
- Después de aflojar el material del fondo del cilindro, agitar el cilindro y su contenido por uno de los siguientes métodos:
- **Método del agitador Mecánico:** se coloca el cilindro en el agitador mecánico del equivalente de arena, registrar el tiempo, y permitir que la máquina agite el cilindro y su contenido por 45 segundos.
- **Método Manual:** Sostenga el cilindro en una posición horizontal y agítelo fuertemente con un movimiento horizontal de extremo a extremo, Agite el cilindro 90 veces en un tiempo aproximado de 30 segundos, recorriendo 23 centímetros aproximados, colocar el cilindro sobre la parte superior de la mesa de trabajo y remover el tapón de jebes.



Probetas calibradas y pisón de E.A.



Proceso de sifoneo E.A.



Probetas cargadas



Equipo de agitación equivalente de arena

Figura 37. Proceso de análisis y prueba de equivalente de arena.

c) Toma de datos.

Tabla 56. Toma de datos equivalente de arena de agregado fino.

			
UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL			
TESIS: “ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO – MECÁNICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO, ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS Y EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROTURA LENTA, EN REFERENCIA A UNA MEZCLA PATRÓN, CUSCO 2019”.			
Ensayo: <u>Equivalente de arena de agregados finos</u>			
Fecha: <u>17/12/2018</u>		Norma técnica: <u>MTC E-114</u>	
Muestra de agregado: <u>A. Fino 1</u>		Provincia: <u>Canchis</u> Distrito: <u>Combapata</u>	
N° de Muestra	Peso (g)	Lectura de arena (pulgadas)	Lectura de arcilla (pulgadas)
1	110.4	3.2	5.4
2	115.3	3.3	5.5
3	121.7	3.5	5.7
4	113.1	3.3	5.6
5	117.5	3.4	5.5
6	119.2	3.5	5.7
7	112.8	3.1	5.2
8	116.3	3.2	5.3
9	114.4	3.1	5.2
10	115.9	3.0	5.2
Observaciones: _____			
_____		_____	
Tesis	Jefe Laboratorio	Asesor Tesis	

Fuente: Elaboración Propia.



3.5.10. Recolección de datos, Angularidad de agregado fino, norma MTC E-222.

a) Equipos utilizados en la prueba.

Equipo:

- Juego de tamices N° 08, N° 50, N°200.
- Recipiente cilíndrico de volumen conocido.
- Embudo.
- Soporte metálico.
- Balanza de precisión 0.1 gramos.
- Vernier y cinta métrica.

Herramientas:

- Brocha, espátulas, bandejas metálicas, cucharón metálico, franela, guantes de jebe, guantes quirúrgicos.

b) Procedimiento.

- Primeramente se determina el volumen del recipiente cilíndrico con la ayuda del vernier se mide el diámetro interno y la profundidad, con ellos determinamos el volumen del cilíndrico.
- Se coloca el soporte universal u estructura fija que contenga el embudo, el mismo que será donde se llene el agregado fino de ensayo.
- Se coloca el recipiente cilíndrico de volumen conocido debajo del embudo, se procede a llenar el recipiente por medio del embudo hasta llenar el mismo.
- Lleno el recipiente se enraza y se lleva a pesar.
- Antes primeramente se debe pesar el recipiente cilíndrico vacío y luego el recipiente lleno con el agregado fino.
- Teniendo el peso, volumen y la densidad del agregado fino se aplica la fórmula y se determina la angularidad misma que no debe ser menor de 35%.





Figura 38. A la izquierda, equipo de ensayo de angularidad que consta de un recipiente cilíndrico de volumen y peso conocido y un embudo; derecha, equipo cargado antes de realizar el ensayo, (Fuente: elaboración propia).



Figura 39. A la izquierda, Ensayo en ejecución, llenado de recipiente con el agregado seleccionado hasta el ras; derecha, pesado de la muestra enrasada en el recipiente de volumen y peso conocido, (Fuente: elaboración propia).

c) Toma de datos.

Tabla 57. Toma de datos angularidad agregado fino.

