

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Criterios de estandarización de emulsiones asfálticas para
el reciclado en frío de pavimentos en el Distrito
Metropolitano de Quito
Proyecto de investigación**

Paola Carolina Medina Padilla

Ingeniería Civil

Trabajo de titulación presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero Civil

Quito, 13 de mayo de 2019

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ
COLEGIO DE CIENCIAS E INGENIERÍA

**HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

**Criterios de estandarización de emulsiones asfálticas para el reciclado en
frío de pavimentos en el Distrito Metropolitano de Quito**

Paola Carolina Medina Padilla

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico

Gustavo Boada, Ing. Civil

Firma del profesor

Quito, 13 de mayo de 2019

DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante: _____

Nombres y apellidos: Paola Carolina Medina Padilla

Código: 00124888

Cédula de Identidad: 1723900427

Lugar y fecha: Quito, 13 de mayo de 2019

RESUMEN

El trabajo de titulación “Criterios de estandarización de emulsiones asfálticas para el reciclado en frío de pavimentos, con aplicaciones en el Distrito Metropolitano de Quito” se presenta como una guía de criterios para la fabricación de bases asfálticas utilizando material residual producto del proceso de fresado de capas de rodadura asfálticas disponibles en el Distrito Metropolitano de Quito.

Esta investigación imparte una caracterización de las emulsiones asfálticas de tipo curado lento, así como también una caracterización del material residual proveniente de las capas de rodadura de pavimentos asfáltico que posee la Empresa Pública Municipal de Movilidad y Obras Públicas (EPMMOP), tomando en cuenta la disponibilidad en el mercado en el Distrito Metropolitano de Quito. Se debe entender que el material reciclado de las capas de rodadura que posee la EPMMOP es una combinación de un sin número de capas de rodadura de vías, que por lo tanto tienen una gran variedad de diseños, tipos de agregado mineral y diferentes porcentajes de contenido de ligante que se debe tener en cuenta para el diseño de la base asfálticas.

Además, se denotan los ensayos correspondientes para la caracterización de los diferentes componentes, los cuales están basados en las normas vigentes del Ecuador, con el fin de establecer una estandarización de estos y así un diseño de mezcla óptimo de aplicación. En cada sección se muestran los resultados de la caracterización de los componentes de mezcla con sus respectivas normas usadas y el diseño de mezcla formulado mediante el Método Marshall. Por último, se presenta un análisis de resultados y se establecen conclusiones y recomendaciones para el máximo provecho de la investigación.

Palabras clave: emulsión asfáltica, reciclado, criterios, base asfáltica, Distrito Metropolitano de Quito, EPMMOP.

ABSTRACT

In the present study "Criteria for standardization of asphalt emulsions for the recycling in cold of pavements, with applications in the Distrito Metropolitano de Quito" is presented as a guide of criteria for asphalt emulsions for the production of stabilized bases using residual material product of the milling process of asphalt rolling layers available in the Distrito Metropolitano de Quito (DMQ).

This research imparts a characterization of slow-curing asphalt emulsions, as well as a characterization of the residual material coming from the asphalt pavement layers that the Empresa Pública Municipal de Movilidad y Obras Públicas (EPMMOP) has, considering the availability in the market in the DMQ. The recycled material of the treads that the EPMMOP has is a combination of several road treads, which therefore have a great variety of designs, types of mineral aggregate and different percentages of content of binder that must be considered for the design of the stabilized base.

In addition, the corresponding tests for the characterization of the different components are denoted, which are based on the current regulations of Ecuador, in order to establish a standardization of these and thus an optimum mix design of application. In each section, the results of the characterization of the mixture components with their respective standards used and the mix design formulated by the Marshall Method are shown. Finally, an analysis of results is presented, and conclusions and recommendations are established for the maximum benefit of the research.

Keywords: asphalt emulsion, recycling, criteria, stabilized base, Distrito Metropolitano de Quito, EPMMOP.

TABLA DE CONTENIDO

1.	Introducción	15
1.1	Antecedentes.....	15
1.2	Área de influencia.....	16
1.3	Objetivos.....	18
1.3.1	Objetivo general.....	18
1.3.2	Objetivos Específicos.....	18
1.4	Limitaciones	19
1.5	Justificación.....	19
1.6	Ubicación de la investigación, equipos y materiales	21
2.	Marco teórico	22
2.1	Emulsiones asfálticas.....	22
2.1.1	Historia emulsiones asfálticas.....	22
2.1.2	Definición.....	22
2.1.3	Componentes de las emulsiones asfálticas.....	23
2.1.4	Clasificación emulsiones asfálticas.....	24
2.1.5	Nomenclatura emulsiones asfálticas.....	24
2.1.6	Factores que afectan a la calidad y desempeño de las emulsiones asfálticas.....	25
2.1.7	Proceso de rotura y curado.....	26
2.1.8	Emulsión para reciclado en frío.....	26
2.2	Reciclado de pavimentos asfálticos (RAP).....	27
2.2.1	Tipos de reciclado.....	27
2.2.2	Proceso reciclado en frío.....	29
2.2.3	Ventajas del reciclado en frío.....	29
2.3	Normatividad.....	30
2.3.1	Normatividad para emulsiones asfálticas.....	30
2.3.2	Normatividad para material granular reciclado.....	31
3.	Desarrollo del tema	32
3.1	Caracterización emulsiones asfálticas, agua y aditivos	32
3.1.1	Proceso de fabricación emulsiones asfálticas.....	32
3.1.2	Dosificación emulsiones asfálticas.....	35
3.1.3	Ensayo de Viscosidad Saybolt Furol a 25 °C – INEN 1981.....	36
3.1.4	Ensayo de determinación de la estabilidad al almacenamiento de emulsiones asfálticas – INEN 909.....	39
3.1.5	Ensayo de identificación de la emulsión según la polaridad de las partículas – INEN 908.....	44
3.1.6	Ensayo mezclado con cemento – INEN 904.....	46
3.1.7	Ensayo de tamizado. Determinación de partículas de gran tamaño – INEN 906.....	50
3.1.8	Ensayo determinación del residuo por evaporación – INEN 905.....	53
3.1.9	Ensayo Asentamiento (5 días) – INEN 910.....	57
3.1.10	Ensayo de determinación de la penetración (residuo emulsión asfáltica) – INEN 917.....	60
3.1.11	Ensayo de determinación de ductilidad – INEN 916.....	65
3.1.12	Ensayo de determinación del punto de reblandecimiento del residuo de emulsiones asfálticas – INEN 920.....	69
3.1.13	Resumen resultados ensayos de caracterización emulsiones asfálticas.....	72
3.2	El agua.....	73
3.2.1	Agua potable del Distrito Metropolitano de Quito.....	73
3.3	Aditivos	75
3.4	Caracterización del material granular recuperado por fresado para reciclado de pavimentos asfálticos	76

3.4.1	Muestra de triturado.....	76
3.4.2	Especificaciones técnicas material granular.....	78
3.4.3	Ensayo de determinación de granulometría para el material granular recuperado, granulometría por tamizado - INEN 696.....	79
3.4.4	Ensayo equivalente de arena ASTM D-2419.....	84
3.4.5	Ensayo para determinar la densidad aparente (peso unitario) e índice de huecos. – ASTM C29-.....	88
3.4.6	Ensayo determinación gravedad específica y absorción del material granular grueso – ASTM C 127.....	92
3.4.7	Ensayo determinación gravedad específica y absorción del material granular fino – ASTM C 127.....	94
3.4.8	Determinación del porcentaje de vacíos de material granular – ASTM C29.....	99
3.4.9	Ensayo Proctor modificado - ASTM 180.....	100
3.4.10	Ensayo determinación del límite plástico – INEN 692.....	105
3.4.11	Extracción cuantitativa de asfalto residual – ASTM D 2172-05.....	107
3.4.12	Resumen resultados caracterización del material granular reciclado.....	112
3.5	Diseño de mezcla.....	113
3.5.1	Determinación del porcentaje teórico de emulsión para fresado.....	113
3.5.2	Determinación de la cantidad de agua para la mezcla.....	118
3.5.3	Determinación del contenido óptimo de emulsión asfáltica (Método Marshall) – ASTM 1559.....	120
3.6	Diseño de mezcla definitivo para 100% material reciclado.....	130
3.6.1	Comparación diseño definitivo entre emulsiones.....	130
3.7	Diseño de mezcla para 80% material reciclado.....	133
3.8	Resultados criterios de estandarización de emulsiones asfálticas para reciclado.....	136
3.9	Aplicaciones diseño de mezcla.....	137
3.9.1	Ejemplo de aplicación.....	137
3.9.2	Comparación de soluciones para ejemplo de aplicación.....	148
3.10	Análisis de costos.....	149
3.10.1	Comparación de costos ejemplo de aplicación.....	150
4.	Conclusiones y recomendaciones.....	151
5.	Referencias bibliográficas.....	154
6.	APÉNDICE A: ENSAYOS ASFALTO AC-20 PETROECUADOR.....	157
7.	APÉNDICE B: ANÁLISIS PRECIOS UNITARIOS.....	158
7.1	Restauración carpeta asfáltica en caliente, e=15cm.....	158
7.2	Reciclado en frío de carpeta asfáltica para fabricación de base asfáltica y Slurry Seal. ...	160

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Especificaciones desarrolladas por ASTM y AASHTO	25
Tabla 2. Normatividad para ensayos de emulsión asfáltica CSS-1h	31
Tabla 3. Normatividad para ensayos de fresado	31
Tabla 4. Porcentajes de dosificación para emulsiones asfálticas	35
Tabla 5. Dosificación emulsión asfáltica CSS-1h.....	35
Tabla 6. Dosificación emulsión asfáltica CSS-1h modificada.....	35
Tabla 7. Resultados de viscosidad Saybolt Furol a 25°C de emulsiones asfálticas	38
Tabla 8. Resultados de estabilidad de almacenaje de emulsión CSS-1h EMULDEC	42
Tabla 9. Resultados de estabilidad de almacenaje de emulsión CSS-1h modificada EMULDEC	43
Tabla 10. Resultados de estabilidad de almacenaje de emulsión CSS-1h IMPTEK	43
Tabla 11. Resultados de estabilidad de almacenamiento de emulsiones asfálticas	43
Tabla 12. Resultados ensayo polaridad de emulsiones asfálticas	46
Tabla 13. Resultados ensayo mezcla con cemento emulsión CSS-1h EMULDEC.....	48
Tabla 14. Resultados ensayo mezcla con cemento emulsión CSS-1h modificada EMULDEC	49
Tabla 15. Resultados ensayo mezcla con cemento emulsión CSS-1h IMPTEK.....	49
Tabla 16. Resultados ensayo mezcla con cemento de emulsiones asfálticas	49
Tabla 17. Resultados ensayo tamizado emulsión CSS-1h EMULDEC.....	51
Tabla 18. Resultados ensayo tamizado emulsión CSS-1h modificada EMULDEC.....	52
Tabla 19. Resultados ensayo tamizado emulsión CSS-1h IMPTEK	52
Tabla 20. Resultados ensayo tamizado de emulsiones asfálticas	52
Tabla 21. Resultados ensayo porcentaje de residuo emulsión CSS-1h EMULDEC	55
Tabla 22. Resultados ensayo porcentaje de residuo emulsión CSS-1h modificada EMULDEC	56
Tabla 23. Resultados ensayo porcentaje de residuo emulsión CSS-1h IMPTEK.....	56
Tabla 24. Resultados ensayo porcentaje de residuo de emulsiones asfálticas	57
Tabla 25. Resultados de estabilidad de almacenaje de emulsión CSS-1h EMULDEC.....	59
Tabla 26. Resultados de estabilidad de almacenaje de emulsión CSS-1h EMULDEC.....	59
Tabla 27. Resultados de estabilidad de almacenaje de emulsión CSS-1h IMPTEK	60
Tabla 28. Resultados de estabilidad de almacenamiento de emulsiones asfálticas	60
Tabla 29. Resultados ensayo de penetración del residuo emulsión CSS-1h EMULDEC	64
Tabla 30. Resultados ensayo de penetración del residuo emulsión CSS-1h modificada EMULDEC	64

Tabla 31. Resultados ensayo de penetración del residuo emulsión CSS-1h IMPTEK.....	64
Tabla 32. Resultados ensayo de penetración del residuo emulsiones asfálticas.....	64
Tabla 33. Resultados ensayo ductilidad de residuo emulsión CSS-1h EMULDEC.....	68
Tabla 34. Resultados ensayo ductilidad de residuo emulsión CSS-1h modificada EMULDEC	68
Tabla 35. Resultados ensayo ductilidad de residuo emulsión CSS-1h IMPTEK	69
Tabla 36. Resultados ensayo ductilidad de residuo de emulsiones asfálticas.....	69
Tabla 37. Resultados ensayo punto de reblandecimiento de residuo de emulsiones asfálticas	72
Tabla 38. Resultados ensayo punto de reblandecimiento de residuo de emulsiones asfálticas	72
Tabla 39. Resultados parámetros de agua potable del Distrito Metropolitano de Quito	74
Tabla 40. Límites de granulometría para una base de hormigón asfáltico	79
Tabla 41. Ensayos y tolerancias material granular para base con emulsión asfáltica.....	79
Tabla 42. Granulometría fresado calle Los Pinos	81
Tabla 43. Granulometría fresado calle Manuel Larrea	81
Tabla 44. Granulometría fresado calle Bogotá	82
Tabla 45. Granulometría promedio fresado	83
Tabla 46. Resultados ensayo equivalente de arena fresado	88
Tabla 47. Resultados ensayo peso unitario seco suelto fresado.....	91
Tabla 48. Resultados ensayo peso unitario seco compactado fresado.....	91
Tabla 49. Resultados ensayo gravedad específica fresado grueso.....	94
Tabla 50. Resultados ensayo gravedad específica fresado fino	98
Tabla 51. Resultados ensayo porcentaje de vacíos fresado material grueso.....	99
Tabla 52. Resultados ensayo porcentaje de vacíos fresado material fino	99
Tabla 53. Datos ensayo Proctor modificado fresado	103
Tabla 54. Cálculos ensayo Proctor modificado fresado.....	104
Tabla 55. Resultados ensayo Proctor modificado fresado	104
Tabla 56. Resultados ensayo porcentaje asfalto residual en fresado	111
Tabla 57. Resumen de resultados ensayos de caracterización fresado	112
Tabla 58. Resultado cálculo del factor de superficie específica	115
Tabla 59. Porcentajes retenidos por tamiz - Método Duriez	115
Tabla 60. Coeficientes porcentajes retenidos - Método Duriez.....	116
Tabla 61. Porcentajes de residuo de asfalto en emulsiones	117
Tabla 62. Porcentaje de emulsión teórico por tipo de emulsión	117
Tabla 63. Porcentaje de emulsión efectiva por tipo de emulsión	118

Tabla 64. Datos para determinación de cantidad de agua.....	119
Tabla 65. Cantidad de agua efectiva para mezcla con emulsiones asfálticas	119
Tabla 66. Factores de corrección, relaciones para correlacionar estabilidades	127
Tabla 67. Resultados ensayos de estabilidad y flujo.....	128
Tabla 68. Especificaciones diseño de mezcla definitivo	130
Se fabricaron briquetas para realizar una comparación con el diseño definitivo planteado y se obtuvieron los siguientes resultados.	130
Tabla 69. Resultados ensayo Marshall para diferentes tipos de emulsión.....	131
Tabla 70. Comprobación ensayo Marshall para diferentes tipos de emulsión	132
Tabla 71. Resultados ensayo Marshall granulometría original y granulometría corregida ...	135
Tabla 72. Resumen criterios recomendados para emulsiones asfálticas usadas en reciclado en frío de pavimentos.....	136
Tabla 73. Resumen criterios recomendados para material recuperado para el uso en reciclado en frío de pavimentos.....	137
Tabla 74. Resumen información ejemplo aplicación.....	139
Tabla 75. Coeficientes de drenaje	145
Tabla 76. Resultado primera opción ejemplo aplicación.....	145
Tabla 77. Resultado segunda opción ejemplo aplicación	147
Tabla 78. Comparación resultados ejemplo de aplicación.....	148
Tabla 79. Resumen costos aproximados rubros reciclado para base asfáltica.....	149
Tabla 80. Presupuesto por km de vía con restauración de carpeta asfáltica en caliente.....	150
Tabla 81. Presupuesto por km de vía con reciclado en frío de carpeta asfáltica	150

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa del Distrito Metropolitano de Quito.	17
Figura 2. Consumo energético para mezclas asfálticas por rango de temperatura de fabricación.....	20
Figura 3. Emisiones de CO ₂ para mezclas asfálticas por rango de temperatura de fabricación.	20
Figura 4. Tratamientos de reciclado en frío.	29
Figura 5. Calentamiento solución jabonosa.	33
Figura 6. Medición pH de la solución jabonosa.	33
Figura 7. Colocación asfalto y emulsión asfáltica en molino coloidal.	34
Figura 8. Emulsión asfáltica resultante del molino coloidal.	34
Figura 9. Emulsión asfáltica vertida en el viscosímetro – Ensayo Viscosidad Furol a 25°C ..	37
Figura 10. Temperatura constante emulsión asfáltica - Ensayo Viscosidad Furol a 25°C	37
Figura 11. Emulsión asfáltica en copa receptora - Ensayo Viscosidad Furol a 25°C	38
Figura 12. Emulsión asfáltica en reposo por 24 horas – Ensayo estabilidad de almacenamiento	40
Figura 13. Exclusión emulsión asfáltica de la superficie – Ensayo estabilidad de almacenamiento	40
Figura 14. Enfriamiento residuo emulsión asfáltica – Ensayo estabilidad de almacenamiento	41
Figura 15. Colocación electrodos en emulsión asfáltica – Ensayo identificación emulsión asfáltica por polaridad.....	45
Figura 16. Adecuación de corriente en el potenciómetro– Ensayo identificación emulsión asfáltica por polaridad.....	45
Figura 17. Pesaje recipientes con varilla– Ensayo de residuo por evaporación	53
Figura 18. Calentamiento recipiente con emulsión asfáltica– Ensayo de residuo por evaporación	54
Figura 19. Residuo de emulsión asfáltica– Ensayo de residuo por evaporación.....	54
Figura 20. Residuo de emulsión asfáltica enfriándose en recipiente – Ensayo de penetración del residuo de emulsión asfáltica	61
Figura 21. Residuo de emulsión asfáltica en baño de agua – Ensayo de penetración del residuo de emulsión asfáltica	62
Figura 22. Preparación equipo de penetración para ensayo – Ensayo de penetración del residuo de emulsión asfáltica	63
Figura 23. Colocación aguja en la muestra – Ensayo de penetración del residuo de emulsión asfáltica	63
Figura 24. Colocación residuo en molde – Ensayo de ductilidad del residuo de emulsión asfáltica	66

Figura 25. Baño en agua del residuo en molde – Ensayo de ductilidad del residuo de emulsión asfáltica	66
Figura 26. Residuo en molde enrasado – Ensayo de ductilidad del residuo de emulsión asfáltica	67
Figura 27. Proceso del ensayo – Ensayo de ductilidad del residuo de emulsión asfáltica	67
Figura 28. Resultados del ensayo – Ensayo de ductilidad del residuo de emulsión asfáltica..	68
Figura 29. Colocación residuo emulsión asfáltica en anillos – Ensayo de ductilidad del residuo de emulsión asfáltica	70
Figura 30. Enrasado de residuo en anillos – Ensayo de ductilidad del residuo de emulsión asfáltica	71
Figura 31. Resultados ensayo – Ensayo de ductilidad del residuo de emulsión asfáltica	71
Figura 32. Primer lugar de obtención fresado, primera entrega	76
Figura 33. Segundo lugar de obtención fresado, primera entrega	77
Figura 34. Tercer lugar de obtención fresado, primera entrega	77
Figura 35. Ubicación planta de asfalto EPMMOP.....	78
Figura 36. Proceso de tamizado – Ensayo granulometría por tamizado.....	80
Figura 37. Curva granulométrica fresado calle Los Pinos	81
Figura 38. Curva granulométrica fresado calle Manuel Larrea	82
Figura 39. Curva granulométrica fresado calle Bogotá	82
Figura 40. Curva granulométrica promedio fresado	83
Figura 41. Separación fresado por el tamiz No. 4 – Ensayo equivalente de arena.....	85
Figura 42. Colocación fresado en cilindros graduados– Ensayo equivalente de arena	86
Figura 43. Colocación material en cilindro metálico en 3 capas– Ensayo determinación peso unitario	89
Figura 44. Enrasado en cilindro metálico después de ser compactado – Ensayo determinación peso unitario.....	90
Figura 45. Colocación material fresado suelto en cilindro metálico– Ensayo determinación peso unitario.....	90
Figura 46. Colocación material fresado suelto en cilindro metálico– Ensayo determinación peso unitario.....	95
Figura 47. Forma cónica por levantamiento de cono– Ensayo determinación gravedad específica material fino	96
Figura 48. Picnómetro con material fino y agua– Ensayo determinación gravedad específica material fino	96
Figura 49. Eliminación de aire del picnómetro– Ensayo determinación gravedad específica material fino	97
Figura 50. Mezcla con agua del material granular– Ensayo Proctor modificado.....	101
Figura 51. Apisonamiento de 56 golpes probeta– Ensayo Proctor modificado.....	101