						
UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL						
TESIS: “ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO – MECÁNICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO, ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS Y EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROTURA LENTA, EN REFERENCIA A UNA MEZCLA PATRÓN, CUSCO 2019”.						
Ensayo: <u>Angulosidad de agregado fino</u>						
Fecha: <u>18/12/2018</u>			Norma técnica: <u>MTC E-222</u>			
Muestra: <u>Agregados finos</u>			Provincia: <u>Cusco</u>		distrito: <u>S. Jerónimo</u>	
N° muestra	N° malla	Agregado	Peso (g)	Densidad (g/cm ³)	Volumen de recipiente (cm ³)	Angularidad (%)
1	50	Fino 1	126	2.6154	81.6823	41.0201
2	200	Fino 1	129	2.6154	81.6823	39.6158
3	50	Fino 2	123	2.7004	81.6823	44.2376
4	200	Fino 2	124	2.6494	81.6823	42.7015
5	50	Reciclado 1	121	2.6264	81.6823	43.5979
6	200	Reciclado 1	123	2.5854	81.6823	41.7559
7	50	Reciclado 2	115	2.5814	81.6823	45.4597
8	200	Reciclado 2	111	2.4923	81.6823	45.4759
Observaciones: _____						
_____		_____		_____		
Tesistas		Jefe Laboratorio		Asesor Tesis		

Fuente: Elaboración Propia.



3.5.11. Recolección de datos, Extracción cuantitativa de asfalto, Norma MTC E-502.

a) Equipos utilizados en la prueba.

Equipo:

- Balanza Electrónica de Precisión 0.1 gramos de sensibilidad.
- Horno de Secado temperatura de 110 +/- 5°C.
- Equipo de Tamizado Mecánico.
- Equipo Rotarex o Extractor Centrífugo.
- Estufa eléctrica para calentamiento de asfalto.
- Secador eléctrico.
- EPP (Equipo de Protección personal).

Herramientas:

- Brocha, espátulas, bandejas metálicas, cucharón metálico, franela, juego de tamices, guantes de jebe, guantes quirúrgicos, mascarilla.

Disolvente:

- Gasolina de 90 octanos.

b) Procedimiento.

- Se calienta la muestra de carpeta asfáltica a una temperatura mayor a 60°C, de preferencia en un espacio abierto por el desprendimiento de vapores, el objetivo es ablandar el material para su fácil manejo y fragmentación (desmenuzable).
- Se pesa una muestra aproximada de 1500.00 gramos y también el filtro del equipo extractor antes del ensayo.
- Se vacía el material asfáltico en la taza del extractor con tamaño adecuado menor a 1”.
- Se vierte el disolvente (gasolina 90 octanos) u otro disolvente como: carbonato de amonio, cloruro de metileno, tricloro etileno en la taza, se tapa el extractor en forma segura es recomendable dejar actuar el disolvente en reposo de 30 a 60 minutos, luego se hace girar lentamente y se incrementa las revoluciones hasta un máximo de 3600 RPM, una vez que el disolvente haya salido por el orificio de descarga se vuelve a cargar el disolvente 200ml de 2 a tres veces más, hasta observar una descarga clara (color ligeramente pardo), que indica un buen lavado.

- Se retira la tapa y se pone a secar la muestra al aire o con ayuda de un secador hasta evaporar todo el disolvente.
- La muestra seca, se pesa nuevamente, también se pesa el filtro usado en el ensayo.
- El peso de los finos del filtro más el peso de la muestra seca se resta al peso original de la muestra asfáltica siendo este el peso del cemento asfáltico (asfalto contenido en la muestra de carpeta asfáltica).
- El porcentaje de asfalto se obtiene dividiendo el peso del cemento asfáltico entre el peso del material pétreo y multiplicándolo por 100, es decir porcentaje de cemento asfáltico presente en la muestra ensayada.



Figura 40. Se observa equipo de lavado centrífugo de asfalto, pesado de muestra de pavimento asfáltico reciclado preparado, carga del mismo en el equipo de centrifugado.

c) Toma de datos.

Tabla 58. Toma de datos extracción cuantitativa de asfalto, lavado de pavimento asfáltico reciclado 1.

		UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL						
		TESIS: “ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO – MECÁNICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO, ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS Y EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROTURA LENTA, EN REFERENCIA A UNA MEZCLA PATRÓN, CUSCO 2019”.						
Ensayo: Extracción cuantitativa de asfalto lavado de pavimento asfáltico reciclado.								
Fecha: 04/03/2019		Norma técnica:			MTC E-502			
Fuente de agregados: Av. 24 de junio		Provincia: Cusco		Distrito: S. Jerónimo				
N° de Muestra	Peso pavimento asfáltico reciclado (g)	Peso del filtro (g)	Peso agregado lavado (g)	Peso filtro + agregado (g)	Peso agregado del filtro (g)	Peso asfalto (g)	% agregado lavado	% asfalto
1	1501.91	24.20	1434.55	36.81	12.61	54.75	95.52	3.65
2	1500.00	35.00	1434.20	55.00	20.00	45.80	95.61	3.05
3	1500.00	35.00	1423.70	55.00	20.00	56.30	94.91	3.75
4	1500.00	35.00	1422.50	55.00	20.00	57.50	94.83	3.83
5	1500.00	35.00	1417.50	55.00	20.00	62.50	94.50	4.17
6	1500.00	35.00	1393.00	55.00	40.00	67.00	92.87	4.47
7	1500.00	35.00	1396.70	55.00	40.00	63.30	93.11	4.22
8	1500.00	35.00	1400.00	55.00	40.00	60.00	93.33	4.00
9	1500.00	35.00	1405.00	55.00	40.00	55.00	93.67	3.67
10	1500.00	35.00	1407.00	55.00	40.00	53.00	93.80	3.53
11	1500.00	35.00	1401.00	55.00	40.00	59.00	93.40	3.93
Observaciones: _____ _____								
Tesistas			Jefe Laboratorio			Asesor Tesis		

Fuente: Elaboración propia.



3.5.12. Recolección de datos, Penetración de los materiales bituminosos, Norma MTC E-304.

a) Equipos utilizados en la prueba.

Equipo:

- Aparato de penetración con vástago de soporte de 50 g a 100 g +/- 0.05gramos.
- Aguja de penetración. de acero inoxidable templado totalmente endurecido, grado 440-C de 50mm (2pulgadas) de longitud, diámetro de 1,00 a 1,02mm.
- Recipiente de prueba cilíndricos; penetración menor a 200: diámetro 50mm y espesor 35mm.
- Baño María, control de temperatura a 25°C.
- Cronómetro.
- Termómetro de laboratorio.
- Desionizador y/o destilador de agua.

Herramientas:

- Termómetro de laboratorio, recipientes metálicos, franela

Adicional:

- Agua destilada y/o desionizada.

b) Procedimiento.

Revise equipo de penetración, viendo que todas perillas ajusten correctamente, así como el marcador tipo reloj.

Limpie la aguja de penetración con un solvente adecuado este puede ser gasolina, seque con una franela, introduzca la aguja de penetración en el sujetador del Penetrómetro, colocar el peso de 50g, verifique la carga movable de $100 \pm 0,1$ gramos.

Revise el indicador de nivel, para ver si el equipo esta nivelado, caso contrario hacer los ajustes.

Lleve la lectura del dial al punto a cero, Baje la aguja lentamente hasta que la punta haga contacto con la superficie de la muestra, esto se logra trayendo la punta de la aguja real al contacto con su imagen reflejada en la superficie de la muestra o trate de generar una ligera raya con la punta de la aguja sobre la superficie de la muestra.

Rápidamente suelte al sujetador de la aguja para el tiempo de 5 segundos, ajuste el instrumento para medir la distancia penetrada en décimas de milímetro.

Repita el procedimiento por lo menos en tres puntos diferentes de la superficie de la muestra, a una distancia de 1 cm entre ellos y el borde del recipiente contenedor.

Limpie la aguja cada vez que repita el ensayo.

Tabla 59. Máxima diferencia de penetración.

Penetración	0 a 49	50 a 149	150 a 249	250 a 500
Máxima diferencia entre la penetración más alta y la más baja.	2	4	12	20

Fuente: Manual de Ensayo de Materiales EM 2000 Edición 2016 MTC, pág. 417.

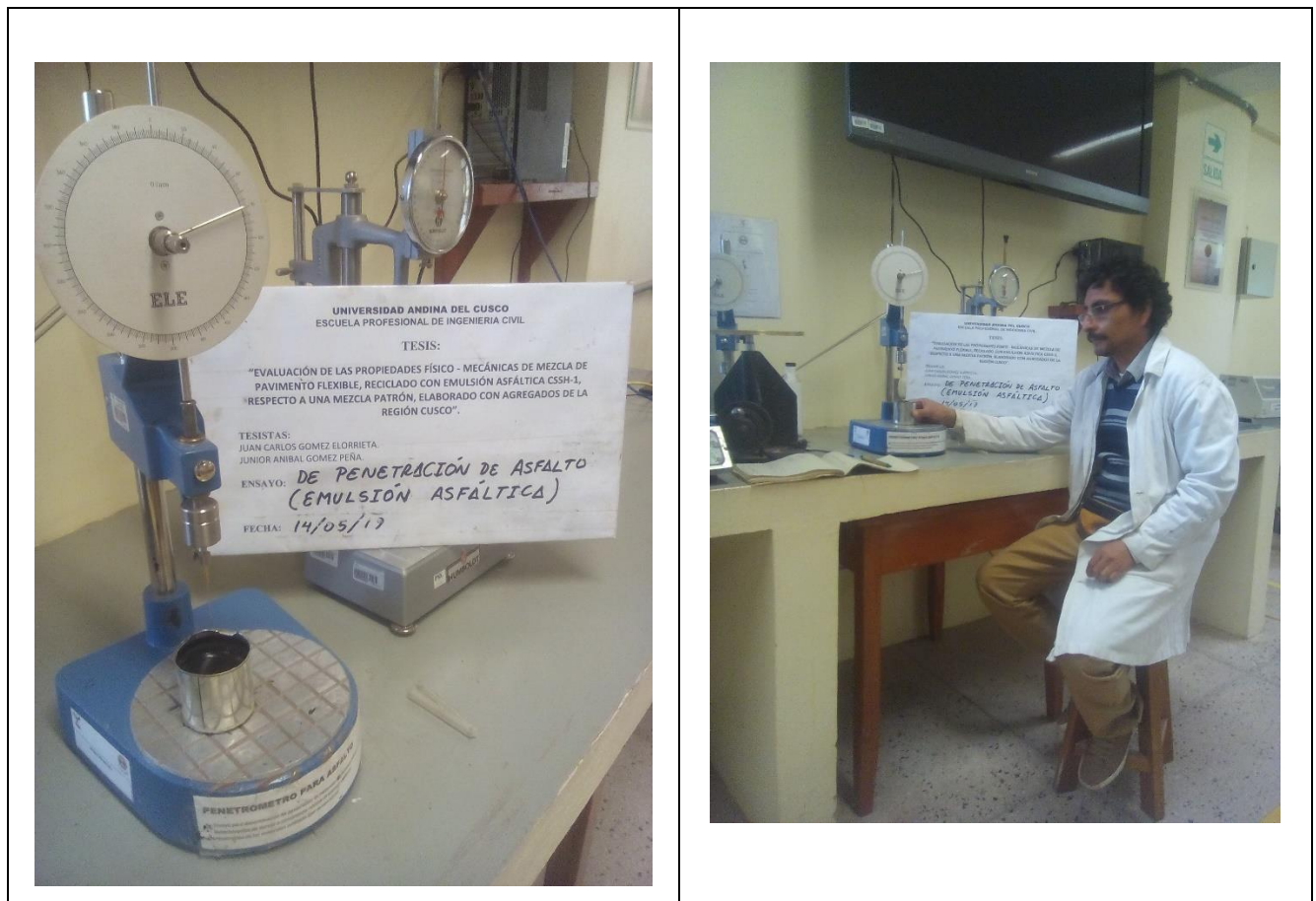


Figura 41. Se observa equipo de penetración y realización del ensayo a 25°C.

c) Toma de datos.

Tabla 60. Toma de datos penetración de materiales bituminosos.