Figura 52. Enrasado de molde – Ensayo Proctor modificado.....	102
Figura 53. Muestra molde compactado – Ensayo Proctor modificado	102
Figura 54. Curva densidad seca con respecto al porcentaje de humedad– Ensayo Proctor modificado	104
Figura 55. Mezcla homogénea con agua– Ensayo límite plástico	106
Figura 56. Resultado rollos de mezcla homogénea– Ensayo límite plástico	106
Figura 57. Colocación de químico en taza del equipo– Ensayo extracción asfalto residual .	108
Figura 58. Pesaje papel filtro– Ensayo extracción asfalto residual	109
Figura 59. Armado de centrifugadora– Ensayo extracción asfalto residual	109
Figura 60. Material granular después de la extracción– Ensayo extracción asfalto residual	110
Figura 61. Pesaje papel filtro después de la extracción– Ensayo extracción asfalto residual	110
Figura 62. Gráfica Método Duriez - Porcentaje de cementos asfálticos vs superficie específica	114
Figura 63. Solución Gráfica Método Duriez.....	116
Figura 64. Mezcla de material fresado con emulsión asfáltica – Ensayo de estabilidad Marshall	122
Figura 65. Armado del conjunto de compactación – Ensayo de estabilidad Marshall	123
Figura 66. Compactación de las probetas – Ensayo de estabilidad Marshall	124
Figura 67. Resultado de compactación en briquetas – Ensayo de estabilidad Marshall.....	124
Figura 68. Enfriamiento de probetas – Ensayo de estabilidad Marshall.....	125
Figura 69. Baño de agua de probetas – Ensayo de estabilidad Marshall.....	126
Figura 70. Colocación probeta en equipo Marshall– Ensayo de estabilidad Marshall.....	126
Figura 71. Relación porcentaje de emulsión y densidad bulk	129
Figura 72. Relación porcentaje de emulsión y estabilidad	129
Figura 73. Relación porcentaje de emulsión y flujo	129
Figura 74. Resultados de estabilidad y flujo para cada emulsión	131
Figura 75. Resultados de la comprobación de estabilidad y flujo para cada emulsión	133
Figura 76. Granulometría sin corrección con 100% material reciclado (original)	134
Figura 77. Granulometría corregida 80% material reciclado, 20% material nuevo	134
Figura 78. Comparación resultados de estabilidad y flujo granulometría original y corregida	135
Figura 79. Estructura del pavimento original – ejemplo de aplicación	139
Figura 80. Configuración estructural para espesores de capa original – ejemplo de aplicación	141
Figura 81. Gráfico para estimar el coeficiente estructural para hormigón asfáltico denso en función del módulo elástico.	142
Figura 82. Variación del coeficiente estructural para capa de base granular.....	143

Figura 83. Variación del coeficiente estructural para capa de sub-base granular.....	144
Figura 84. Solución estructura del pavimento primera opción – ejemplo de aplicación	146
Figura 85. Solución estructura del pavimento segunda opción – ejemplo de aplicación	148

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Las carreteras en el Ecuador son uno de los activos públicos más importantes conocidos en el país debido a que garantizan el desarrollo local y la calidad de vida de sus habitantes por medio de la construcción, rehabilitación y mantenimiento de sus redes viales. Actualmente la red vial del Ecuador tiene 10.132,74 km de longitud sin tomar en consideración las vías urbanas. Solo en el Distrito Metropolitano de Quito cuenta aproximadamente con más de 11 mil vías públicas. En el 2018, de acuerdo con la rendición de cuentas publicada, el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO), tuvo un gasto total de \$40.040 millones donde \$10.925 millones fueron utilizados para mantenimiento vial y \$13.708 millones para infraestructura vial, esto representa aproximadamente el 61% del gasto total que estuvo destinado para el desarrollo vial del Ecuador, lo que muestra una gran demanda de materiales asfálticos, como áridos y ligantes, que simultáneamente incrementan consumo energético y contaminación ambiental.

En el Distrito Metropolitano de Quito en el 2017 la Empresa Pública Metropolitana de Movilidad y Obras Públicas (EPMOP), de acuerdo con el informe de rendición de cuentas, ha intervenido en la rehabilitación y mantenimiento de la capa de rodadura de 3.015 kilómetros de vía en total desde el 2014 en toda la ciudad, utilizando principalmente técnicas de bacheo con mezcla asfáltica en frío, bacheo con mezcla asfáltica en caliente, repavimentación y reposiciones de carpeta asfáltica. Sin embargo, según esta entidad el 80% de las vías del DMQ actualmente necesitan una rehabilitación integral debido a la falta de mantenimientos que debieron haberse realizado en años anteriores.

Los residuos provenientes de la rehabilitación y mantenimiento de las vías en el Distrito Metropolitano de Quito tienen como destino la planta de asfalto de la EPMOP donde una

parte es retenida para futuro uso y la parte considerada como inservible se destina a los rellenos o escombreros de la ciudad. La planta de la EPMMOP recibe fresado en un promedio de 200 metros cúbicos al día, este se almacena y es usada en rehabilitación de vías rurales como una base asfáltica o relleno, utilizando solamente el método de reciclado en caliente (D. Orozco, comunicación persona, 26 de marzo de 2019).

La preservación de las vías se ha convertido en una prioridad debido a los recursos económicos que representan para el presupuesto del cantón, por ello se busca reducir con la aplicación de alternativas de calidad que generen menos gasto público como lo es la alternativa del reciclado en frío con emulsiones asfálticas. Pues un uso correcto de estos residuos podría generar ahorros económicos al distrito siendo simultáneamente amigable con el ambiente.

Por este motivo se realiza la presente investigación, para mediante el uso del material de fresado que se tiene disponible en la EPMMOP, darle nuevos usos viales mediante la utilización de emulsiones asfálticas disponibles en el mercado que cumplen con los criterios de estandarización aquí presentados garantizando calidad del producto de reciclado en frío.

1.2 Área de influencia

La institución encargada del mantenimiento vial en el Distrito Metropolitano de Quito es la Empresa Metropolitana de Movilidad y Obras Públicas (EPMMOP), la cual está encargada de la planificación, ejecución y control de esta actividad de acuerdo con el Código Orgánico de Organización Territorial (COOTAD). El área de influencia directa es la que comprende el Distrito Metropolitano de Quito con 32 parroquias urbanas y 33 parroquias rurales y suburbanas que son las beneficiadas con esta trabajo de titulación.

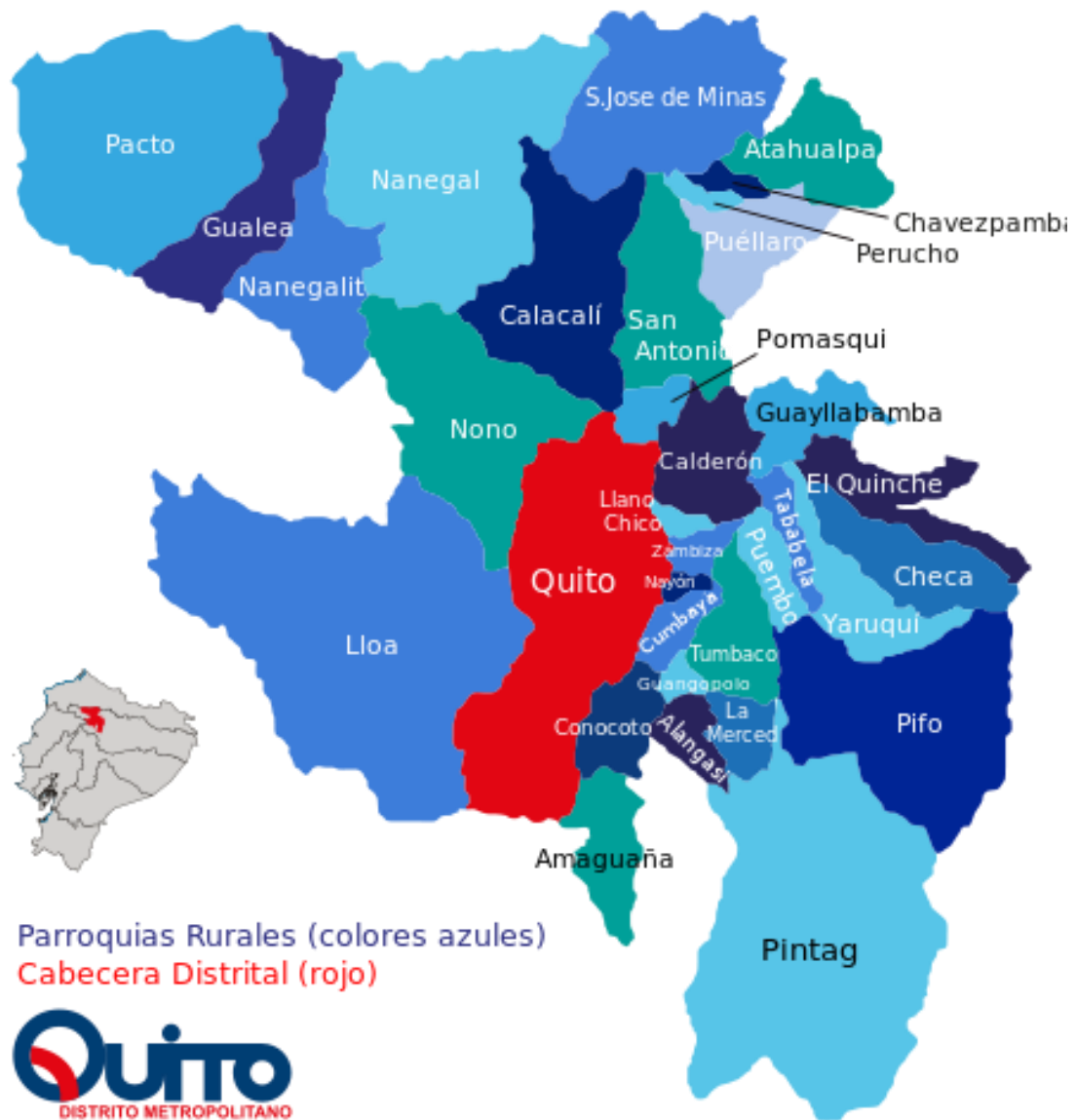


Figura 1. Mapa del Distrito Metropolitano de Quito.
Recuperado de: Ecuador Noticias (2016).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general.

Desarrollar criterios de estandarización de emulsiones asfálticas de tipo curado lento para el uso en reciclado de pavimentos como una alternativa viable para mejorar la gestión de recursos del Distrito Metropolitano de Quito.

1.3.2 Objetivos Específicos.

- Caracterizar los diferentes tipos de emulsiones disponibles en el mercado en el Distrito Metropolitano de Quito.
- Caracterizar el material residual del fresado de pavimento asfáltico proveniente de la Empresa Pública Metropolitana de Movilidad y Obras Públicas (EPMMOP).
- Caracterizar y describir el procedimiento y equipos usados para la caracterización de emulsiones, material residual y diseño de mezclas.
- Comparar los diferentes tipos de emulsión para la obtención de la mezcla óptima.
- Plantear el diseño de mezcla definitivo para el reciclado de pavimentos asfálticos en frío, dados los materiales disponibles en el Distrito Metropolitano de Quito.
- Proveer un análisis de costos del diseño de mezcla para reciclado en comparación a un diseño de mezcla con material granular común para bases mediante un ejemplo de aplicación.

1.4 Limitaciones

El presente trabajo presenta una serie de limitaciones en cuanto a investigación y práctica, las principales se deben a la falta de fuentes nacionales de información actualizadas de la metodología del proceso de reciclado, por lo que se tomaron otras fuentes internacionales. Además, en el mercado la emulsión asfáltica es producida por un número reducido de empresas y ninguna está fabricada específicamente para el uso en reciclado.

1.5 Justificación

La falta de normativas o regulaciones en el Ecuador sobre el uso de emulsión asfáltica en material reciclado proveniente de la capa de rodadura crean la necesidad de plantear regulaciones donde se especifiquen los criterios mínimos que deberían satisfacer o ser contemplados las emulsiones asfálticas disponibles en el DMQ para establecer niveles de calidad altos en su implementación en el reciclado en frío.

Así también, como consecuencia de la estandarización, dar a conocer la calidad del uso de emulsiones asfálticas y su resultado una vez planteados los criterios para hacer más confiable el uso de este ligante. Como resultado, permitir que en Quito se produzca y utilice en grandes volúmenes no solo porque es de fácil manejo y de menor consumo energético (debido a que su colocación a temperaturas bajas) sino porque no es contaminante ni peligroso con el ambiente (Talavera, Castaño y Martínez, 2001).

Las emulsiones al usar bajas temperaturas en su proceso de fabricación su consumo energético es muy bajo en comparación con la obtención de mezclas en caliente, por lo que las emisiones de CO₂, electricidad y agua al estar relacionadas directamente con el consumo energético indican un menor impacto ambiental, lo cual beneficia a la ciudad. Esto se puede apreciar en la Figura 1.2 el consumo energético de acuerdo con la Asociación Europea de

Pavimentos de Asfalto y la Figura 1.3 las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) de acuerdo con la revista Scielo de Chile.

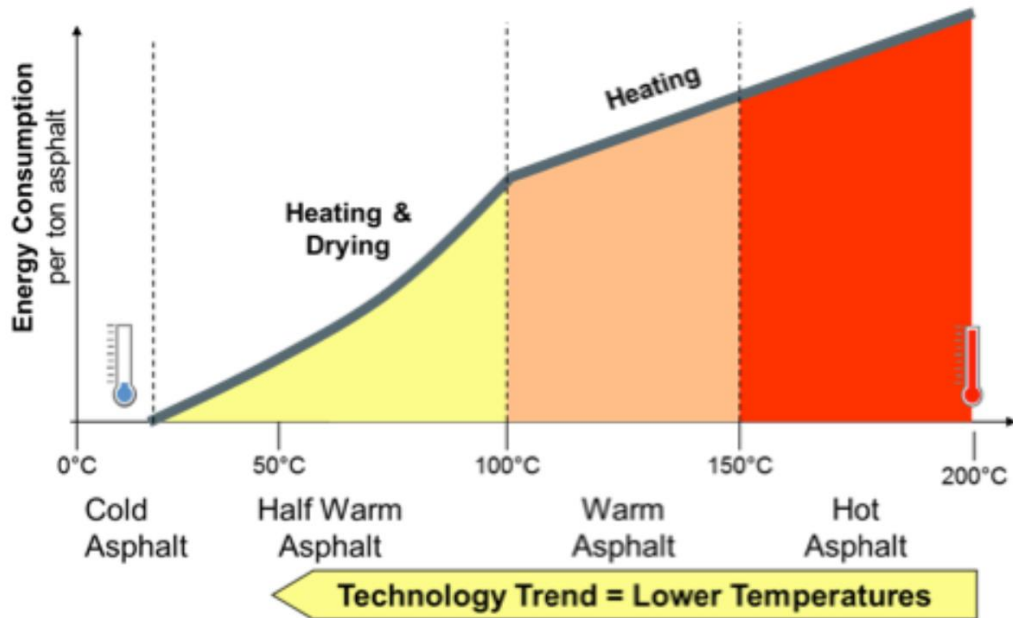


Figura 2. Consumo energético para mezclas asfálticas por rango de temperatura de fabricación. Recuperado de Driving Ahead with Sustainable Asphalt Roads – European Asphalt Pavement Association.

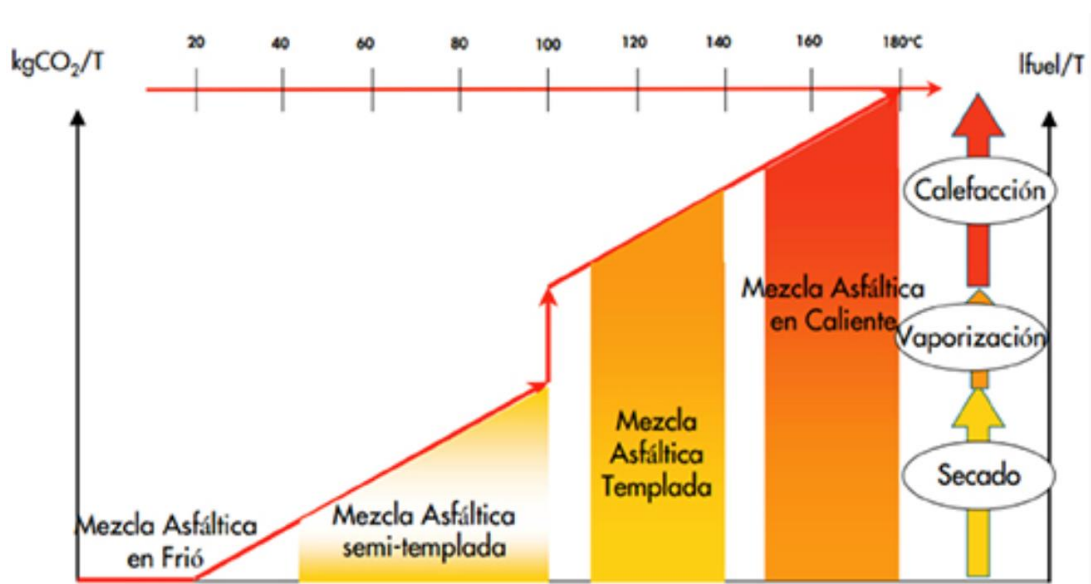


Figura 3. Emisiones de CO₂ para mezclas asfálticas por rango de temperatura de fabricación. Recuperado Revista Scielo (2017).

Además, la importancia de estandarizar las emulsiones asfálticas es que imparten una guía para obtener resultados de calidad, y como consecuencia mejora la gestión de recursos a usarse, ya sean estos naturales o económicos. Disminuir costos y el impacto ambiental en la ciudad además de garantizar calidad utilizando los recursos que se tienen de una manera óptima, es la alternativa que se presenta con la estandarización de emulsiones asfálticas usando material residual del fresado obtenido en las vías del DMQ.

1.6 Ubicación de la investigación, equipos y materiales

El desarrollo de esta investigación contó con la ayuda y colaboración de la empresa EMULDEC, ubicado en la zona industrial de Calacalí, cantón Quito. Esta empresa produce emulsiones asfálticas, asfaltos modificados para juntas y fisuras, y rejuvenecedores de asfalto, entre lo más destacado. Se utilizó el laboratorio de esta empresa y la disposición de sus profesionales y personal de apoyo con conocimiento del tema de este trabajo, también sus equipos y tecnología necesarios para la realización de los diferentes ensayos basados en las normas técnicas ecuatorianas INEN, ASTM y AASHTO.

A su vez, las emulsiones fueron proporcionadas por la empresa EMULDEC antes mencionada y la empresa IMPTEK – Chova del Ecuador, las cuales son las empresas que abastecen mayoritariamente a los proyectos relacionados con el uso de emulsión asfáltica en la EPMMOP, quienes la usan en sus trabajos de rehabilitación de pavimentos. Ambas empresas cuentan con una sola emulsión de tipo curado lento CSS-1h, pero adicionalmente en EMULDEC se fabricó una emulsión asfáltica modificada con agentes rejuvenecedores para esta investigación.

El material granular, material reciclado de carpeta asfáltica, fue proporcionado por la EPMMOP en dos entregas, una parte en obra y otra de la planta directamente.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Emulsiones asfálticas

2.1.1 Historia emulsiones asfálticas.

Se desarrollaron por primera vez las emulsiones asfálticas a comienzos del siglo XX y alrededor de los años veinte es cuando pasó a aplicaciones en vías. Su primera aplicación vial fue en riegos y como palativos de polvo. El principal problema de las emulsiones asfálticas es que debido al desconocimiento sobre su correcta utilización y la disponibilidad de la época provocó un estancamiento en su desarrollo. Sin embargo, actualmente el volumen de producción de emulsiones ha aumentado, pero de una manera lenta con el pasar de los años.

Existen diversos factores que han contribuido al interés de este ligante, entre ellos se encuentra que debido a la crisis energética en los Estados Unidos de los años setenta, como consecuencia del embargo de petróleo en el país se produjo medidas de conservación de energía, dónde las emulsiones eran una solución ya que no consumen energía porque usan bajas temperaturas para su utilización (Asphalt Emulsion Manufacturers Association [AEMA], 1976). También, otro factor importante es la preocupación de contaminación atmosférica, dónde las emulsiones eran una de las soluciones ya que emiten poco o nada de contaminantes por quema de hidrocarburos sustituyendo así o siendo complemento para los asfaltos diluidos.