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL						
TESIS:						
“ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO – MECÁNICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO, ELABORADO CON AGREGADOS RECICLADOS Y EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROTURA LENTA, EN REFERENCIA A UNA MEZCLA PATRÓN, CUSCO 2019”.						
Ensayo: Penetración de materiales bituminosos muestra 1						
Fecha: 14/05/2019		Norma técnica: MTC E-304				
Tipo de asfalto: Residuo emulsión CSS-1h		Provincia: Cusco		Distrito: S. Jerónimo		
N° de Muestra	Peso (g)	Diámetro (cm)	Espesor (cm)	Temperatura (C°)	Tiempo (s)	Penetración (dmm)
1	50	6.2	3.2	25	5	270
2	50	6.2	3.2	25	5	57
3	50	6.2	3.2	25	5	187
4	50	6.2	3.2	25	5	228
5	50	6.2	3.2	25	5	179
6	50	6.2	3.2	25	5	198
7	50	6.2	3.2	25	5	194
8	50	6.2	3.2	25	5	171
9	50	6.2	3.2	25	5	155
10	50	6.2	3.2	25	5	142
11	50	6.2	3.2	25	5	140
12	50	6.2	3.2	25	5	115
13	50	6.2	3.2	25	5	119
14	50	6.2	3.2	25	5	110
15	50	6.2	3.2	25	5	131
Observaciones: _____						
_____		_____		_____		
Tesisistas		Jefe Laboratorio		Asesor Tesis		

Fuente: Elaboración propia.



3.5.13. Recolección de datos, Carga de partículas de emulsiones asfálticas, Norma MTC E-407.

a) Equipos utilizados en la prueba.

Equipo:

- Fuente de corriente continua de 12 voltios.
- Amperímetro.
- Baño maría.

Herramientas:

- Termómetro de laboratorio.
- Dos electrodos de placa inoxidable de 25x106mm²
- Vaso de precipitado de 150 a 250ml.
- Cronómetro.

Adicional:

- Agua desionizada y/o destilada.

b) Procedimiento.

Caliente la emulsión a ser probada a $50 \pm 3^{\circ}\text{C}$, en un baño de agua de $71 \pm 3^{\circ}\text{C}$. Remueva la emulsión para asegurar uniformidad de temperatura.

La muestra de emulsión se vierte en un vaso precipitado de 250 ml en la cantidad que permita Sumergir 25 mm de los electrodos dentro de ella.

Se montan los electrodos, previamente limpios y secos, y se introducen en la emulsión hasta la marca de 25 mm.

Los electrodos a ser reutilizados deben estar limpios:

1. Lave con agua destilada,
2. Lave con un solvente adecuado para asfalto,
3. Lave con alcohol etílico o isopropílico, y
4. Lave con agua destilada.

Se conectan los electrodos a la fuente de alimentación y se ajusta la intensidad de corriente, mediante la resistencia variable, hasta unos 8 mA, poniendo en marcha al mismo tiempo un reloj, debe anotarse la intensidad de la corriente empleada.

Cuando la intensidad de corriente baje a 2 mA o hayan transcurrido 30 minutos, se desconecta la corriente, desmontar los electrodos y se lava con agua.

Finalmente, se observa el depósito que queda en los electrodos; una emulsión catiónica producirá un depósito apreciable de ligante en el cátodo (electrodo negativo), mientras que el ánodo (electrodo positivo), permanecerá limpio.

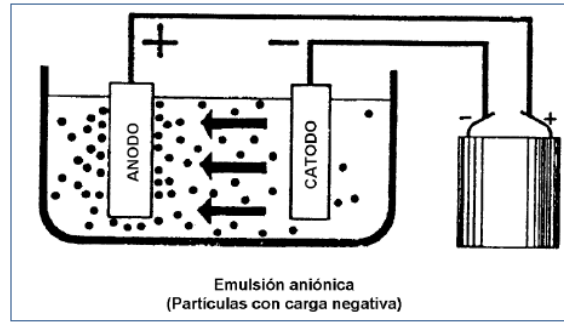


Figura 42. Emulsión Aniónica (partículas con carga negativa), (Fuente: Manual de Ensayo de Materiales EM 2000 Edición 2016 MTC, pág. 523).