2.1.2 Definición.

Consiste en la fina dispersión de gotas de asfalto, estabilizadas en una fase acuosa gracias a la presencia de un agente emulsificante (AEMA, 1976). Entonces se puede decir que está compuesta por tres elementos que son asfalto, agua y un agente

emulsificante. Los agentes emulsificantes pueden contener otros aditivos ya sean estos estabilizantes, promotores de adherencia o de control de rotura.

El objetivo es que la dispersión sea lo más estable posible para que pueda ser almacenada durante periodos largos de tiempo y una vez en contacto con el material granular al ser mezclado se produzca la rotura de esta. La rotura de una emulsión asfáltica se refiere a la separación del agua del asfalto debido a la evaporación de este último.

2.1.3 Componentes de las emulsiones asfálticas.

En cuanto a los elementos que conforma la emulsión asfáltica el asfalto es el ingrediente primordial ya que en la mayoría de los casos constituye entre el 50 y 70 por ciento. El asfalto es un aglomerante de color negro o pardo oscuro obtenido por destilación del petróleo (Municipio de Transporte y Obras Públicas, 2019).

El asfalto al ser un material impermeable, adherente, cohesivo y capaz de resistir altos esfuerzos es el que proporciona la unión y cohesión entre agregados, además de su resistencia a las cargas (Delgado, 2011).

El segundo componente es el agua, esta contiene minerales u otras partículas que afectan a la estabilidad y almacenamiento de las emulsiones asfálticas siendo perjudiciales, sin embargo, la presencia de partículas de calcio y magnesio retrasan el rompimiento en los enlaces de tipo catiónico, dando un mejor control en la rotura del enlace.

Por último, los agentes emulsificantes son generalmente agentes químicos y se encargan de mantener el asfalto en suspensión de una manera estable además de controlar el tiempo de rotura. Además, a pesar de que sea el componente de menor cantidad, es quién determina qué tipo de emulsión asfáltica se producirá con relación a su carga eléctrica.

2.1.4 Clasificación emulsiones asfálticas.

2.1.4.1 De acuerdo con la carga eléctrica de la emulsión.

Según la carga eléctrica que rodea a las partículas de asfalto en las emulsiones asfálticas, se pueden clasificar como aniónicas, catiónicas y no iónicas. Las más comunes y producidas con regularidad son las dos primeras y son utilizadas comúnmente en mantenimiento vial y construcción. Por lo general se preparan con una carga eléctrica de signo opuesto a la del material granular.

2.1.4.2 De acuerdo con la velocidad con la que se rompe la emulsión.

Esta segunda clasificación es de acuerdo con la velocidad con la que las partículas de asfalto se unen restaurando el volumen de ligante. La ruptura o desestabilización comienza cuando el material granular entra en contacto con la emulsión y las partículas de asfalto se separan del agua (AEMA, 1976). Se puede clasificar como:

- RS (Rapid-setting) o emulsiones de rotura rápida.
- MS (Medium-setting) o emulsiones de rotura media.
- SS (Slow-setting) o emulsiones de rotura lenta.
- QS (Quick-setting) o emulsiones de rotura controlada.

2.1.5 Nomenclatura emulsiones asfálticas.

De acuerdo con la ASTM (American Society for Testing and Materials) y AASHTO (American Association of State Highway and Transportations Officials), las emulsiones se identifican con una serie de números y letras que caracterizan a las emulsiones de acuerdo con sus propiedades. Primero, la letra “C”, identifica una emulsión catiónica y su ausencia identifica a una emulsión aniónica. Seguido de la clasificación por velocidad de rotura y un número 1 y 2 que establecen su viscosidad,

dónde 2 es más viscoso que 1. La letra ‘h’ implica que la base asfáltica es más consistente y la letra ‘s’ es que es más blanda.

La ASTM y AASHTO han desarrollado especificaciones normalizadas para los siguientes tipos de emulsión:

Tabla 1. *Especificaciones desarrolladas por ASTM y AASHTO*

Emulsión asfáltica aniónica (ASTM D947, AASHTO M140)	Emulsión asfáltica catiónica (ASTM D2397, AASHTO M208)
RS-1 (RR-1)	CRS-1 (RR-1)
RS-2	CRS-2
HFRS-2	-
MS-1 (RM-1)	-
MS-2	CMS-2 (CRM-2)
MS-2h	CMS-2h
HFMS-1	-
HFMS-2	-
HFMS-2h	-
HFMS-2s	-
SS-1 (RL-1)	CSS-1 (RL-1)
SS-1h	CSS-1h

2.1.6 Factores que afectan a la calidad y desempeño de las emulsiones asfálticas.

Existen factores que afectan en la producción, almacenamiento, uso y desempeño de las emulsiones asfálticas, entre las más importantes están:

- Propiedades químicas del asfalto base.
- Dureza y porcentaje del asfalto base.
- Tamaño de las partículas de asfalto en la emulsión.
- Clase y concentración del emulsificante.
- Condiciones en la producción (temperatura, presión).
- Carga iónica de las partículas de la emulsión.
- Orden en que se añaden los elementos en la producción.
- Propiedades del emulsificante.

- Adición de polímeros o modificadores químicos.
- Calidad del agua.

2.1.7 Proceso de rotura y curado.

Una emulsión asfáltica rompe cuando el agua se separa de las partículas de asfalto y se evapora. Por lo general, las emulsiones están formuladas químicamente para que se produzca esta rotura cuando entre en contacto una sustancia extraña como lo es el material granular o superficie de un pavimento. Una emulsión de rotura rápida tendrá la rotura en un periodo corto de tiempo, mientras que una emulsión de rotura lenta implica tiempos considerablemente mayores. Principalmente el tiempo de rotura está ligado a la concentración y tipo del emulsificante, sin embargo, no es lo único que afecta.

En cuanto al curado involucra el desarrollo de propiedades mecánicas del asfalto base. El resultado final es una película que mantiene al material granular unidos de una forma adhesiva. Para que esto suceda, la evaporación del agua debe ser total y las partículas de emulsión deben impregnarse en el agregado. La evaporación del agua depende mucho de la temperatura del ambiente y la absorción del material granular, a mayor temperatura y absorción, el tiempo de curado es menor (AEMA, 1976).

2.1.8 Emulsión para reciclado en frío.

Cabe recalcar que, para el diseño de reciclado en frío de mezclas bituminosas, las emulsiones utilizadas son las de tipo MS, CMS, CSS y CQS (AEMA, 1976), pero por limitaciones de producción en el Distrito Metropolitano de Quito, la CSS-1h es la emulsión para utilizarse para este trabajo de titulación. La CSS-1h es una emulsión catiónica de curado lento. Sus usos principalmente son sellos de niebla, riego de liga,

riego de imprimación, sellos de lechada asfáltica, micro-capas, granulometría densa, reciclado en caliente, reciclado en frío y bacheo.

Esta emulsión tiene características mecánicas que producen una afinidad con gran parte del material granular de la región, además de ser amigable con el ambiente debido a su bajo consumo energético para su producción y aplicación.

2.2 Reciclado de pavimentos asfálticos (RAP)

El reciclado es un proceso dónde existe una reutilización de material del pavimento flexible que ya ha cumplido con su vida útil, el cual mediante un tratamiento se obtiene una nueva capa de pavimento en la misma vía o en otra.

2.2.1 Tipos de reciclado.

Existen clasificaciones el reciclado de pavimentos por la temperatura a la cual se realiza, la profundidad que se toma en cuenta en el proceso, por el lugar dónde se realiza el proceso, entre otras. Sin embargo, para los propósitos de esta investigación, se distinguen dos clases de reciclado de acuerdo con la temperatura a la cual se le realiza (AEMA, 1976).

Cada una de estas técnicas de reciclado tienen ventajas y desventajas y la elección del método dependerá de características ambientales, económicas, sociales y políticas.

2.2.1.1 Reciclado en caliente en planta.

Este proceso consiste en la pulverización, mediante el proceso de fresado de la capa asfáltica de rodadura con un espesor determinado, este material es transportado a la planta y clasificado de acuerdo con su tamaño (granulometría). Una vez clasificado, este material es usado para la fabricación de una nueva mezcla en caliente. Lo importante de este proceso es que la nueva mezcla debe

cumplir con los mismos requisitos de calidad que se exigen a una mezcla asfáltica convencional.

2.2.1.2 Reciclado en caliente en el sitio.

Este proceso consiste en la reutilización del pavimento superficial de la vía, generalmente menores a 4 cm cuando el pavimento no tiene deterioros del tipo estructural. Este es un proceso de rehabilitación leve, ya que elimina los daños superficiales del pavimento.

2.2.1.3 Reciclado en frío en el sitio.

Este proceso consiste en la fracturación de capas asfálticas de rodadura para la fabricación de una nueva mezcla asfáltica con emulsión asfáltica que es mezclado, colocado y curado en el lugar de la obra, a temperatura ambiente. Por lo general este tipo de rehabilitación es usada para bases asfálticas ya que sus propiedades son similares. Para este proceso se trabaja con máquinas recicladoras móviles que hacen todo el proceso de mezcla y colocación.

2.2.1.4 Reciclado en frío en planta.

Este proceso consiste en la reutilización de material granular proveniente del proceso de fresado, se usa para la fabricación de nuevas capas para pavimentos o rehabilitación de este. Al ser fabricado en planta, es posible el control en la corrección de dosificaciones y calidad de los materiales, pero implica un mayor costo debido a rubros de transporte. El reciclado en frío puede realizarse con o sin aporte de áridos extra. El aporte de áridos extra sirve para la corrección de la granulometría del fresado.

2.2.2 Proceso reciclado en frío.

El reciclado en frío depende directamente del tipo de material reciclado y de acuerdo a ello se puede considerar el tipo de tratamiento a utilizarse. RAP se considera a “Recycle Asphalt Pavement” (Pavimento Asfáltico Recuperado), conocido como el material granular proveniente del proceso de fresado.

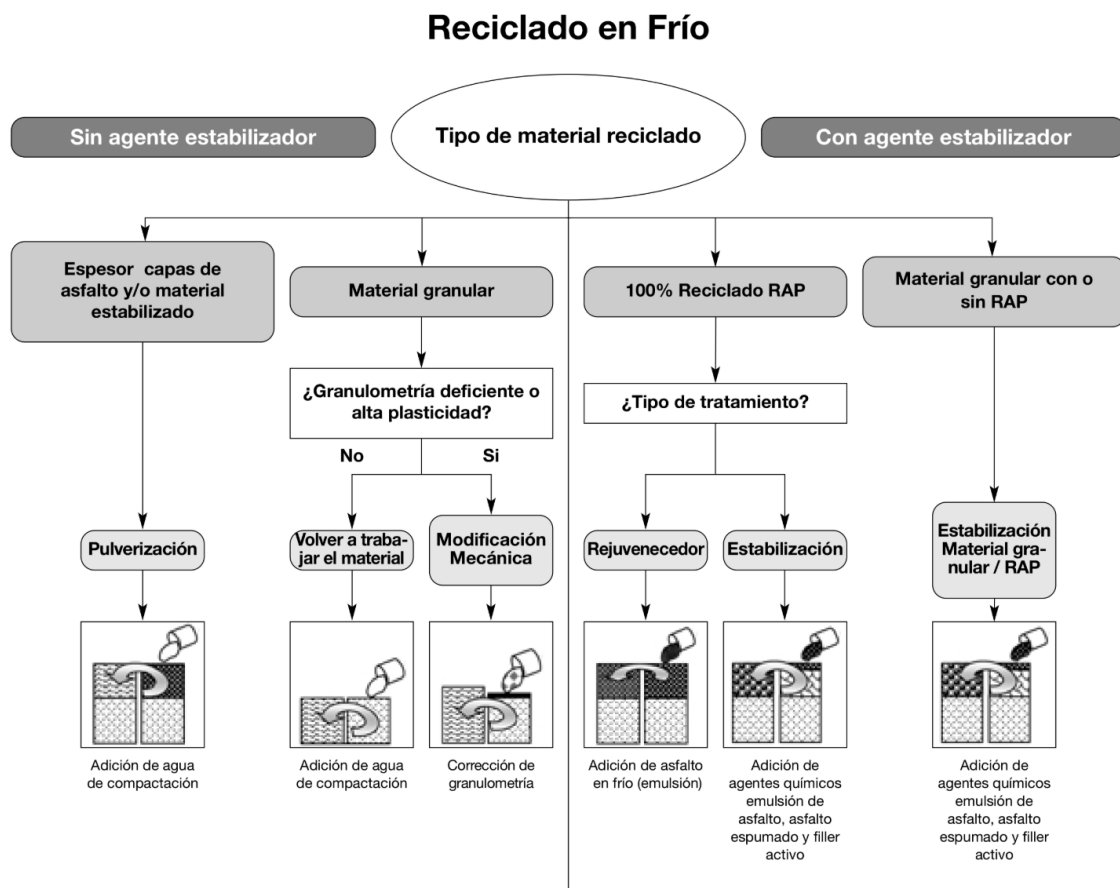


Figura 4. Tratamientos de reciclado en frío.

Recuperado del Manual de Reciclado en frío de Wirtgen Group.

2.2.3 Ventajas del reciclado en frío.

Se presentan a continuación algunas de las ventajas que justifican el uso del reciclado en frío.

- Mejor calidad estructural del pavimento.
- Mejor control de calidad de materiales como emulsión, material granular.

- Minimizar la necesidad de utilizar nuevo material granular.
- Mejor perfil de las capas de pavimento existentes, como es el caso de vías secundarias cuyas condiciones geométricas son malas.
- Ahorro significativo frente a otras técnicas convencionales.
- Menor impacto ambiental debido al menor consumo energético por no usar altas temperaturas ni material granular nuevo, evitando emisiones por transporte y por proceso de fabricación.

2.3 Normatividad

Las normas utilizadas para los ensayos realizados en el trabajo de investigación fueron principalmente las normas INEN, ASTM y AASHTO en ese orden de importancia.

2.3.1 Normatividad para emulsiones asfálticas.

La Tabla 2 muestra las especificaciones actuales para emulsiones asfálticas para el Ecuador. Estas están estipuladas en las Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes MOP-001-F2002 del 2002 y como base de consulta también la Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12, Volumen No. 3, Especificaciones generales para construcción de caminos y puentes del 2012.

Para el caso de emulsiones asfálticas catiónicas, en MOP-001-F2002, se establece que la norma base es la ASTM D 2397. Se presenta a continuación los requisitos estipulados para las emulsiones. Hay que esclarecer que para esta investigación nos interesa los requisitos para la emulsión CSS-1h que es lo que se muestra a continuación.

Tabla 2. *Normatividad para ensayos de emulsión asfáltica CSS-1h*

Ensayos	Norma	Mín.	Máx.
Muestra original			
Viscosidad FUROL 25°C, s	INEN 1981	20	100
Estabilidad almacenaje 24 h, %	INEN 909	-	1
Carga de partícula	INEN 908	POSITIVO	
Mezcla con cemento	INEN 904	-	2
Ensayo de tamizado	INEN 906	-	0.1
Residuo por evaporación, %	INEN 905	57	-
Asentamiento (5 días), %	INEN 910	-	5
Residuo			
Penetración (25°C, 100gr, 5s) mm	INEN 917	40	90
Ductilidad (25°C, 5cm/min), cm	INEN 916	40	-
Punto de ablandamiento, °C	INEN 920	-	-

Nota: Recuperado de MOP-001-F2002 Especificaciones técnicas para la construcción de caminos y puentes.

2.3.2 Normatividad para material granular reciclado.

Para el material granular recuperado por fresado, los ensayos escogidos, considerados como necesarios para la caracterización de este material, fueron en base a distintas publicaciones entre ellas la publicación técnica de la Asociación Mexicana del Asfalto (AMAAC) “Recomendación AMAAC, REA 15/12, Reciclado con emulsiones asfálticas”. Un resumen de los ensayos escogidos es:

Tabla 3. *Normatividad para ensayos de fresado*

Ensayos	Norma	Mín.	Máx.
Fresado			
Índice de plasticidad (TAMIZ NO. 40)	INEN 692	-	4
Equivalente de arena	ASTM D2419	35	-
Graduación	MOP	-	-
Peso específico fresado grueso, gr	ASTM C127	-	-
Peso específico fresado fino, gr	ASTM C128	-	-
Absorción fresado grueso, %	ASTM C127	-	-
Absorción fresado fino, %	ASTM C128	-	-
Peso volumétrico fresado seco suelto, gr/cm ³	ASTM C29	-	-
Peso volumétrico fresado seco compacto, gr/cm ³	ASTM C29	-	-
Densidad máxima (Proctor Modificado), g/cm ³	ASTM D 1557(C)	-	-
Humedad óptima (Proctor Modificado), %	ASTM D 1557(C)	-	-
Residuo			
Contenido de ligante	INEN 905	-	-

3. DESARROLLO DEL TEMA

3.1 Caracterización emulsiones asfálticas, agua y aditivos

Se debe plantear que el asfalto tipo RC-20 usado en las emulsiones es proveniente de la empresa Petroecuador.

Se requiere una emulsión de rotura lenta, que se ajuste a los requisitos que establece la ASTM D2397 para CCS-1h.

Cabe resaltar que, en EMULDEC se fabricaron las emulsiones CSS-1h y CSS-1h modificada en laboratorio y la emulsión de IMPTEK-Chova del Ecuador se obtuvo una muestra, mas no se la fabricó.

3.1.1 Proceso de fabricación emulsiones asfálticas.

También conocido a este proceso como emulsificación, para ello se necesita de un molino coloidal, el cuál es un dispositivo que posee un rotor que trabaja con un mecanismo de alta velocidad de corte provocando la división de las partículas de asfalto con tamaños entre 0.25mm y 0.5mm a fragmentos de 0.001mm y 0.01mm. Para la preparación de emulsiones catiónicas, que son base de nuestro trabajo, por lo general son grasas aminas que se convierten en emulsificantes al reaccionar con ácidos, como lo es el ácido clorhídrico.

El molino coloidal debe lavarse para enjuagar y eliminar residuos anteriores, por lo que es importante preparar una mayor cantidad de fase jabonosa. La dosificación se realizó mediante el pesaje de cada adición a una relación masa/masa. Por otra parte, el asfalto debe calentarse a una temperatura entre 110°C y 140°C y la fase jabonosa estar a una temperatura de 40°C, para que una vez que se adicionen la mezcla llegue a una temperatura entre 85°C y 95°C (Ulloa, 2012).

Se cierra la válvula de salida y se vierte la solución jabonosa en el molino y se adiciona de manera lenta el asfalto, esto debe ser de manera continua y menor a un diámetro de 6mm (Ulloa, 2012). El objetivo principal al producir una emulsión es obtener gotas de asfalto muy pequeñas que puedan mantenerse en suspensión acuosa y así poder tener control el tiempo de rotura.

Las emulsiones asfálticas dependiendo del tipo, existen rangos de dosificación de emulsiones asfálticas como se muestra a continuación.

En nuestro trabajo nos interesa las emulsiones tipo CSS ya que están son las que se encuentran disponibles en el mercado y es usado para el reciclado en frío.



Figura 5. Calentamiento solución jabonosa.

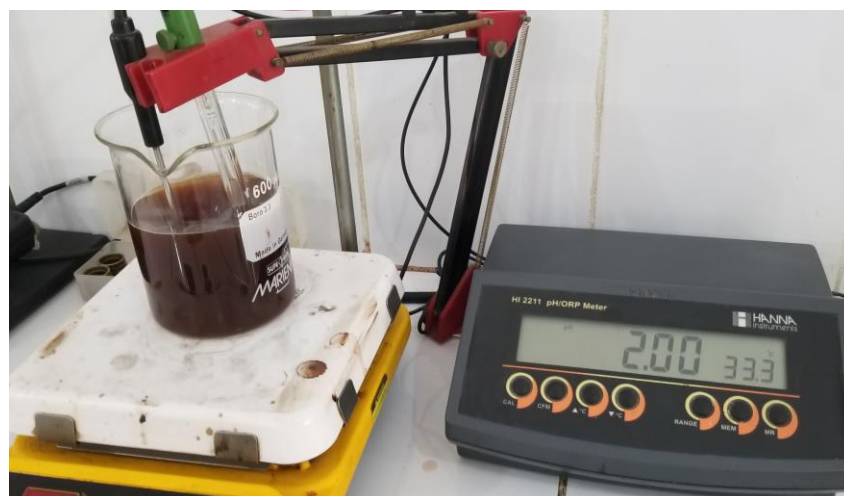


Figura 6. Medición pH de la solución jabonosa.



Figura 7. Colocación asfalto y emulsión asfáltica en molino coloidal.



Figura 8. Emulsión asfáltica resultante del molino coloidal.

Tabla 4. Porcentajes de dosificación para emulsiones asfálticas

Ingrediente	Rangos de dosificación (%)			
	CRS	CMS	CSS	CQS
Asfalto	65	60	60 - 65	60 - 65
Emulsificante	0.1 - 0.25	0.4 - 0.6	1.5 - 2.5	0.8 - 1.8
Polímero (Aditivo) (sobre el peso del asfalto)	-	-	3	3
Agua	Hasta completar el 100% = $100 - \sum / \% \text{ Asfalto} + \% \text{ Emulsificante} + \% \text{ Polímero}$			
Ácido (HCl ó H_3PO_4)	2 - 4	2 - 3	1.5 - 2.5	1.5 - 2.5
Fase jabonosa (Agua, Emulsificante y ácido)	100 - % Asfalto			

Nota: Recuperado del "A Basic Asphalt Emulsion Manual" del Instituto del asfalto (IA)

Las emulsiones asfálticas obtenidas en EMULDEC e IMPTEK, son del tipo CSS, y concuerdan con los porcentajes antes mencionados.

3.1.2 Dosificación emulsiones asfálticas.

Tabla 5. Dosificación emulsión asfáltica CSS-1h

Componentes	%	Masa (gramos)
AC-20	62.00	600
Promotor de adherencia	0.03	0.29
Emulsificante	1.10	10.65
Ácido clorhídrico	0.155	1.50
Agua	36.72	355.35
<i>Total</i>	<i>100.00</i>	<i>967.74</i>

Tabla 6. Dosificación emulsión asfáltica CSS-1h modificada

Componentes	%	Masa (gramos)
AC-20 aditivado	62.00	600
Promotor de adherencia	-	0.29
Emulsificante	1.10	10.65
Ácido clorhídrico	0.16	1.45
Agua	36.75	355.35
<i>Total</i>	<i>100.00</i>	<i>967.74</i>

Se debe tomar en cuenta que el porcentaje de ácido clorhídrico varía hasta que el pH de solución jabonosa sea de 2.00.

La emulsión asfáltica consiste en el uso de asfalto RC-20 modificado que incluye ya promotor de adherencia y un agente rejuvenecedor en el asfalto, por ello ya no se lo utiliza en la dosificación de la emulsión el promotor de adherencia. Ver Anexo A para las dosificaciones del asfalto aditivado producido en EMULDEC.

3.1.3 Ensayo de Viscosidad Saybolt Furol a 25 °C – INEN 1981.

Este ensayo caracteriza a los productos derivados del petróleo para establecer uniformidad en el transporte y fuentes de suministro. Se mide el tiempo, en segundos, en el que tarda en fluir un volumen de 60ml de muestra por un orificio calibrado.

3.1.3.1 Equipo

- Viscosímetro Saybolt y baño.
- Tubo de extracción.
- Soporte termómetro.
- Termómetro ASTM de Viscosidad Saybolt o termómetro con precisión equivalente a los de Viscosidad Saybolt.
- Embudo de filtración.
- Copa receptora.
- Cronómetro.

3.1.3.2 Procedimiento

- De acuerdo con la temperatura que se va a realizar el ensayo, se debe llevar a un rango de temperatura específica del baño del viscosímetro.
- Inserte un tapón de corcho ajustadamente en la cámara aire en el fondo del viscosímetro para evitar que se escape el aire.

- Agite bien la muestra y cole a través de un tamiz de 150 μm (N°100) la muestra, mediante el uso de un embudo y aplicado directamente dentro del viscosímetro, llene con la muestra hasta que llegue al anillo de desborde.



Figura 9. Emulsión asfáltica vertida en el viscosímetro – Ensayo Viscosidad Furol a 25°C

- Agite la muestra nuevamente con movimientos circulares de 30 a 50 rpm durante 1 minuto usando un termómetro y leer el mismo cuando la temperatura se mantenga constante a 25°C y difiera en no más de 0.03°C.



Figura 10. Temperatura constante emulsión asfáltica - Ensayo Viscosidad Furol a 25°C

- Coloque el extremo del tubo de extracción en la cámara de aire del viscosímetro y aplique succión para quitar una parte de la muestra hasta que se encuentre por debajo del anillo de desborde.
- Coloque la copa receptora en el sitio adecuado, retire el corcho del viscosímetro al mismo tiempo en el que se comienza a tomar el tiempo.
- Detener el tiempo cuando la muestra haya alcanzado la marca del cuello de la copa receptora.



Figura 11. Emulsión asfáltica en copa receptora - Ensayo Viscosidad Furol a 25°C

- Reporte el tiempo con una precisión de 0.1 segundos.

3.1.3.3 Resultados.

Tabla 7. Resultados de viscosidad Saybolt Furol a 25°C de emulsiones asfálticas

Muestra	Temperatura (°C)	Tiempo (s)
CSS-1h EMULDEC	25	14.0
CSS-1h modificada EMULDEC	25	16.0
CSS-1h IMPTEK	25	38.0

3.1.4 Ensayo de determinación de la estabilidad al almacenamiento de emulsiones asfálticas – INEN 909.

Este ensayo proporciona una evaluación de la capacidad de una emulsión asfáltica a mantenerse como una dispersión uniforme durante su periodo de almacenamiento a través de una medida del grado de dispersión de la función con respecto al tiempo.

Permite obtener la diferencia en porcentaje de residuo que se obtiene por la comparación entre la cantidad de residuo en la superficie y fondo de la muestra.

3.1.4.1 Equipo.

- Cilindro de vidrio o plástico de 500 ml, con tapón de caucho y con diámetro de 50 mm.
- Pipeta de 50 ml.
- Balanza, capacidad de 1000 gr y precisión de ± 0.1 gr.
- Dos vasos de vidrio o metal de 100 ml.
- Varillas de agitación.
- Horno o estufa.

3.1.4.2 Procedimiento.

- Antes de empezar el ensayo, agite la emulsión hasta llegar a su homogeneidad considerando su temperatura de acuerdo con su ensayo de viscosidad.
- Coloque una muestra de 500 ml a temperatura ambiente de emulsión asfáltica en un cilindro de vidrio, tape y deje en reposo por 24 horas.



Figura 12. Emulsión asfáltica en reposo por 24 horas – Ensayo estabilidad de almacenamiento

- Retirar 55 ml desde la superficie del cilindro por medio de pipetas o de sifonado, sin alterar la muestra. Una vez retirada la porción agite nuevamente.



Figura 13. Exclusión emulsión asfáltica de la superficie – Ensayo estabilidad de almacenamiento

- Pese 50.0 ± 0.1 gr en un vaso de 1000 ml, previamente pesado con su varilla de agitación.
- Excluya alrededor de 390 ml de la muestra superficial del cilindro de vidrio, agite el restante de la muestra y pese 50.0 ± 0.1 gr en otro vaso de vidrio también pesado previamente con su respectiva varilla de agitación.
- Coloque los vasos de vidrio en un horno por 2 horas a una temperatura de $163^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$.
- Retire los vasos del horno, agite el residuo e ingrese nuevamente al horno por una hora más.
- Deje enfriar a temperatura ambiente y pese los vasos con sus respectivas varillas de agitación y sus residuos por separado.



Figura 14. Enfriamiento residuo emulsión asfáltica – Ensayo estabilidad de almacenamiento

3.1.4.3 Cálculos.

El porcentaje de residuo se calculó con la siguiente fórmula

$$\%=(A-B) /C*100$$

dónde,

A: peso vaso, varilla y residuo (gr)

B: peso vaso y varilla (gr)

C: peso muestra (gr)

La estabilidad al almacenamiento se calcula con la siguiente fórmula:

$$\text{Estabilida al almacenamiento, \% (24h)} = B - A$$

dónde,

A: porcentaje de residuo de la muestra que se toma de la superficie

B: porcentaje de residuo de la muestra que se toma del fondo

3.1.4.4 Resultados.

3.1.4.4.1 CSS-1h EMULDEC

Tabla 8. Resultados de estabilidad de almacenaje de emulsión CSS-1h EMULDEC

Residuo muestra de la parte superior	
Peso vaso y varilla (gr)	96.49
Peso muestra antes de calentar (gr)	57.55
Peso vaso, varilla y muestra después de calentar (gr)	129.81
Residuo muestra de la parte del fondo	
Peso vaso y varilla (gr)	111.49
Peso vaso, varilla y muestra antes de calentar (gr)	51.85
Peso vaso, varilla y muestra después de calentar (gr)	141.5
% Residuo Superior	57.90
% Residuo Inferior	57.88
<i>Estabilidad al almacenamiento (%)</i>	<i>0.02</i>

3.1.4.4.2 CSS-1h modificada EMULDEC

Tabla 9. Resultados de estabilidad de almacenaje de emulsión CSS-1h modificada EMULDEC

Residuo muestra de la parte superior	
Peso vaso y varilla (gr)	91.11
Peso emulsión antes de calentar (gr)	55.83
Peso vaso, varilla y muestra después de calentar (gr)	123.2
Residuo muestra de la parte del fondo	
Peso vaso y varilla (gr)	88.3
Peso emulsión antes de calentar (gr)	58.05
Peso vaso, varilla y muestra después de calentar (gr)	121.68
% Residuo Superior	57.48
% Residuo Inferior	57.50
<i>Estabilidad al almacenamiento (%)</i>	<i>0.02</i>

3.1.4.4.3 CSS-1h IMPTEK

Tabla 10. Resultados de estabilidad de almacenaje de emulsión CSS-1h IMPTEK

Residuo muestra de la parte superior	
Peso vaso y varilla (gr)	95.85
Peso emulsión antes de calentar (gr)	56.05
Peso vaso, varilla y muestra después de calentar (gr)	127.98
Residuo muestra de la parte del fondo	
Peso vaso y varilla (gr)	91.72
Peso emulsión antes de calentar (gr)	59.95
Peso vaso, varilla y muestra después de calentar (gr)	126.13
% Residuo Superior	57.32
% Residuo Inferior	57.40
<i>Estabilidad al almacenamiento (%)</i>	<i>0.07</i>

3.1.4.5 Resumen.

Tabla 11. Resultados de estabilidad de almacenamiento de emulsiones asfálticas

Muestra	Temperatura (°C)	Estabilidad de almacenaje (%)
CSS-1h EMULDEC	25	0.02
CSS-1h modificada EMULDEC	25	0.02
CSS-1h IMPTEK	25	0.07

3.1.5 Ensayo de identificación de la emulsión según la polaridad de las partículas – INEN 908.

Este ensayo nos permite identificar la polaridad de las partículas que conforman una emulsión asfáltica de tipo catiónica. Las emulsiones catiónicas, las estudiadas en este trabajo, se caracterizan por la migración de las partículas a un electrodo cargado negativamente cuando se somete a una corriente directa.

El ensayo consiste en pasar una corriente continua a través de la emulsión asfáltica entre dos electrodos paralelos. Si hay un recubrimiento en el electrodo de carga negativa se trata de una emulsión aniónica y si hay un recubrimiento en la placa de carga positiva la emulsión es catiónica.

3.1.5.1 Equipo.

- Circuito eléctrico.
- Fuente de alimentación con capacidad de corriente continua de 8mA y potencial 4.5V por 30 minutos.
- Miliamperímetro.

3.1.5.2 Procedimiento.

- Limpie los electrodos de la siguiente manera:
 - Lave con agua
 - Lave con propan-2-ol o etanol o alcohol desnaturalizado
 - Lave con agente de enjuague o xileno
 - Lave con propan-2-ol o etanol o alcohol desnaturalizado
 - Lave con agua
- Vierta una cantidad significativa de emulsión en un vaso de precipitación y sumerja los electrodos a una profundidad aproximada de 25mm.

Suspenda los electrodos ubicando una varilla de vidrio en la abertura del vaso.

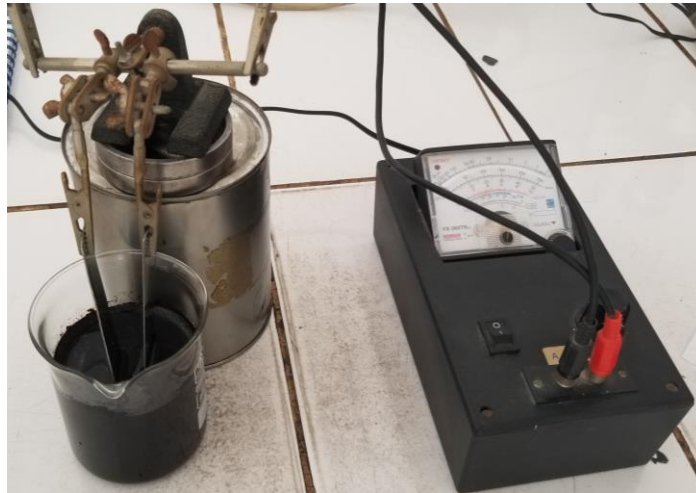


Figura 15. Colocación electrodos en emulsión asfáltica – Ensayo identificación emulsión asfáltica por polaridad

- Conecte los electrodos a su fuente de alimentación, la distancia entre ambos debe ser entre 12 ± 2 mm.
- Adecue la corriente entre 8 a 10 mA con el potenciómetro y cuente el tiempo con la corriente usada.



Figura 16. Adecuación de corriente en el potenciómetro – Ensayo identificación emulsión asfáltica por polaridad

- Una vez que la corriente haya llegado a 2mA, o después de media hora, lo que acontezca primero, desconecte la fuente de alimentación y lave con agua.
- Observe cuál de los electrodos tiene recubrimiento y anote la polaridad.

3.1.5.3 Resultados.

Tabla 12. *Resultados ensayo polaridad de emulsiones asfálticas*

Muestra	Corriente (mA)	Polaridad
CSS-1h EMULDEC	2	Positiva
CSS-1h modificada EMULDEC	2	Positiva
CSS-1h IMPTEK	2	Positiva

3.1.6 Ensayo mezclado con cemento – INEN 904.

Este ensayo permite conocer la capacidad de la emulsión asfáltica de curado lento para mezclarse con un material sumamente fino y de gran área superficial como lo es el cemento Portland tipo III sin causar el rompimiento de esta.

3.1.6.1 Equipo.

- Tamiz de 180 micras.
- Tamiz de 1.40 mm.
- Bandeja.
- Recipiente de mezcla.
- Varilla de agitación.
- Probeta de 100 ml.
- Balanza con capacidad de 1000 gr y precisión de ± 0.1 gr.
- Horno o estufa, capaz de mantener una temperatura de 163°C.
- Termómetro.

3.1.6.2 Procedimiento.

- Antes del ensayo, agite la emulsión asfáltica para su homogeneidad.
- De acuerdo con la viscosidad de la emulsión, calentar la emulsión asfáltica a una temperatura específica.
- Diluya la emulsión asfáltica con agua evaporada hasta obtener un residuo del 55%, el residuo se puede obtener por el método de destilación o por el método de evaporación.
- Calcule la cantidad de agua que debe agregarse a la emulsión asfáltica.
- Pese 50.0 ± 0.1 gr de cemento que haya sido tamizado a través de un tamiz de 180 μm .
- Emplee una temperatura de 25°C a todos los elementos y equipos a utilizarse.
- Utilice 100 ml de emulsión asfáltica diluida al cemento tamizado y agite con una varilla de agitación con movimientos circulares aproximadamente a 60 rpm por un minuto.
- Agregue alrededor de 150 ml de agua evaporada y mezcle por 3 minutos.
- Pese y registre el peso de un tamiz de 1,40mm y de su respectiva bandeja.
- Vacíe la mezcla a través del tamiz de 1,40 mm. Realice los lavados necesarios y remueva todo el material del recipiente utilizado para la mezcla, pase todo por el tamiz.
- Enjuague el tamiz con agua evaporada, desde una altura en promedio de 150 mm, hasta que el agua salga limpia.

- Coloque el tamiz y bandeja al horno a una temperatura de $163 \pm 3^\circ\text{C}$ por una hora. Deje enfriar el tamiz y su bandeja a temperatura ambiente y prosiga a tomar su peso. Repita el calentamiento y la toma de pesos hasta que los resultados sean constantes o no difieran en más de 0.1 gr.

3.1.6.3 Cálculos.

El porcentaje de agua que debe añadirse a la emulsión se calculó como:

$$\% \text{ agua} = 100 - \left(\frac{55}{\% \text{Residuo}} * 100 \right)$$

El peso de la muestra retenida se calculó de la siguiente manera:

$$\text{Masa retenida} = B - A$$

dónde,

A: masa tamiz y bandeja (gr)

B: masa tamiz, bandeja y residuo (gr)

3.1.6.4 Resultados.

3.1.6.4.1 Emulsión CSS-1h EMULDEC.

Tabla 13. Resultados ensayo mezcla con cemento emulsión CSS-1h EMULDEC

Peso	Cantidad
Emulsión (gr)	131.69
Agua para residuo (gr)	6.81
Agua de mezcla (gr)	150
Cemento (gr)	50.04
Tamiz y bandeja (gr)	216.33
Tamiz, bandeja y residuo (gr), 1 hora	216.95
<i>Masa retenida</i>	<i>0.62</i>

3.1.6.4.2 Emulsión CSS-1h modificada EMULDEC.

Tabla 14. Resultados ensayo mezcla con cemento emulsión CSS-1h modificada EMULDEC

Peso	Cantidad
Emulsión (gr)	113.6
Agua para residuo (gr)	6.1
Agua de mezcla (gr)	150
Cemento (gr)	50.06
Tamiz y bandeja (gr)	216.47
Tamiz, bandeja y residuo (gr), 1 hora	216.89
<i>Masa retenida</i>	<i>0.42</i>

3.1.6.4.3 Emulsión CSS-1h IMPTEK.

Tabla 15. Resultados ensayo mezcla con cemento emulsión CSS-1h IMPTEK

Peso	Cantidad
Emulsión (gr)	113.3
Agua para residuo (gr)	6.3
Agua de mezcla (gr)	150
Cemento (gr)	50.02
Tamiz y bandeja (gr)	216.04
Tamiz, bandeja y residuo (gr), 1 hora	216.51
<i>Masa retenida</i>	<i>0.47</i>

3.1.6.5 Resumen resultados.

Tabla 16. Resultados ensayo mezcla con cemento de emulsiones asfálticas

Muestra	Masa retenida (gr)
CSS-1h EMULDEC	0.62
CSS-1h modificada EMULDEC	0.42
CSS-1h IMPTEK	0.47

3.1.7 Ensayo de tamizado. Determinación de partículas de gran tamaño – INEN 906.

Este ensayo muestra las dificultades que se pueden presentar en la manipulación y aplicación de emulsiones asfálticas. Por lo general, el residuo de asfalto que se queda en el tamiz es producto de una aglomeración de la fase dispersa. Esta aglomeración puede producirse debido al almacenamiento, manejo y temperatura a la que se encuentran y mantienen las emulsiones asfálticas. Otra contribución a la producción de aglomeraciones es debido al ambiente de los tanques y mangueras durante la etapa de transporte.

3.1.7.1 Equipo.

- Tamiz de 850 micras.
- Bandeja.
- Termómetro ASTM 17C.
- Horno o estufa.
- Desecador.
- Balanza con capacidad de 2000 gr y precisión de ± 1 gr.
- Balanza con capacidad de 1000 gr y precisión de ± 0.1 gr.

3.1.7.2 Procedimiento.

- Proporcione una temperatura adecuada directamente relacionada con la viscosidad de la emulsión asfáltica. Si la emulsión es menor a 100 segundos en el ensayo de viscosidad Saybolt Furol a 25°C, el ensayo se realiza a temperatura ambiente.
- Pese y registre el peso del tamiz y su respectiva bandeja (peso A).
Humedece el tamiz con una solución surfactante no iónica.

- Pese el recipiente de la muestra dónde está la emulsión asfáltica (peso C)
- Vacíe entre 800 y 100 gr de emulsión asfáltica por el tamiz. Registre el peso del recipiente de la muestra después de ser vaciado (peso D).
- Lave el residuo del tamiz con agua hasta obtener agua clara.
- Ubique la bandeja en el tamiz y insértelos en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ por dos horas. Deje enfriar y pese el tamiz con la bandeja y residuo (peso B).