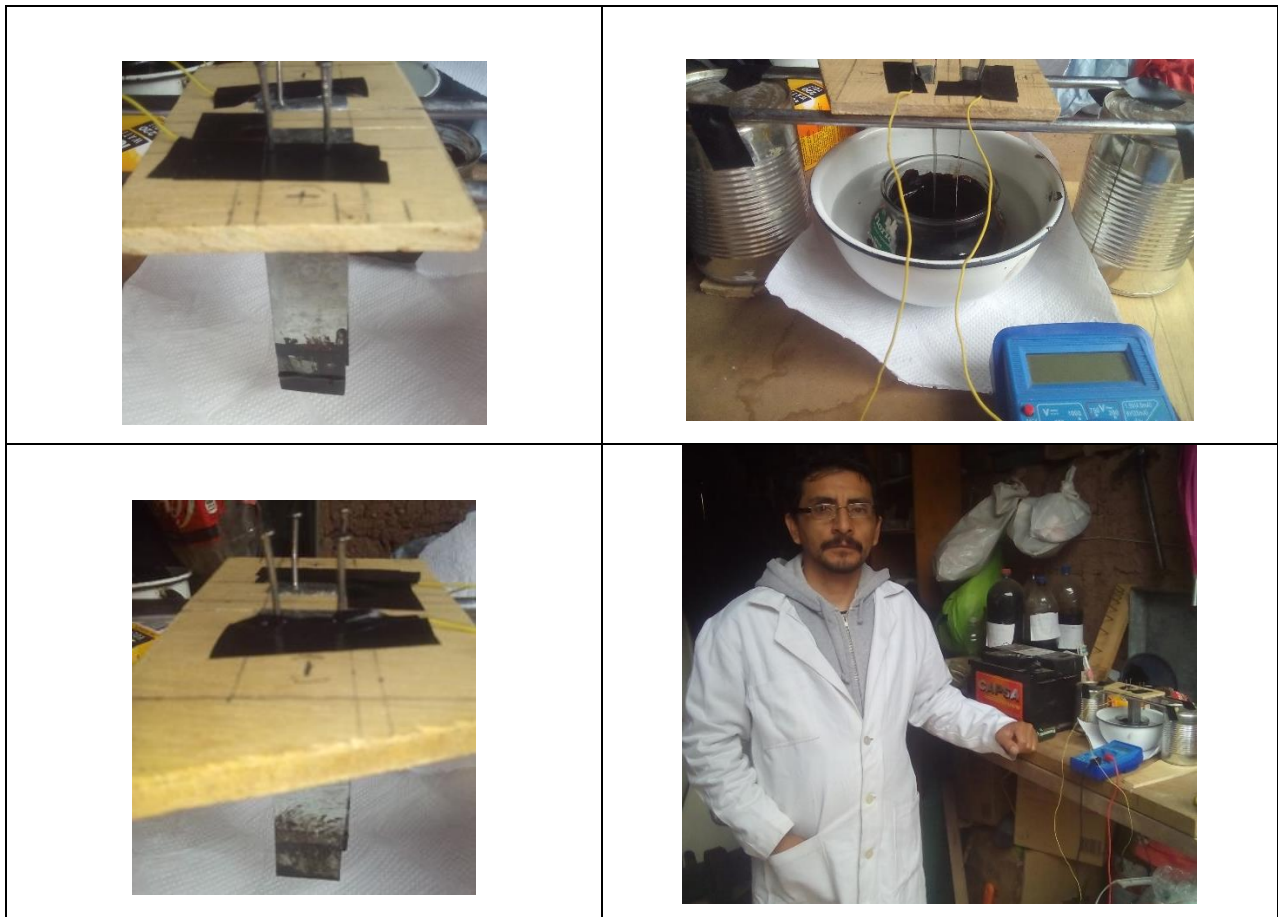


Figura 43. Carga de partículas de la emulsión y equipo utilizado, se aprecia recubrimiento en el cátodo por lo que la emulsión es catiónica, (Fuente: Elaboración propia).