3.1.7.3 Cálculos.

Para calcular el porcentaje del residuo que se retiene en el tamiz, se utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{Partículas de gran tamaño, \%} = \frac{B - A}{C - D} * 100$$

dónde,

A: peso tamiz y bandeja (gr)

B: peso tamiz, bandeja y residuo (gr)

C: peso recipiente de la muestra lleno (gr)

D: peso recipiente de la muestra vacío (gr)

3.1.7.4 Resultados.

3.1.7.4.1 Emulsión CSS-1h EMULDEC.

Tabla 17. Resultados ensayo tamizado emulsión CSS-1h EMULDEC

Peso	Cantidad
Tamiz y bandeja (gr)	201.61
Tamiz, bandeja y residuo (gr)	201.42
Recipiente de la muestra lleno (gr)	1128.02
Recipiente de la muestra vacío (gr)	283.16
<i>Partículas de gran tamaño (%)</i>	<i>0.02</i>

3.1.7.4.2 Emulsión CSS-1h modificada EMULDEC.

Tabla 18. Resultados ensayo tamizado emulsión CSS-1h modificada EMULDEC

Peso	Cantidad
Tamiz y bandeja (gr)	201.59
Tamiz, bandeja y residuo (gr)	201.43
Recipiente de la muestra lleno (gr)	1126.2
Recipiente de la muestra vacío (gr)	283.16
<i>Partículas de gran tamaño (%)</i>	<i>0.02</i>

3.1.7.4.3 Emulsión CSS-1h IMPTEK.

Tabla 19. Resultados ensayo tamizado emulsión CSS-1h IMPTEK

Peso	Cantidad
Tamiz y bandeja (gr)	201.71
Tamiz, bandeja y residuo (gr)	202.27
Recipiente de la muestra lleno (gr)	1126.2
Recipiente de la muestra vacío (gr)	283.16
<i>Partículas de gran tamaño (%)</i>	<i>0.07</i>

3.1.7.5 Resumen resultados.

Tabla 20. Resultados ensayo tamizado de emulsiones asfálticas

Muestra	Partículas de gran tamaño (%)
CSS-1h EMULDEC	0.02
CSS-1h modificada EMULDEC	0.02
CSS-1h IMPTEK	0.07

3.1.8 Ensayo determinación del residuo por evaporación – INEN 905.

Este ensayo nos permite conocer la composición de las emulsiones asfálticas mediante la evaporación de esta. Consiste en calentar la emulsión asfáltica en horno o estufa a $163 \pm 3^{\circ}\text{C}$ y se obtiene el residuo y esta se puede ensayar de acuerdo con las necesidades.

3.1.8.1 Equipo.

- Vaso de vidrio o metálico de 1000 ml.
- Varillas de agitación.
- Balanza con capacidad de 500 gr y precisión de ± 0.1 gr.
- Horno o estufa.
- Tamiz de 300 micras.

3.1.8.2 Procedimiento.

- Pese tres recipientes, cada uno con su varilla de agitación.



Figura 17. Pesaje recipientes con varilla– Ensayo de residuo por evaporación

- Pese los recipientes, con varilla y una muestra de emulsión de 50.0 ± 0.1 gr.

- Caliente en la estufa a $163 \pm 3^{\circ}\text{C}$. Retire cada vaso y agite el residuo y coloque nuevamente en la estufa u horno por una hora más.



Figura 18. Calentamiento recipiente con emulsión asfáltica– Ensayo de residuo por evaporación

- Deje enfriar a temperatura ambiente y pese cada recipiente con su varilla y el residuo.



Figura 19. Residuo de emulsión asfáltica– Ensayo de residuo por evaporación

- Si se van a realizar ensayos al residuo, caliente nuevamente los recipientes hasta que se encuentre en un estado fluido y pase por un tamiz de 300 μm .

3.1.8.3 Cálculos.

Se calculó el % de residuo de la siguiente forma:

$$\text{Residuo, \%} = 2(A - B)$$

dónde,

A: peso recipiente, varilla y residuo (gr)

B: peso inicial del recipiente y varilla (gr)

3.1.8.4 Resultados.

3.1.8.4.1 Emulsión CSS-1h EMULDEC.

Tabla 21. Resultados ensayo porcentaje de residuo emulsión CSS-1h EMULDEC

No. Vaso	1	2	3	4
Peso vaso y varilla (gr)	92.62	110.10	92.67	103.33
Peso muestra antes de calentar (gr)	50.27	50.07	50.11	50.03
Peso vaso, varilla y muestra después de calentar (gr)	121.73	139.17	121.79	132.36
No. Vaso	5	6	7	8
Peso vaso y varilla (gr)	110.99	93.15	91.61	-
Peso vaso, varilla y muestra antes de calentar (gr)	50.10	50.54	44.19	-
Peso vaso, varilla y muestra después de calentar (gr)	140.05	122.43	117.17	-

No. Vaso	% Residuo
1	57.91
2	58.06
3	58.11
4	58.03
5	58.00
6	57.93
7	57.84
8	-
TOTAL	58.0

3.1.8.4.2 Emulsión CSS-1h modificada EMULDEC.

Tabla 22. Resultados ensayo porcentaje de residuo emulsión CSS-1h modificada EMULDEC

No. Vaso	1	2	3	4
Peso vaso y varilla (gr)	92.15	111.17	109.73	94.49
Peso muestra antes de calentar (gr)	50.12	50.17	50.08	50.63
Peso vaso, varilla y muestra después de calentar (gr)	121.22	140.32	138.91	123.93
No. Vaso	5	6	7	8
Peso vaso y varilla (gr)	86.42	92.01	105.67	-
Peso vaso, varilla y muestra antes de calentar (gr)	50.10	50.22	43.47	-
Peso vaso, varilla y muestra después de calentar (gr)	115.43	121.18	130.90	-
No. Vaso	% Residuo			
1	58.00			
2	58.10			
3	58.27			
4	58.15			
5	57.90			
6	58.08			
7	58.04			
8	-			
TOTAL	58.1			

3.1.8.4.3 Emulsión CSS-1h IMPTEK.

Tabla 23. Resultados ensayo porcentaje de residuo emulsión CSS-1h IMPTEK

No. Vaso	1	2	3	4
Peso vaso y varilla (gr)	92.54	91.77	103.10	92.46
Peso muestra antes de calentar (gr)	50.20	50.18	50.52	50.44
Peso vaso, varilla y muestra después de calentar (gr)	122.37	121.61	133.13	122.50
No. Vaso	5	6	7	8
Peso vaso y varilla (gr)	92.88	92.47	-	-
Peso vaso, varilla y muestra antes de calentar (gr)	50.51	50.16	-	-
Peso vaso, varilla y muestra después de calentar (gr)	122.90	122.23	-	-
No. Vaso	% Residuo			
1	59.42			
2	59.47			
3	59.44			
4	59.56			
5	59.43			
6	59.33			
7	-			
8	-			
TOTAL	59.4			

3.1.8.5 Resultados.

Tabla 24. Resultados ensayo porcentaje de residuo de emulsiones asfálticas

Muestra	Residuo (%)
CSS-1h EMULDEC	58.0
CSS-1h modificada EMULDEC	58.1
CSS-1h IMPTEK	59.4

3.1.9 Ensayo Asentamiento (5 días) – INEN 910.

Este ensayo nos permite conocer el nivel de asentamiento que las emulsiones asfálticas puedan tener mediante la medida del grado de dispersión de las partículas de emulsión con respecto al tiempo.

Consiste en comparar mediante la diferencia en porcentaje del residuo de una muestra encontrado en su superficie y en su fondo una vez que se dejó almacenado por 5 días.

3.1.9.1 Equipo.

- Cilindro de vidrio de 500 ml, con tapón de caucho y con diámetro de 50mm.
- Pipeta de 50 ml.
- Balanza, capacidad de 1000 gr y precisión de ± 0.1 gr.
- Dos vasos de vidrio o metal de 100 ml.
- Varillas de agitación.
- Horno o estufa.

3.1.9.2 Procedimiento.

- Antes de empezar el ensayo, agite la emulsión hasta llegar a su homogeneidad considerando su temperatura de acuerdo con su ensayo de viscosidad.

- Coloque una muestra de 500 ml a temperatura ambiente de emulsión asfáltica en un cilindro de vidrio, tape y deje en reposo por 5 días.
- Retirar 55 ml desde la superficie del cilindro por medio de pipetas o de sifonado, sin alterar la muestra. Una vez retirada la porción agite nuevamente.
- Pese 50.0 ± 0.1 gr en un vaso de 1000 ml, previamente pesado con su varilla de agitación.
- Excluya alrededor de 390 ml de la muestra superficial del cilindro de vidrio, agite el restante de la muestra y pese 50.0 ± 0.1 gr en otro vaso de vidrio también pesado previamente con su respectiva varilla de agitación.
- Coloque los vasos de vidrio en un horno por 2 horas a una temperatura de $163^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$.
- Retire los vasos del horno, agite el residuo e ingrese nuevamente al horno por una hora más.
- Deje enfriar a temperatura ambiente y pese los vasos con sus respectivas varillas de agitación y sus residuos por separado.

3.1.9.3 Cálculos.

El porcentaje de residuo se calculó con la siguiente fórmula

$$\%=(A-B)/C*100$$

dónde,

A: peso vaso, varilla y residuo (gr)

B: peso vaso y varilla (gr)

C: peso muestra (gr)

La estabilidad al almacenamiento se calcula con la siguiente fórmula:

$$\text{Asentamiento, \% (5 días)} = B - A$$

dónde,

A: porcentaje de residuo de la muestra que se toma de la superficie

B: porcentaje de residuo de la muestra que se toma del fondo

3.1.9.4 Resultados.

3.1.9.4.1 CSS-1h EMULDEC.

Tabla 25. Resultados de estabilidad de almacenaje de emulsión CSS-1h EMULDEC

Residuo muestra de la parte superior	
Peso vaso y varilla (gr)	97.43
Peso muestra antes de calentar (gr)	53.82
Peso vaso, varilla y muestra después de calentar (gr)	128.79
Residuo muestra de la parte del fondo	
Peso vaso y varilla (gr)	92.83
Peso vaso, varilla y muestra antes de calentar (gr)	55.69
Peso vaso, varilla y muestra después de calentar (gr)	127.20
% Residuo Superior	58.27
% Residuo Inferior	61.72
<i>Estabilidad al almacenamiento (%)</i>	<i>3.45</i>

3.1.9.4.2 CSS-1h modificada EMULDEC.

Tabla 26. Resultados de estabilidad de almacenaje de emulsión CSS-1h EMULDEC

Residuo muestra de la parte superior	
Peso vaso y varilla (gr)	92.02
Peso muestra antes de calentar (gr)	50.66
Peso vaso, varilla y muestra después de calentar (gr)	121.66
Residuo muestra de la parte del fondo	
Peso vaso y varilla (gr)	92.78
Peso vaso, varilla y muestra antes de calentar (gr)	57.99
Peso vaso, varilla y muestra después de calentar (gr)	128.09
% Residuo Superior	58.51
% Residuo Inferior	60.89
<i>Estabilidad al almacenamiento (%)</i>	<i>2.38</i>

3.1.9.4.3 CSS-1h IMPTEK.

Tabla 27. Resultados de estabilidad de almacenaje de emulsión CSS-1h IMPTEK

Residuo muestra de la parte superior	
Peso vaso y varilla (gr)	97.57
Peso muestra antes de calentar (gr)	46.81
Peso vaso, varilla y muestra después de calentar (gr)	124.52
Residuo muestra de la parte del fondo	
Peso vaso y varilla (gr)	92.25
Peso vaso, varilla y muestra antes de calentar (gr)	58.96
Peso vaso, varilla y muestra después de calentar (gr)	128.75
% Residuo Superior	57.57
% Residuo Inferior	61.91
<i>Estabilidad al almacenamiento (%)</i>	<i>4.33</i>

3.1.9.5 Resumen resultados.

Tabla 28. Resultados de estabilidad de almacenamiento de emulsiones asfálticas

Muestra	Temperatura (°C)	Asentamiento (%)
CSS-1h EMULDEC	21	3.45
CSS-1h modificada EMULDEC	21	2.38
CSS-1h IMPTEK	21	4.33

3.1.10 Ensayo de determinación de la penetración (residuo emulsión asfáltica) – INEN 917

Este ensayo muestra una medición de consistencia de materiales bituminosos mediante la fundición de la muestra, en este caso el residuo de la emulsión asfáltica, y se enfría de especificaciones controladas para medir la penetración lo cual se obtiene al introducir una aguja estándar en la muestra y un penetrómetro.

3.1.10.1 Equipo.

- Equipo de penetración que permita que el eje de la aguja se traslade verticalmente y sin fricción, con precisión de 0.1mm.
- Indicador de nivel.

- Aguja de penetración de diámetro de 55mm y profundidad interna de 35mm.
- Recipiente de muestra.
- Baño de agua.
- Plato de transferencia.
- Temporizador.
- Termómetro.

3.1.10.2 Procedimiento.

- Caliente la muestra si es que esta no es fluida convenientemente.
- Vierta la muestra fluida en el recipiente y deje enfriar a temperatura ambiente (entre 15 y 30°C) con una duración de 45 a 90 minutos para recipientes de 55x35mm.



Figura 20. Residuo de emulsión asfáltica enfriándose en recipiente – Ensayo de penetración del residuo de emulsión asfáltica

- Sumerja el recipiente con la muestra en un baño de agua a 25 °C aproximadamente por un periodo de 60 a 90 minutos.



Figura 21. Residuo de emulsión asfáltica en baño de agua – Ensayo de penetración del residuo de emulsión asfáltica

- Examine el casquillo y vástago de la aguja para retirar cualquier residuo o agua. Limpie la guja con un solvente adecuado y seque.
- Coloque la carga de 50 gr sobre la aguja, obteniendo un peso total de 100 gr.
- Retire el recipiente de ensayo del baño de agua y coloque sobre el plato de transferencia del equipo de penetración, una vez que haya cubierto la muestra con agua.



Figura 22. Preparación equipo de penetración para ensayo – Ensayo de penetración del residuo de emulsión asfáltica

- Compruebe que el equipo se encuentre nivelado a través del indicador de nivel.
- Coloque el indicador dial en cero. Ubique la guja bajándola de forma cuidadosa hasta que su punta esté en contacto ligeramente con la superficie de la muestra.

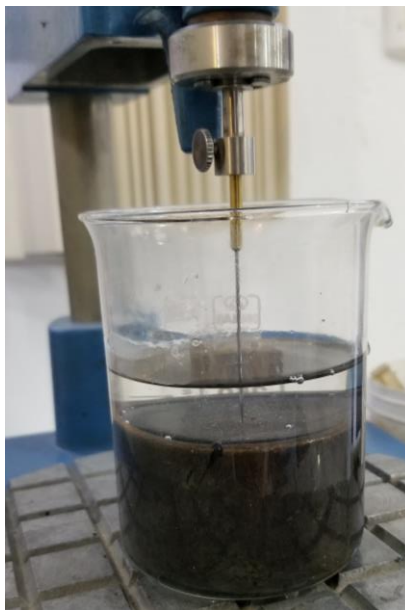


Figura 23. Colocación aguja en la muestra – Ensayo de penetración del residuo de emulsión asfáltica

- Suelte de manera rápida la aguja por 5 segundos y ajuste el equipo para obtener la profundidad de penetración en decimas de milímetro.
- Realice como mínimo 3 penetraciones sobre la superficie de la muestra en puntos que estén separados por lo menos a 10 mm entre ellos. Limpie la aguja cada vez que realice una nueva medición.

3.1.10.3 Resultados.

3.1.10.3.1 Emulsión CSS-1h EMULDEC.

Tabla 29. Resultados ensayo de penetración del residuo emulsión CSS-1h EMULDEC

No. Medida	1	2	3	Promedio
Medida, mm	40	46	45	44.00

3.1.10.3.2 Emulsión CSS-1h modificada EMULDEC.

Tabla 30. Resultados ensayo de penetración del residuo emulsión CSS-1h modificada EMULDEC

No. Medida	1	2	3	Promedio
Medida, mm	58	54	56	56.00

3.1.10.3.3 Emulsión CSS-1h IMPTEK.

Tabla 31. Resultados ensayo de penetración del residuo emulsión CSS-1h IMPTEK

No. Medida	1	2	3	Promedio
Medida, mm	62	60	63	62.00

3.1.10.4 Resumen resultados.

Tabla 32. Resultados ensayo de penetración del residuo emulsiones asfálticas

Muestra	Penetración (mm)
CSS-1h EMULDEC	44
CSS-1h modificada EMULDEC	56
CSS-1h IMPTEK	62

3.1.11 Ensayo de determinación de ductilidad – INEN 916.

Este método muestra una medida de las características a tensión de materiales bituminosos mediante su ductilidad. Se mide la distancia que el material puede alargarse antes de que se produzca una rotura, a una velocidad y condiciones controladas.

3.1.11.1 Equipo.

- Molde de bronce con su placa base de bronce.
- Baño de agua capaz de mantener temperaturas específicas.
- Máquina de ensayo.
- Termómetro.
- Agente antiadherente como glicerina con dextrina o talco y aceite mineral.
- Horno o estufa.
- Herramienta de corte.
- Aditivo de densidad relativa, para ajustar la densidad del agua del baño.
- Tamiz de 300 micras.

3.1.11.2 Procedimiento.

- Coloque el molde sobre la placa de bronce.
- Recubra la superficie de la placa de bronce con un agente antiadherente.
- Caliente la muestra hasta obtener un material fluido conveniente, sin llegar al sobrecalentamiento que se puede producir a temperaturas que exceden los 145°C.
- Agite el material y coloque en el molde de manera lenta hasta que se produzca un pequeño derrame.



Figura 24. Colocación residuo en molde – Ensayo de ductilidad del residuo de emulsión asfáltica

- Deje enfriar la muestra en el molde por aproximadamente 40 minutos.
- Sumerja el molde en baño de agua a 25°C por alrededor de 40 minutos.



Figura 25. Baño en agua del residuo en molde – Ensayo de ductilidad del residuo de emulsión asfáltica

- Retire la muestra del baño y retire el exceso de muestra con una herramienta de corte para que la superficie quede al ras del molde.



Figura 26. Residuo en molde enrasado – Ensayo de ductilidad del residuo de emulsión asfáltica

- Coloque nuevamente en baño de agua a la muestra por 90 minutos.
- Retire la placa por deslizamiento del molde sin ocasionar ningún daño a la muestra.
- Fije los anillos de los extremos del molde a los ganchos de la máquina de ensayo, encienda la máquina y esta separará los ganchos con una velocidad de 5cm/min.



Figura 27. Proceso del ensayo – Ensayo de ductilidad del residuo de emulsión asfáltica

- Mida la distancia de separación entre los ganchos cuando se produjo la rotura y registre la distancia en cm.



Figura 28. Resultados del ensayo – Ensayo de ductilidad del residuo de emulsión asfáltica

3.1.11.3 Resultados.

3.1.11.3.1 Emulsión CSS-1h EMULDEC.

Tabla 33. Resultados ensayo ductilidad de residuo emulsión CSS-1h EMULDEC

Muestra No.	1	2	3	Promedio
Lectura inicial, mm	-	-	-	-
Lectura final, mm	22.5	21.9	23.1	-
Ruptura normal	Si	Si	Si	-
Ductilidad, mm	22.5	21.9	23.1	22.50

3.1.11.3.2 Emulsión CSS-1h modificada EMULDEC.

Tabla 34. Resultados ensayo ductilidad de residuo emulsión CSS-1h modificada EMULDEC

Muestra No.	1	2	3	Promedio
Lectura inicial, mm	-	-	-	-
Lectura final, mm	31.0	30.7	31.2	-
Ruptura normal	No	Si	Si	-
Ductilidad, mm	31	30.7	31.2	31.00

3.1.11.3.3 Emulsión CSS-1h IMPTEK.

Tabla 35. Resultados ensayo ductilidad de residuo emulsión CSS-1h IMPTEK

Muestra No.	1	2	3	Promedio
Lectura inicial, mm	-	-	-	
Lectura final, mm	16.5	18.4	19	
Ruptura normal	No	Si	Si	
Ductilidad, mm	16.5	18.4	19	18.00

3.1.11.4 Resumen resultados.

Tabla 36. Resultados ensayo ductilidad de residuo de emulsiones asfálticas

Muestra	Ductilidad (mm)
CSS-1h EMULDEC	22.5
CSS-1h modificada EMULDEC	31.0
CSS-1h IMPTEK	18.0

3.1.12 Ensayo de determinación del punto de reblandecimiento del residuo de emulsiones asfálticas – INEN 920.

Este ensayo permite clasificar a los bitúmenes asfálticos, conocer la homogeneidad del material durante la transportación y almacenamiento e indica las propiedades del material a fluir a altas temperaturas. Consiste en la determinación del punto de reblandecimiento utilizando un equipo de anillo y bola cuando está sumergido en agua.

3.1.12.1 Equipo.

- Dos anillos con borde de latón.
- Placa de vertido.
- Dos bolas de acero de 9.5mm de diámetro y peso de 3.5 ± 0.5 gr.
- Dos centradores de bola.

- Recipiente de vidrio con diámetro mínimo de 85mm y profundidad mínima de 120mm.
- Porta anillos.
- Termómetro.

3.1.12.2 Procedimiento.

- Caliente la muestra y agite vigorosamente hasta obtener una muestra lo suficiente líquida, tener cuidado con el sobrecalentamiento de la muestra. El máximo tiempo de calentamiento debe ser hasta 2 horas sin sobrepasar los 110°C.
- Vierta la muestra fluida en el interior de los dos anillos y luego enfríe la muestra aproximadamente por 30 minutos.



Figura 29. Colocación residuo emulsión asfáltica en anillos – Ensayo de ductilidad del residuo de emulsión asfáltica

- Retire con una herramienta cortante el exceso de muestra quedando lisa la superficie de los anillos.



Figura 30. Enrasado de residuo en anillos – Ensayo de ductilidad del residuo de emulsión asfáltica

- Ensamble el equipo con los anillos de muestra, centradores de bola, termómetro y campana en un vaso de precipitación y llenar el mismo hasta que se obtenga una profundidad de 105 ± 3 mm.
- Caliente el baño por el fondo del vaso a una tasa uniforme de $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$.
- Registre para cada anillo, la temperatura del termómetro en la que la muestra que envuelve la bola toque la placa del fondo de la campana.

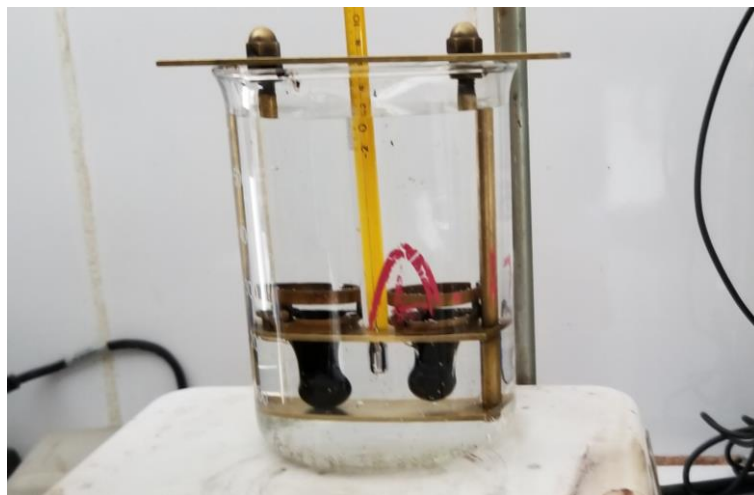


Figura 31. Resultados ensayo – Ensayo de ductilidad del residuo de emulsión asfáltica

3.1.12.3 Resultados.

Tabla 37. Resultados ensayo punto de reblandecimiento de residuo de emulsiones asfálticas

Muestra	Punto de reblandecimiento (°C)
CSS-1h EMULDEC	54
CSS-1h modificada EMULDEC	53
CSS-1h IMPTEK	54.5

3.1.13 Resumen resultados ensayos de caracterización emulsiones asfálticas.

Tabla 38. Resultados ensayo punto de reblandecimiento de residuo de emulsiones asfálticas

ENSAYOS	NORMA INEN	MÍN	MÁX	CSS-1h EMULDEC	CSS-1h modificada EMULDEC	CSS-1h IMPTEK
<i>Emulsión</i>						
Viscosidad FUROL 25°C, s	1981	20	100	14.0	16.0	38.0
Estabilidad almacenaje 24 h, %	909	-	1	0.0	0.0	0.1
Carga de partícula	908	POSITIVO		POSITIVO	POSITIVO	POSITIVO
Mezcla con cemento	904	-	2	0.6	0.4	0.5
Ensayo de tamizado	906	-	0.1	0.0	0.0	0.1
Residuo por evaporación, %	905	57	-	58.0	58.1	59.4
Asentamiento (5 días), %	910	-	5	3.5	2.4	4.3
<i>Residuo</i>						
Penetración (25°C, 100gr, 5s) mm	917	40	90	43.7	56.0	61.7
Ductilidad (25°C, 5cm/min), cm	916	40	-	22.5	31.0	18.0
Punto de ablandamiento	920	-	-	54.0	53.0	54.5

Se debe tomar en cuenta que las propiedades del asfalto AC-20, usadas en las emulsiones, deben cumplir con la normativa de acuerdo con MOP-001F-2002, Especificaciones generales para construcción de caminos y puentes, sección 810-3, Requisitos para cementos asfálticos. Los ensayos realizados al asfalto proveniente de Petroecuador se muestran en el Apéndice A y cumplen con las normativas estipuladas por las normas vigentes en el Ecuador.

3.2 El agua

Para la fabricación de emulsiones asfálticas es muy importante considerar minerales y químicos que pueden afectar a la estabilidad de esta, la presencia de partículas de calcio y magnesio retrasan la rotura de la emulsión catiónica y al contrario cuando hay presencia de carbonatos o partículas suspendidas se pierde estabilidad debido a una rotura precipitada (Ulloa, 2012). Es por ello que se debe utilizar agua libre de este tipo de partículas o contaminantes que afecten su comportamiento como lo es el agua potable.

3.2.1 Agua potable del Distrito Metropolitano de Quito.

La red de agua potable en el Distrito Metropolitano de Quito está controlada por la Empresa Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento de Quito (EPMAPS). Esta empresa se encarga de la captación, tratamiento, distribución y calidad de agua disponible.

Según el resumen de calidad del agua de las redes de Quito, publicado por la EPMAPS en noviembre del 2018, cumplen con los estándares de calidad impuestas en la norma INEN 1108 vigente.

Se establecen cuatro parámetros de calidad que debe cumplir el agua para poder ser utilizada por los usuarios. Entre ellos están la turbiedad, color, cloro libre residual y escherichia coli.

La turbiedad es un indicador básico de calidad del agua ya que esta indica la presencia de partículas en suspensión, ya sean estas de tipo orgánico o mineral (Marcó, Azario, Metzler, Garcia, 2004). El color es un indicador de la presencia de minerales como hierro y manganeso o residuos coloridos resultantes de las industrias. El cloro libre residual se presenta ya que se usa como desinfectante para el agua, pero en muchas cantidades pueden ser dañinos para la salud (Orellana, s/f). Por último, el

escherichia coli son bacterias coliformes fecales que proviene de los intestinos de los animales y seres humanos, si esto se encuentra dentro del agua pueden causar enfermedades (Rock, Rivera, 2014).

Según el informe de la EPMAPS, el agua de Quito tiene las siguientes características.

Tabla 39. *Resultados parámetros de agua potable del Distrito Metropolitano de Quito*

Parámetros	Unidades	Número de análisis realizados	Límite máximo permisible	% de muestras que exceden LMP	Promedio	Cumple
Turbiedad	NTU	274	5.000000	0.00%	1	Si
Color	UC	274	15.000000	0.00%	0	Si
Cloro libre residual	mg/L	274	0.300000 a 1.500000	2.92%	0.9	Si
Escherichia coli	MP/100ml	70	< 1.100000	0.00%	0.0	Si

Nota. Recuperado del informe de noviembre del 2018 del Resumen de la calidad del agua en las redes de distribución del Distrito Metropolitano de Quito publicada por la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS).

Esto demuestra que el agua potable suministrada por la EPMAPS puede usarse sin problemas para la elaboración de emulsiones asfálticos sin que puedan interferir con su estabilidad y almacenaje.

3.3 Aditivos

La aplicación de aditivos tiene como objetivo el mejoramiento de ciertas propiedades ya sea en el asfalto, la mezcla durante la fabricación o de la mezcla después de aplicada. Entre los tipos de aditivos están los promotores de adherencia que reducen los efectos del agua sobre los pavimentos, modificadores de asfalto como el SBS que un polímero de estireno – butadieno – estireno, que eleva la viscosidad del asfalto, y por último los reguladores de rotura que son para controlar la rotura de las emulsiones asfálticas.

En cuanto al reciclado, los aditivos más usados son los rejuvenecedores que mejoran las características del asfalto oxidado impregnado del material granular.

Las emulsiones de estudio CSS-1h de EMULDEC e IMPETK tienen en su composición aditivos de tipo promotor de adherencia, pero para la emulsión CSS-1h modificada de EMULDEC incluye un aditivo de tipo rejuvenecedor, lo que difiere de las emulsiones normales a la venta.

3.4 Caracterización del material granular recuperado por fresado para reciclado de pavimentos asfálticos

3.4.1 Muestra de triturado.

Como se planteó anteriormente, el fresado se obtuvo en dos entregas por parte de la EPMMOP, la primera extraída en calles específicas en la ciudad de Quito y la segunda entrega obtenida directamente de la planta de la EPMMOP.

3.4.1.1 Primera entrega.

Se obtuvo el fresado en un proceso de rehabilitación de vías y se recogió el material antes de ser llevado a la planta. Las calles dónde se obtuvo el material granular son las calles Los Pinos, Manuel Larrea y Bogotá, dónde se muestra en color verde específicamente en las figuras 32, 33 y 34. En promedio entre las 3 calles aleatorias se extrajo 200 kg de fresado.

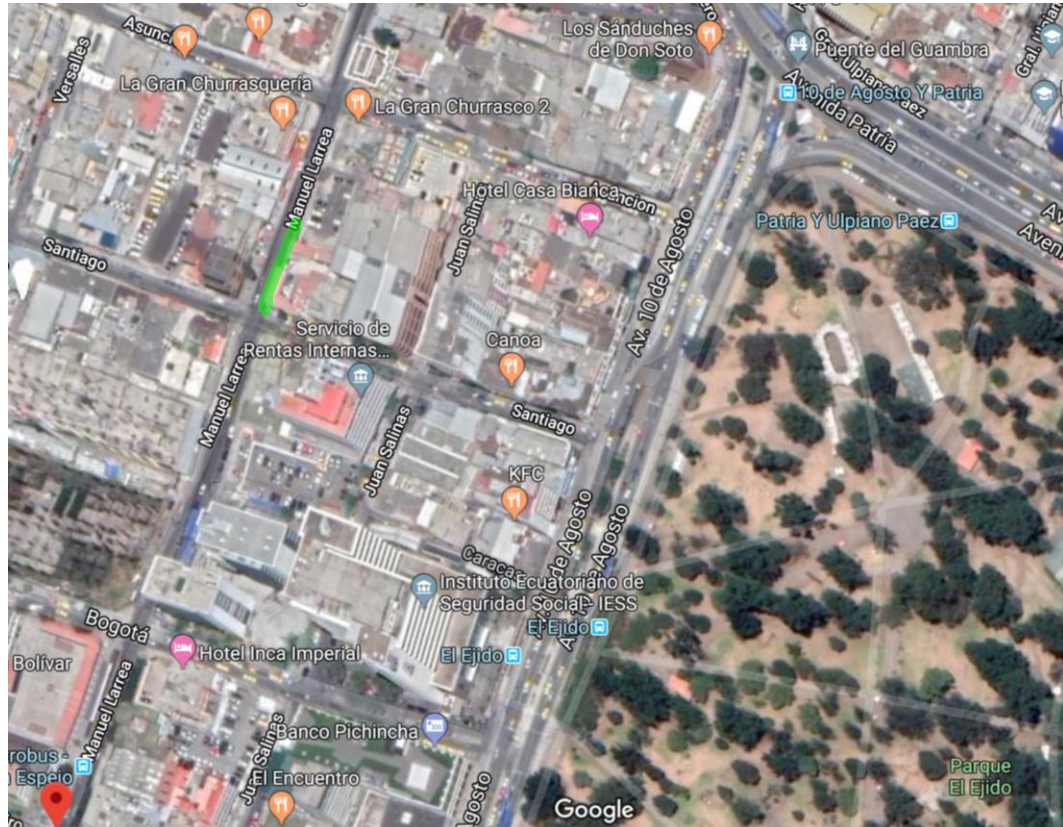


Figura 32. Primer lugar de obtención fresado, primera entrega



Figura 33. Segundo lugar de obtención fresado, primera entrega



Figura 34. Tercer lugar de obtención fresado, primera entrega

3.4.1.2 Segunda entrega.

La segunda entrega de material fresado se obtuvo respectivamente de la planta de asfalto de la EPMMOP ubicada en la Simón Bolívar e Interoceánica, se retiró aproximadamente 200kg.

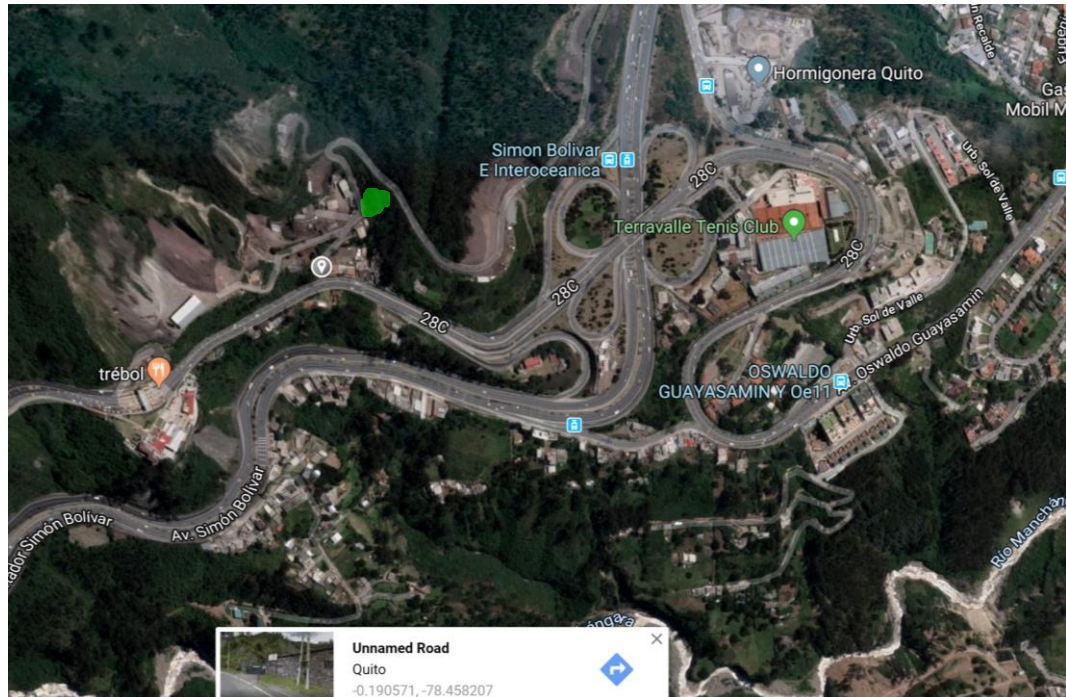


Figura 35. Ubicación planta de asfalto EPMMOP

3.4.2 Especificaciones técnicas material granular.

Las especificaciones técnicas utilizadas fueron las estipuladas en las Especificaciones técnicas para la construcción de caminos y puentes MOP-001F-2002, implementado por el Ministerio de Obras Públicas y Comunicación.

En la sección 404-3.02 se plantean rangos para 3 tipos de granulometría que pueden ser utilizadas para la obtención de una base de hormigón asfáltico como se muestra a continuación.

Tabla 40. *Límites de granulometría para una base de hormigón asfáltico*

No. Tamiz ASTM	Abertura (mm)	A		B		C	
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
2"	50.8	100	100	-	-	-	-
1.5"	38.1	70	100	100	100	-	-
1"	25.4	55	85	70	100	100	100
3/4"	19	50	80	60	90	70	100
3/8"	9.5	40	70	45	75	50	80
4	4.75	30	60	30	60	35	65
10	2	20	50	20	50	25	50
40	0.425	10	30	10	30	10	30
200	0.075	5	20	5	20	5	20

Nota: Recuperado de MOP-001F-2002, Especificaciones técnicas para construcción de caminos y puentes.

En la sección 404-3.04 se establecen los ensayos y tolerancias que se deben considerar para una base asfáltica como mínimo a una temperatura de 25°C.

Tabla 41. *Ensayos y tolerancias material granular para base con emulsión asfáltica*

ESTABILIDAD MARSHALL	FLUJO (1/100")
750 lbs. min.	5-18

Nota: Recuperado de MOP-001F-2002, Especificaciones técnicas para construcción de caminos y puentes.

3.4.3 Ensayo de determinación de granulometría para el material granular recuperado, granulometría por tamizado - INEN 696.

Este ensayo determina la distribución de tamaños de las partículas finas y gruesas mediante tamización. Se usa este método para clasificar el material granular fresado en una de las clases de agregado estipulado en la Tabla 3.36.

3.4.3.1 Equipo.

- Balanza con precisión de 0.1 gr.
- Tamices.
- Agitador de tamices mecánico.

- Horno capaz de mantener temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$.

3.4.3.2 Procedimiento.

- Escoja el tamaño de la muestra de acuerdo al tamaño máximo nominal del árido.
- Seque la muestra en horno a una temperatura de 110°C hasta obtener masa constante.
- Selecciones los tamices necesarios para obtener la información requerida de distribución. Ordene los tamices de manera decreciente de acuerdo con el tamaño de abertura.
- Coloque la muestra en la abertura en el tamiz superior y ubique los tamices en la máquina de tamizado por un periodo suficiente. No cargue excesivamente los tamices.



Figura 36. Proceso de tamizado – Ensayo granulometría por tamizado

- Determine las masas retenidas en cada uno de los tamices y registre. El total de muestra antes y después del tamizado debe ser muy similar y no variar en más de un 0.3%.

3.4.3.3 Resultados.

Tabla 42. *Granulometría fresado calle Los Pinos*

No. Tamiz ASTM	Abertura (mm)	Peso Retenido Acum. (gramos)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Que pasa
2"	50.8	0	0.00	0.00	100.00
1.5"	38.1	0	0.00	0.00	100.00
1"	25.4	69	2.84	2.84	97.16
3/4"	19	123	2.20	5.04	94.96
3/8"	9.5	498	15.43	20.47	79.53
4	4.75	928	17.71	38.18	61.82
10	2	1455	21.69	59.88	40.12
40	0.425	2057	24.77	84.64	15.36
200	0.075	2365	12.66	97.30	2.70
Pasante tamiz No. 200		2430	2.70	100.00	0.00

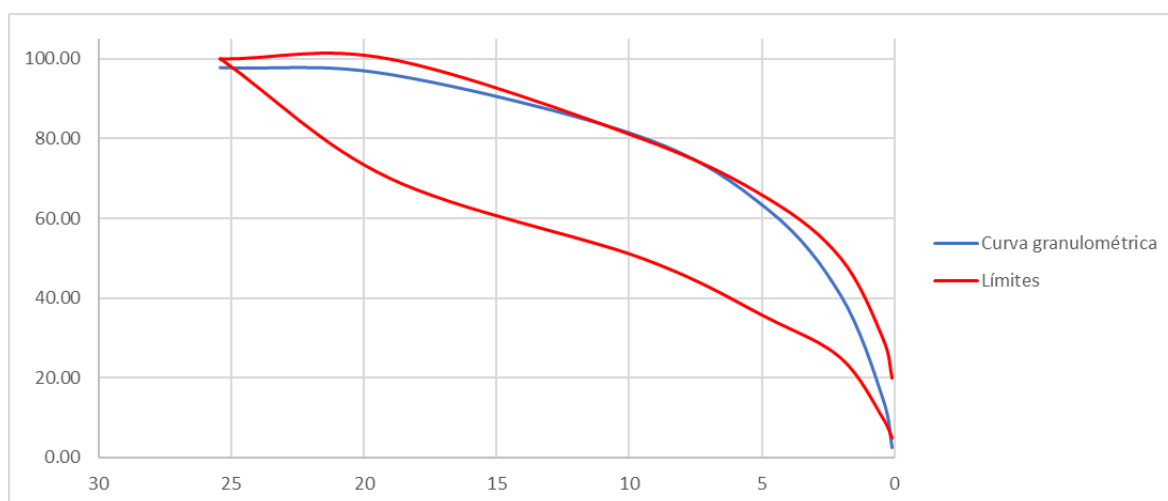


Figura 37. Curva granulométrica fresado calle Los Pinos

Tabla 43. *Granulometría fresado calle Manuel Larrea*

No. Tamiz ASTM	Abertura (mm)	Peso Retenido Acum. (gramos)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Que pasa
2"	50.8	0	0.00	0.00	100.00
1.5"	38.1	0	0.00	0.00	100.00
1"	25.4	109.01	5.04	5.04	94.96
3/4"	19	166.77	2.67	7.71	92.29
3/8"	9.5	486.3	14.78	22.49	77.51
4	4.75	871.51	17.82	40.31	59.69
10	2	1365.43	22.85	63.16	36.84
40	0.425	1877.35	23.68	86.84	13.16
200	0.075	2117.02	11.09	97.93	2.07
Pasante tamiz No. 200		2161.87	2.07	100.00	0.00

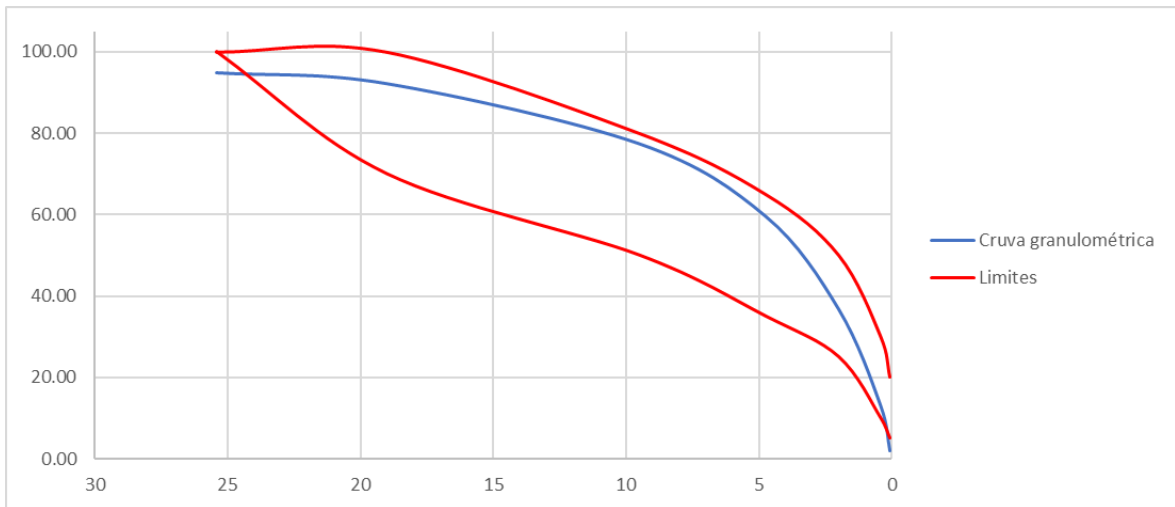


Figura 38. Curva granulométrica fresado calle Manuel Larrea

Tabla 44. Granulometría fresado calle Bogotá

No. Tamiz ASTM	Abertura (mm)	Peso Retenido Acum. (gramos)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Que pasa
2"	50.8	0	0.00	0.00	100.00
1.5"	38.1	0	0.00	0.00	100.00
1"	25.4	45.54	1.70	1.70	98.30
3/4"	19	106.12	2.26	3.96	96.04
3/8"	9.5	524.63	15.64	19.60	80.40
4	4.75	984.49	17.18	36.78	63.22
10	2	1541.63	20.82	57.60	42.40
40	0.425	2202.25	24.68	82.28	17.72
200	0.075	2583.53	14.25	96.53	3.47
Pasante tamiz No. 200		2676.43	3.47	100.00	0.00

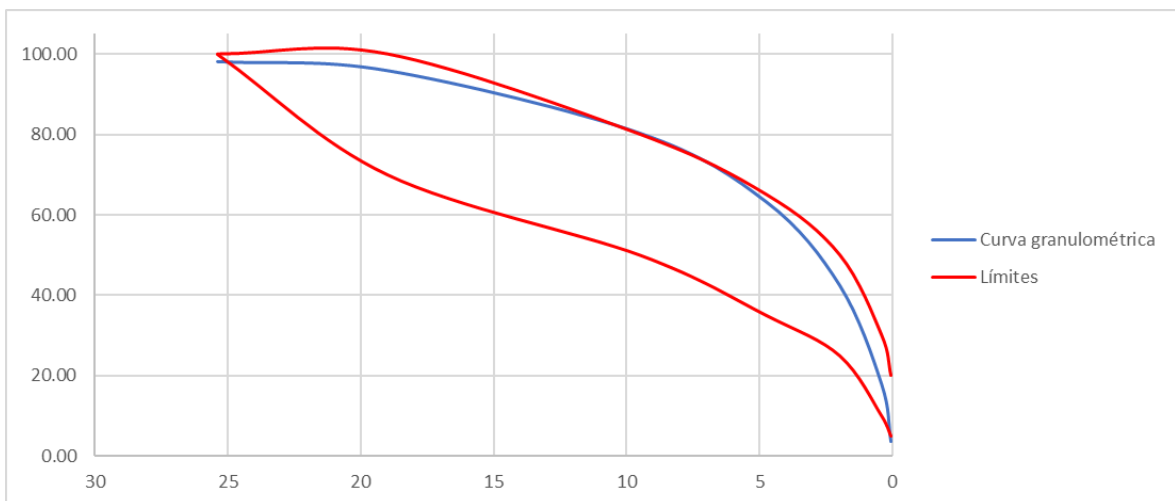


Figura 39. Curva granulométrica fresado calle Bogotá

Los límites en las curvas granulométricas corresponden a los límites para el material granular tipo C, por lo que se puede concluir que el fresado recuperado es de tipo C. Para el diseño de mezcla se utilizó un promedio entre las tres granulometrías como se muestra a continuación.

Tabla 45. *Granulometría promedio fresado*

No. Tamiz ASTM	Abertura (mm)	Peso Retenido Acum. (gramos)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Que pasa
2"	50.8	0	0.00	0.00	100.00
1.5"	38.1	0	0.00	0.00	100.00
1"	25.4	69	2.84	2.84	97.16
3/4"	19	123	2.20	5.04	94.96
3/8"	9.5	498	15.43	20.47	79.53
4	4.75	928	17.71	38.18	61.82
10	2	1455	21.69	59.88	40.12
40	0.425	2057	24.77	84.64	15.36
200	0.075	2365	12.66	97.30	2.70
Pasante tamiz No. 200		2430	2.70	100.00	0.00

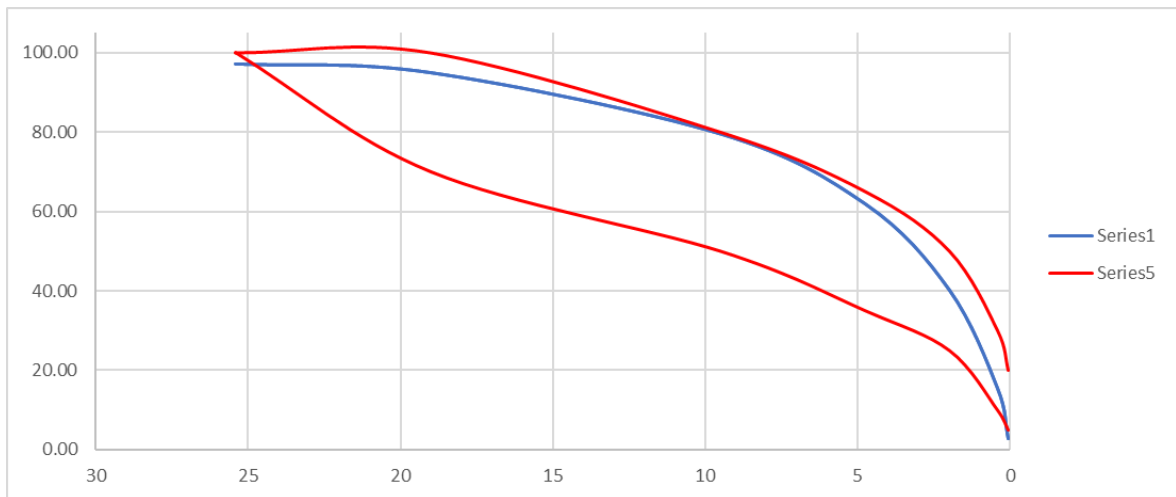


Figura 40. Curva granulométrica promedio fresado

3.4.4 Ensayo equivalente de arena ASTM D-2419.

Este ensayo permite conocer las proporciones relativas de materiales de tipo arcillosos o polvos presentes en el material granular fino. Consiste en determinar mediante

3.4.4.1 Equipo.

- Cilindro graduado.
- Tapón.
- Tubo irrigador de acero, cobre o bronce.
- Tubo flexible.
- Cloruro de calcio.
- Dispositivo de lectura de resultados.
- Recipiente metálico.
- Balanza con precisión de 0.1 gr.
- Embudo.
- Cronómetro.
- Agitador.
- Regla.
- Horno con capacidad de temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Cuarteadora de 600mm.

3.4.4.2 Procedimiento.

- Pase la muestra por el tamiz No. 4 y excluya todo el material retenido. Por lo menos obtenga 1200 gr de material pasante. Remueva si es el caso el material fino impregnado al material granular grueso.



Figura 41. Separación fresado por el tamiz No. 4 – Ensayo equivalente de arena

- Cuartee la muestra y tome cuatro medidas, seque la muestra en horno a 110°C y deje enfriar.
- Coloque el tubo irrigador en el frasco de solución de cloruro de calcio y este ubíquelo sobre una superficie alta para iniciar el proceso de sifonado.
- Vierta solución en el cilindro graduado por medio del sifón hasta una altura de $101.6 \pm 2.54\text{mm}$.
- Utilice el embudo para colocar la muestra seca dentro del cilindro graduado. Libere el exceso de aire del fondo del cilindro dando golpes con la mano. Deje en reposo por 10 min.

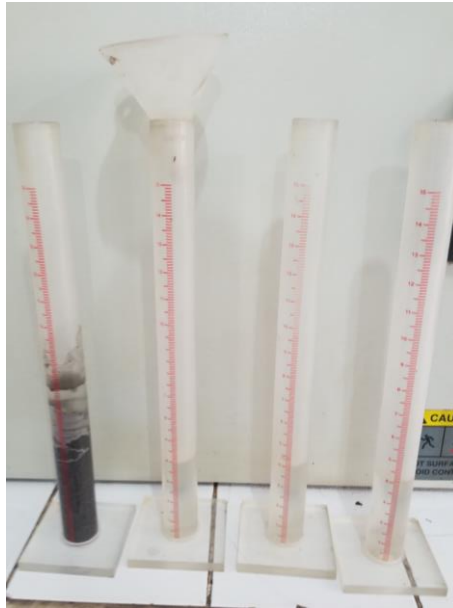


Figura 42. Colocación fresado en cilindros graduados– Ensayo equivalente de arena

- Tape el cilindro y afloje el material del fondo del cilindro agitando e invirtiendo de manera parcial.
- Agite el cilindro manualmente o con un agitador mecánico. Si es manualmente, el operador debe agitar por 90 ciclos alrededor de 30 segundos, empleando un movimiento de 229 ± 25 mm. Un ciclo es aquel movimiento completo de vaivén dónde el operador solo puede mover sus antebrazos.
- Coloque el cilindro verticalmente y remueva el tapón.
- Con el tubo de irrigación, lave el material impregnado en las paredes del cilindro simultáneamente se vaya bajando el tubo de irrigación con una presión hasta llegar al tope del cilindro. Esto permite que las partículas finas del fondo entren en suspensión. Realice esto hasta que se llene el cilindro hasta una altura de 381mm.
- Deje reposar el cilindro aproximadamente por 20 min.

- Realice la lectura y registre el nivel de la parte superior de las partículas en suspensión con características arcillosas, denominado como lectura de arcilla.
- Inserte dentro del cilindro el conjunto de disco, barra y pesos de una manera suave hasta que esté en contacto con la superficie de la arena, verifique que el dispositivo toque la pared del cilindro.
- Tome la lectura y reste 254mm y registre esta medida como lectura de arena.
- Si las lecturas recaen en medio de dos líneas de graduación, tome la lectura correspondiente a la línea de graduación superior.

3.4.4.3 Cálculos.

Se obtuvo el resultado de equivalente de arena con la siguiente ecuación:

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

3.4.4.4 Resultados.

Tabla 46. Resultados ensayo equivalente de arena fresado

No.	Lectura arcilla (pulgadas)	Lectura arena (pulgadas)	E.A (%)
Muestra: Calle Los Pinos			
1	4.3	3.3	76.74
2	4.4	3.3	75.00
3	4.2	3.2	76.19
4	4.0	3.2	80.00
		Promedio	76.98
Muestra: Calle Manuel Larrea			
1	4.2	3.4	80.95
2	4.2	3.4	80.95
3	4.5	0.3	6.67
4	4.1	3.5	85.37
		Promedio	63.48
Muestra: Calle Bogotá			
1	4.2	3	71.43
2	4.3	3.1	72.09
3	4.1	3	73.17
4	4.2	3.2	76.19
		Promedio	73.22
	<i>Promedio global (%)</i>		<i>72.00</i>

3.4.5 Ensayo para determinar la densidad aparente (peso unitario) e índice de huecos. – ASTM C29-

Este método permite determinar la densidad aparente del material granular en estado compacto o suelto si está compuesto por material fino, grueso o mezcla de los dos.

3.4.5.1 Equipo.

- Balanza con precisión mínima de 0.05 gr.
- Varilla compactadora de aproximadamente 16mm de diámetro.
- Recipientes de medida metálico y cilíndricos.
- Pala o cuchara.

- Equipo de calibración.
- Horno con capacidad de mantener la temperatura a $110 \pm 5^\circ\text{C}$.

3.4.5.2 Procedimiento.

- Seque la muestra en horno a $110 \pm 5^\circ\text{C}$.

3.4.5.2.1 Peso unitario material granular compactado.

- Coloque la muestra en el recipiente, utilice tres capas similares de tamaño hasta llenarlo.



Figura 43. Colocación material en cilindro metálico en 3 capas– Ensayo determinación peso unitario

- Para cada capa, apisona con 25 golpes de varilla distribuidos en toda la muestra.
- Al apisonar la primera capa no llegue al fondo, en las siguientes utilizar la fuerza suficiente para que la varilla atraviese la capa respectiva. ´
- Compacte la tercera capa, enrasede la superficie.



Figura 44. Enrasado en cilindro metálico después de ser compactado – Ensayo determinación peso unitario

- Pese y registre el peso del recipiente lleno.

3.4.5.2.2 *Peso unitario material granular suelto.*

- Coloque la muestra en el recipiente, utilice tres capas similares de tamaño hasta llenarlo.



Figura 45. Colocación material fresado suelto en cilindro metálico– Ensayo determinación peso unitario

- Enrase la superficie.
- Pese y registre el peso del recipiente lleno.

3.4.5.3 Cálculos.

Se calculó el peso unitario de la siguiente manera.

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

o

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

dónde,

M: peso unitario o densidad aparente (gr/cm^3)

G: masa muestra y recipiente (gr)

T: masa recipiente (gr)

V: volumen del recipiente (cm^3)

F: factor del recipiente (cm^{-3})

3.4.5.4 Resultados.

Tabla 47. Resultados ensayo peso unitario seco suelto fresado

Peso volumétrico seco suelto		
Peso molde	6719	gr
Peso suelo y molde	26856	gr
Peso suelo seco	20137	gr
Volumen molde	13965	cm ³
<i>Peso Unitario</i>	<i>1.442</i>	<i>gr/cm³</i>

Tabla 48. Resultados ensayo peso unitario seco compactado fresado

Peso volumétrico seco compactado		
Peso molde	6719	gr
Peso suelo y molde	28678	gr
Peso suelo seco	21959	gr
Volumen molde	13965	cm ³
<i>Peso Unitario</i>	<i>1.572</i>	<i>gr/cm³</i>

3.4.6 Ensayo determinación gravedad específica y absorción del material granular grueso – ASTM C 127.

Este ensayo permite determinar la gravedad específica bulk, gravedad específica saturada, gravedad específica superficialmente seca y la absorción del material granular.

3.4.6.1 Equipo.

- Balanza con precisión mínima de 0.5 gr.
- Canasta metálica con capacidad de 4 a 7 litros.
- Tanque de agua.
- Dispositivo de suspensión.
- Tamiz No. 4 (4.75mm).
- Horno con capacidad de mantener una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Tela o paño absorbente.

3.4.6.2 Procedimiento.

- Tome una muestra y separe el material que se retiene en el tamiz No.4.
Tome la cantidad mínima de muestra que se indica en la norma de acuerdo con el tamaño máximo nominal del material granular.
- Seque la muestra en horno a temperatura $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta obtener masa constante, deje enfriar a temperatura ambiente alrededor de 1 a 3 horas.
- Sumerja la muestra en agua a temperatura ambiente aproximadamente entre 15 y 19 horas.
- Saque la muestra del agua y seque por secciones pequeñas o individualmente el material granular con una tela absorbente hasta retirar el agua superficial visible. Pese la masa y registre como peso en estado saturada con superficie seca (ssd).

- Coloque la muestra en el interior de la canasta metálica y determine el peso con la masa sumergida en suspensión en el tanque de agua. El agua del tanque debe tener una temperatura de $23 \pm 1.7^{\circ}\text{C}$ y densidad de $0.997 \pm 0.002 \text{ kg/m}^3$.
- Retire la muestra del tanque y coloque en el horno a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta masa constante, deje enfriar a temperatura ambiente alrededor de 1 a 3 horas. Pese la muestra y registre la masa como peso seco.

3.4.6.3 Cálculos.

Se obtuvieron las gravedades específicas con las siguientes fórmulas.

$$\text{Gravedad específica bulk, } gr = \frac{A}{B - C}$$

$$\text{Gravedad específica bulk saturada superficie seca, } gr = \frac{B}{B - C}$$

$$\text{Gravedad específica bulk aparente, } gr = \frac{A}{A - C}$$

$$\text{Absorción, \%} = \left(\frac{B - A}{A} \right) \times 100$$

dónde,

A: masa muestra seca en horno (gr).

B: masa muestra saturada superficie seca (gr).

C: masa muestra saturada sumergida en agua (gr).

3.4.6.4 Resultados.

Tabla 49. Resultados ensayo gravedad específica fresado grueso

Variable	Peso	Cantidad	Unidades
A	Muestra secada en horno	4858	gr
B	Muestra con superficie saturada seca	5000	gr
C	Muestra sumergida en agua	2822	gr
Densidad Relativa = $A/(B-C)$		2.23	gr
Densidad Relativa (ssd) = $B/(B-C)$		2.30	gr
Densidad Relativa Aparente = $A/(A-C)$		2.39	gr
Absorción = $[(B-A)/A] \times 100$		2.9	%

3.4.7 Ensayo determinación gravedad específica y absorción del material granular fino – ASTM C 127.

Este ensayo permite determinar la gravedad específica bulk, gravedad específica bulk aparente, gravedad específica bulk saturada superficie seca y la absorción del material granular fino.

3.4.7.1 Equipo.

- Balanza con precisión de 0.1 gr.
- Picnómetro.
- Molde metálico cónico.
- Pisón o varilla metálica con diámetro de 25 ± 3 mm con masa de 340 ± 15 gr.
- Horno con capacidad de mantener temperatura constante de $110 \pm 5^\circ\text{C}$.
- Tamiz No.4 (4.75mm).

3.4.7.2 Procedimiento.

- Tome una muestra que pase por el tamiz No. 4 de alrededor de 1 kg.
- Seque en horno a temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta obtener al pesar masa constante. Enfríe a temperatura ambiente y sumerja la muestra en agua por 15 a 19 horas.
- Saque la muestra del agua, y con cuidado para no perder material fino, y extienda sobre una superficie plana no absorbente.
- Seque las partículas superficialmente al aire libre o con una corriente de aire caliente para acelerar el secado, pero sin secar la muestra completamente. Si la muestra está muy seca agregue muy poca agua y homogenice.
- Coloque la muestra en el cono, cuando este está sujetado firmemente sobre una superficie plana y no absorbente.



Figura 46. Colocación material fresado suelto en cilindro metálico– Ensayo determinación peso unitario

- Apisone con 25 golpes con la varilla, deben realizarse por efecto de la gravedad los golpes.

- Levante el cono verticalmente y observe:
 - Si hay humedad superficial presente, la forma cónica se mantendrá.
 - Si hay saturación con superficie seca, la forma cónica se desmoronará superficialmente.



Figura 47. Forma cónica por levantamiento de cono– Ensayo determinación gravedad específica material fino

- Llene el picnómetro con agua parcialmente e introduzca 500 ± 10 gr de material fino saturado superficialmente seco. Añada más gua hasta llenar el 90% del picnómetro.



Figura 48. Picnómetro con material fino y agua– Ensayo determinación gravedad específica material fino

- Elimine el aire haciendo rodar sobre una superficie el picnómetro y agite y si es necesario invierta su posición hasta quitar todas las burbujas presentes.



Figura 49. Eliminación de aire del picnómetro– Ensayo determinación gravedad específica material fino

- Si es necesario, introduzca en baño de agua el picnómetro para obtener una temperatura de $23 \pm 1.7^{\circ}\text{C}$, enrase el picnómetro con agua de igual temperatura, seque la superficie y registre la masa total, que considera al picnómetro, agua y muestra.
- Remueva el agregado fino del picnómetro, seque en horno a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ y deje enfriar a temperatura ambiente entre 60 y 90 minutos y registre su peso.
- Determine la masa del picnómetro lleno con agua, a una temperatura de $23 \pm 1.7^{\circ}\text{C}$.

3.4.7.3 Cálculos

Se obtuvo las gravedades específicas de la siguiente manera.

$$\text{Gravedad específica bulk, gr} = \frac{A}{(B + S - C)}$$

$$\text{Gravedad específica bulk saturada superficie seca, gr} = \frac{S}{(B + S - C)}$$

$$\text{Gravedad específica bulk aparente, gr} = \frac{A}{(B + A - C)}$$

$$\text{Absorción, \%} = \left(\frac{S - A}{A} \right) \times 100$$

dónde,

A: masa muestra seca en horno (gr).

B: masa picnómetro lleno con agua (gr).

S: masa muestra saturada superficie seca (gr).

C: masa picnómetro, muestra y agua (gr).

3.4.7.4 Resultados.

Tabla 50. Resultados ensayo gravedad específica fresado fino

Variable	Peso	Cantidad	Unidades
A	Muestra seca en horno	480	gr
B	Picnómetro lleno de agua	652.74	gr
S	Muestra superficie saturada seca	500	gr
C	Picnómetro con muestra y agua	934.41	gr
Densidad Relativa = A/(B+S-C)		2.20	gr
Densidad Relativa (ssd) = S/(B+S-C)		2.29	gr
Densidad Relativa Aparente = A/(B+A-C)		2.42	gr
Absorción = [(S-A)/A]x100		4.2	%

3.4.8 Determinación del porcentaje de vacíos de material granular – ASTM C29.

Este método permite determinar el porcentaje de vacíos presente en material granular. Para este ensayo se necesitan los resultados de peso unitario y gravedad específica del material granular.

3.4.8.1 Cálculos.

Se calculó el porcentaje de vacíos como:

$$\text{Vacíos, \%} = \frac{100[(S \times W) - M]}{S \times W}$$

Dónde,

M: densidad aparente o peso unitario (gr/cm^3)

S: gravedad específica para agregados gruesos y finos

W: densidad del agua ($0.998 gr/cm^3$)

3.4.8.2 Resultados

Tabla 51. Resultados ensayo porcentaje de vacíos fresado material grueso

Datos	Valor	Unidades
Peso unitario	1.572	gr/cm ³
Gravedad específica seca en horno	2.230	gr
Densidad del agua	0.998	gr/cm ³
<i>Vacíos</i>	<i>29.37</i>	<i>%</i>

Tabla 52. Resultados ensayo porcentaje de vacíos fresado material fino

Datos	Valor	Unidades
Peso unitario	1.572	gr/cm ³
Gravedad específica seca en horno	2.200	gr
Densidad del agua	0.998	gr/cm ³
<i>Vacíos</i>	<i>28.40</i>	<i>%</i>

3.4.9 Ensayo Proctor modificado - ASTM 180.

Este ensayo permite determinar la relación entre humedad y masa unitaria en un molde de tamaño normado que es compactado con un martillo de 4.54 kg que cae desde una altura de 457mm. De acuerdo al tamaño del material granular existen diferentes métodos, el utilizado para el fresado de este trabajo es el método B.

3.4.9.1 Equipo.

- Moldes cilíndrico metálicos de 152.4 mm de diámetro.
- Martillo metálico manual de diámetro de 50.08 ± 0.25 mm.
- Cara del martillo, de diámetro de 50.08 ± 0.25 mm.
- Dispositivo para extracción de las muestras.
- Balanza de capacidad de medición de 5 kg y precisión de 0.1 gr.
- Horno con capacidad de mantener una temperatura constante de $110 \pm 5^\circ\text{C}$.
- Regla metálica, de al menos de 250mm de largo.
- Tamices de 2 pulgadas, $\frac{3}{4}$ de pulgada y de 4.75mm.
- Recipientes metálicos.
- Espátulas o cucharas.

3.4.9.2 Procedimiento.

- Tamice una muestra de material granular de alrededor de 7 kg pasando por el tamiz No.4.
- Mezcle la muestra con agua suficiente solo para humedecerla alrededor de un 4% menos del contenido óptimo de agua.



Figura 50. Mezcla con agua del material granular– Ensayo Proctor modificado

- Llene el molde metálico en cinco capas de cantidad similar, cada capa golpee 56 veces distribuidos de manera uniforme con el martillo modificado. Mantenga el molde firme durante todo el proceso.



Figura 51. Apisonamiento de 56 golpes probeta– Ensayo Proctor modificado

- Remueva el collar de extensión del molde, y enrasede la superficie del molde con una regla o varilla.



Figura 52. Enrasado de molde – Ensayo Proctor modificado

- Pese el molde y registre su valor.
- Saque la muestra compactada del molde y corte por la mitad de este. Tome una muestra pequeña de alrededor de 300 gr de una de las caras de corte y lleve al horno a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ para su secado aproximadamente de 12 horas o hasta obtener pesos de masa constante.



Figura 53. Muestra molde compactado – Ensayo Proctor modificado

- Se deshace la restante de la muestra y se homogeniza, se agrega un poco más de agua y se repite todo el procedimiento anterior. Haga esto hasta que no obtenga variaciones en la masa unitaria húmeda.

3.4.9.3 Cálculos.

Los cálculos de este ensayo contemplan la determinación del porcentaje de humedad y densidad seca de la siguiente forma.

$$w = \frac{A - B}{B - C} \times 100$$

$$W = \frac{W_1}{w + 100} \times 100$$

dónde,

w: porcentaje de humedad (%)

A: masa molde y muestra húmeda (gr)

B: masa molde y muestra seca (gr)

C: masa molde (gr)

W: densidad seca (gr/cm³)

W1: densidad húmeda (gr/cm³)

3.4.9.4 Resultados.

Tabla 53. *Datos ensayo Proctor modificado fresado*

Dato	Molde 1	Molde 2	Molde 3
Peso suelo húmedo + molde (A), gr	9802	10085	9925
Peso del molde (B), gr	5639	5639	5639
Peso suelo húmedo (C=A-B), gr	4163	4446	4286
Volumen del molde (D), cm ³	2068	2068	2068
Densidad húmeda (E=C/D), gr/cm ³	2.013	2.150	2.073

Tabla 54. Cálculos ensayo Proctor modificado fresado

Dato	4A	12B	3B	33A	11A	7B
Tarro + suelo húmedo (F), gr	76.97	76.38	82.81	74.63	84.45	79.22
Tarro + suelo seco (G), gr	74.18	73.62	77.92	70.30	78.26	73.59
Peso de agua (H=F-G), gr	2.79	2.76	4.89	4.33	6.19	5.63
Peso del tarro (I), gr	17.65	18.08	17.96	18.11	17.83	17.67
Peso del suelo seco (J=G-I), gr	56.53	55.54	59.96	52.19	60.43	55.92
Contenido de agua (K=H/J), %	4.94%	4.97%	8.16%	8.30%	10.24%	10.07%
Contenido de agua promedio (L), %	4.95%		8.23%		10.16%	
Densidad seca (M), gr/cm ³	1.918		1.986		1.881	

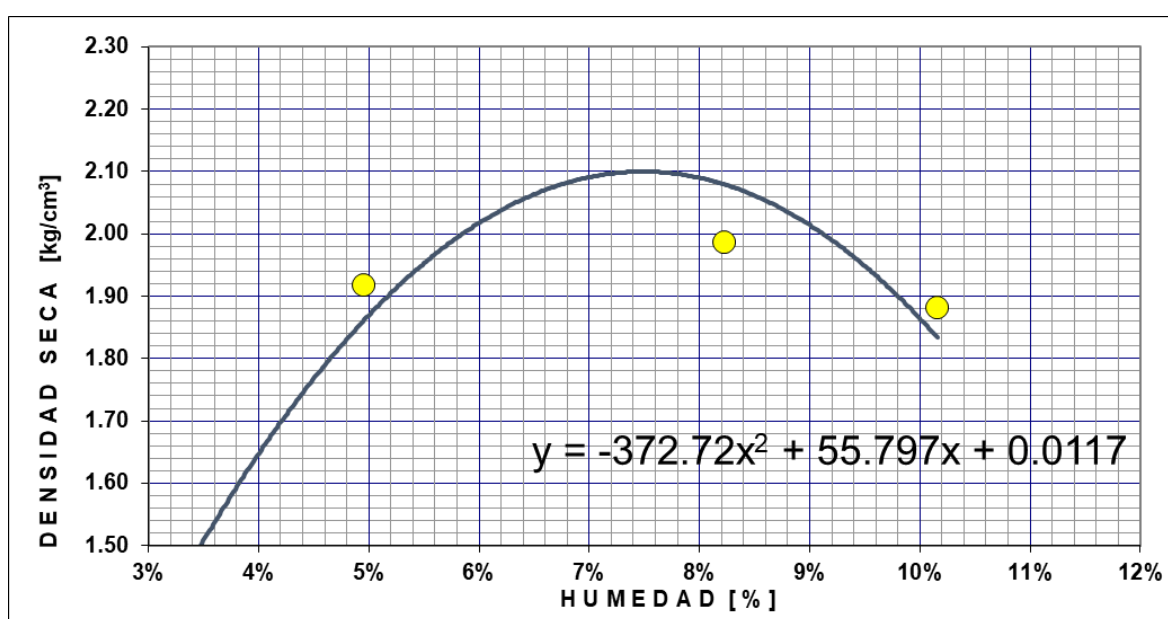


Figura 54. Curva densidad seca con respecto al porcentaje de humedad– Ensayo Proctor modificado

Tabla 55. Resultados ensayo Proctor modificado fresado

Densidad máxima (g/cm ³)	Humedad óptima (%)
2.100	7.49

3.4.10 Ensayo determinación del límite plástico – INEN 692.

Este ensayo permite la determinación del límite plástico del material granular y solo se realiza para el material que pasa el tamiz No. 40. Consiste en determinar el contenido de agua del material entre su comportamiento plástico y sólido.

Como se trata de material granular con residuos de asfalto se esperó que en este ensayo el resultado sea un material no plástico.

3.4.10.1 Equipo.

- Plato o fuente de mezclado
- Espátula
- Placa de rolado
- Varilla de calibración
- Equipo para determinar el contenido de agua.
- Recipiente con agua destilada.

3.4.10.2 Procedimiento.

- Tome una muestra de al menos 100 gr que haya pasado por el tamiz No. 40.
- Añada agua destilada en pequeñas cantidades, hasta obtener una pasta de suelo homogéneo.



Figura 55. Mezcla homogénea con agua– Ensayo límite plástico

- Tome alrededor de 10 gr de muestra y moldéela con los dedos en forma esférica y luego amase con las palmas de las manos hasta que se presencien pequeñas fisuras.
- Utilice presión suficiente para formar un rollo de 3mm de diámetro con una velocidad de 80 a 90 movimientos por minuto. Si el rollo no se fisura, amáselo nuevamente y repita el proceso hasta que el rollo llegue a los 3mm y se corte de manera vertical y horizontal.



Figura 56. Resultado rollos de mezcla homogénea– Ensayo límite plástico

- Recoja los pedazos de rollo en un recipiente metálico y determine el contenido de agua de acuerdo con la Norma INEN 690.

3.4.10.3 Cálculos.

El valor del límite plástico será el promedio de los contenidos de agua determinados para varias muestras.

3.4.10.4 Resultados.

El material granular al ser árido con residuos de asfalto, no absorbe agua como un suelo ni tampoco presenta material arcilloso en su contenido, por lo que no se puede determinar el límite plástico y se determina que es un material NO PLÁSTICO.

3.4.11 Extracción cuantitativa de asfalto residual – ASTM D 2172-05.

Este ensayo permite obtener cuantitativamente el porcentaje de asfalto en muestras de pavimento. Consiste en extraer mediante una solución química el ligante de la muestra aplicando una diferencia de masas entre agregado extraído, contenido de humedad y del material mineral original.

3.4.11.1 Equipo.

- Horno con capacidad de mantener la temperatura a $110 \pm 5^\circ\text{C}$.
- Recipiente plano.
- Balanza.
- Reactivo tricloroetileno.
- Equipo de extracción: centrifugadora.
- Filtros en forma de anillo.

3.4.11.2 Procedimiento.

- Desagregue el material granular, para ello se parte o cuartea si es necesario.
- La cantidad de muestra depende del tamaño máximo nominal del agregado.
- Determine la humedad del material.
- Coloque la porción de ensayo en la taza del equipo de extracción y cubra la muestra con el químico, dejando el tiempo necesario para que este desintegre la muestra, sin sobrepasar una hora.



Figura 57. Colocación de químico en taza del equipo– Ensayo extracción asfalto residual

- Determine la masa del filtro a usarse y coloque sobre la taza del equipo de extracción.



Figura 58. Pesaje papel filtro– Ensayo extracción asfalto residual

- Cierre el equipo de extracción, ajustando la tapa sobre la taza y coloque un recipiente en el desagüe del equipo para recoger el residuo.



Figura 59. Armado de centrifugadora– Ensayo extracción asfalto residual

- Prenda la centrifugadora e inicialmente disponga una velocidad lenta y gradualmente suba la velocidad sin sobrepasar 3600 rpm, hasta que no salga ningún residuo por el desagüe.

- Adicione las veces necesarias el solvente sobre la muestra, hasta que el material extraído tenga un color oscuro ligero de paja.
- Remueva de la taza el material y el filtro cuidadosamente a un recipiente. Seque la muestra a temperatura ambiente y posteriormente en horno a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Pese la muestra resultante, así como también el peso del filtro después de la extracción.



Figura 60. Material granular después de la extracción– Ensayo extracción asfalto residual



Figura 61. Pesaje papel filtro después de la extracción– Ensayo extracción asfalto residual

3.4.11.3 Cálculos.

$$\% \text{ asfalto residual} = \frac{(A - B) - (D - C)}{A} \times 100$$

Dónde,

A: peso muestra antes del ensayo

B: peso muestra después del ensayo

C: peso filtro antes del ensayo

D: peso filtro después del ensayo

3.4.11.4 Resultados.

Tabla 56. Resultados ensayo porcentaje asfalto residual en fresado

Variable	Peso	Cantidad	Unidades
Muestra 1			
A	Muestra inicial	1200	gr
B	Muestra final	1131.21	gr
C	Filtro inicial	11.78	gr
D	Filtro final	14.39	gr
% residual de asfalto = [(A-B)-(D-C)]/(A)		5.52	%
Muestra 2			
A	Muestra inicial	1200	gr
B	Muestra final	1125.97	gr
C	Filtro inicial	11.49	gr
D	Filtro final	15.20	gr
% residual de asfalto = [(A-B)-(D-C)]/(A)		5.86	%
Muestra 3			
A	Muestra inicial	1200	gr
B	Muestra final	1129.52	gr
C	Filtro inicial	11.89	gr
D	Filtro final	14.51	gr
% residual de asfalto = [(A-B)-(D-C)]/(A)		5.66	%
% residual asfalto promedio		5.68	%

3.4.12 Resumen resultados caracterización del material granular reciclado.

En esta sección se presenta una tabla resumen de los resultados obtenidos en los ensayos de caracterización del material granular receptado por el proceso de fresado.

Tabla 57. *Resumen de resultados ensayos de caracterización fresado*

Ensayo	Norma	Mín.	Máx.	Resultados
<i>Fresado</i>				
Índice de plasticidad (TAMIZ NO. 40)	INEN 691 692	-	4	No plástico
Equivalente de arena	ASTM D2419	35	-	71.23
Graduación	MOP	-	-	Clase C
Peso específico fresado grueso, gr	ASTM C127	-	-	2.23
Peso específico fresado fino, gr	ASTM C128	-	-	2.2
Absorción fresado grueso, %	ASTM C127	-	-	2.9
Absorción fresado fino, %	ASTM C128	-	-	4.2
Peso volumétrico seco suelto, gr/cm ³	ASTM C29	-	-	1.442
Peso volumétrico seco compacto, gr/cm ³	ASTM C29	-	-	1.572
Densidad máxima, g/cm ³	ASTM D1557 (C)	-	-	2.1
Humedad óptima, %	ASTM D1557 (C)	-	-	7.49
<i>Residuo</i>				
Contenido de ligante, %	ASTM D2172	-	-	5.68

3.5 Diseño de mezcla

Una vez desarrollada la caracterización de la emulsión asfáltica y el material granular del fresado mediante los ensayos realizados se procede a la realización de diseño de mezcla siendo el objetivo principal mezclar estos elementos tomando en cuenta adicionar agua en dosis adecuadas que garanticen calidad en su resultado.

Se debe tomar en cuenta que se debe proporcionar una cantidad suficiente de asfalto que cubra el material reciclado y que se garantice una determinada estabilidad para resistencia al tráfico sin la obtención de deformaciones fuera de lo permitido, una mínima cantidad de vacíos para mantener la estabilidad y por último una buena trabajabilidad para su aplicación en obra, así como también buenos resultados en su compactación.

3.5.1 Determinación del porcentaje teórico de emulsión para fresado.

El método utilizado es el Método de Duriez desarrollado por Marius Duriez quién planteó que el ligante utilizado en una mezcla bituminosa solo debe recubrir a los áridos y que dependía del espesor de la capa de bitumen y el diámetro del árido. Así, mediante el cálculo de la superficie específica (Σ), que es el área superficial de los áridos, se obtiene el contenido de ligante en porcentaje necesario para envolver al material granular.

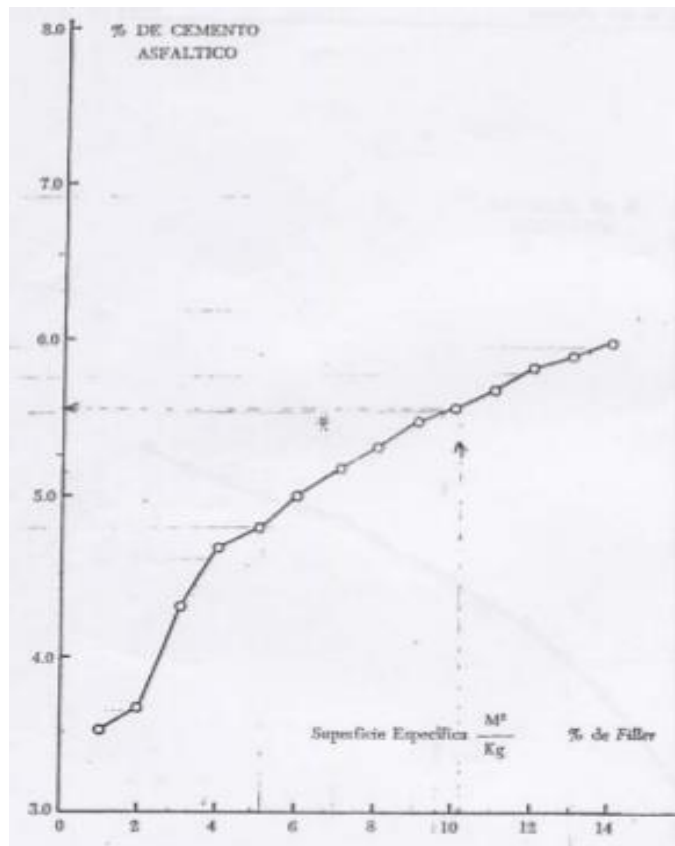


Figura 62. Gráfica Método Duriez - Porcentaje de cementos asfálticos vs superficie específica

Con el valor de Σ obtenido se utilizó la Figura 57 para determinar el porcentaje de cemento asfáltico.

La metodología usada se relacionó de acuerdo con lo expuesto por Bracho (2002) y la norma colombiana INV E - 738. Inicialmente se determina el factor de superficie específica (FSE) mediante la siguiente ecuación:

$$F.S.E., m^2/kg = \frac{2.5}{\sqrt{D \times d}}$$

dónde,

D: tamaño máximo del material granular (diámetro en mm)

d: tamaño mínimo del material granular (diámetro en mm)

Se utiliza esta ecuación para cada fracción del material granular y se obtiene cada factor que multiplica a cada porcentaje retenido en los tamices específicos usados para

determinar la granulometría dando como resultado la superficie específica tomando en cuenta todo el material granular.

$$\Sigma = \frac{FSE1 \times \%Ret1 + FSE2 \times \%Ret2 + FSE3 \times \%Ret3 + \dots}{100}$$

Se muestra a continuación los factores de superficie específica para los tamices escogidos.

Tabla 58. *Resultado cálculo del factor de superficie específica*

No. Tamiz	Tamaño del agregado	Porcentaje de la masa seca del agregado	F.S.E
3/4 – No. 4	19.0mm – 4.75mm	A	0.2631
No. 4 – No. 40	4.75mm – 425µm	B	1.7595
No. 40 – No. 200	425µm – 75µm	C	14.0028
<No. 200	<75µm	D	118.00

Para calcular Σ se utilizó la fórmula que se muestra a continuación.

$$\Sigma = \frac{1}{100} [0.26A + 1.76B + 14.00C + 118.00D]$$

dónde,

A: porcentaje retenido entre tamiz de 3/4 pulgadas y No. 4

B: porcentaje entre tamiz No.4 y No. 40

C: porcentaje retenido entre tamiz No. 40 y No. 200

D: porcentaje pasante tamiz No.200

3.5.1.1 Cálculos.

Para la granulometría del fresado de estudio se obtuvo que:

Tabla 59. *Porcentajes retenidos por tamiz - Método Duriez*

Tamiz	% Retenido Acumulado
¾ pulgadas	5.04
No. 4	38.18
No. 40	84.64
No. 200	97.30
Pasante No. 200	100

Tabla 60. Coeficientes porcentajes retenidos - Método Duriez

Coeficiente	Valor
A	33.14
B	46.46
C	12.66
D	2.70

$$\Sigma = \frac{1}{100} [0.26(33.14) + 1.76(46.46) + 14.00(12.66) + 118.00(2.70)]$$

$$\Sigma = 5.86 \text{ m}^2/\text{kg}$$

Con este valor se ingresa a la curva del Cuadro 5.1 y se obtiene el porcentaje de cemento asfáltico.

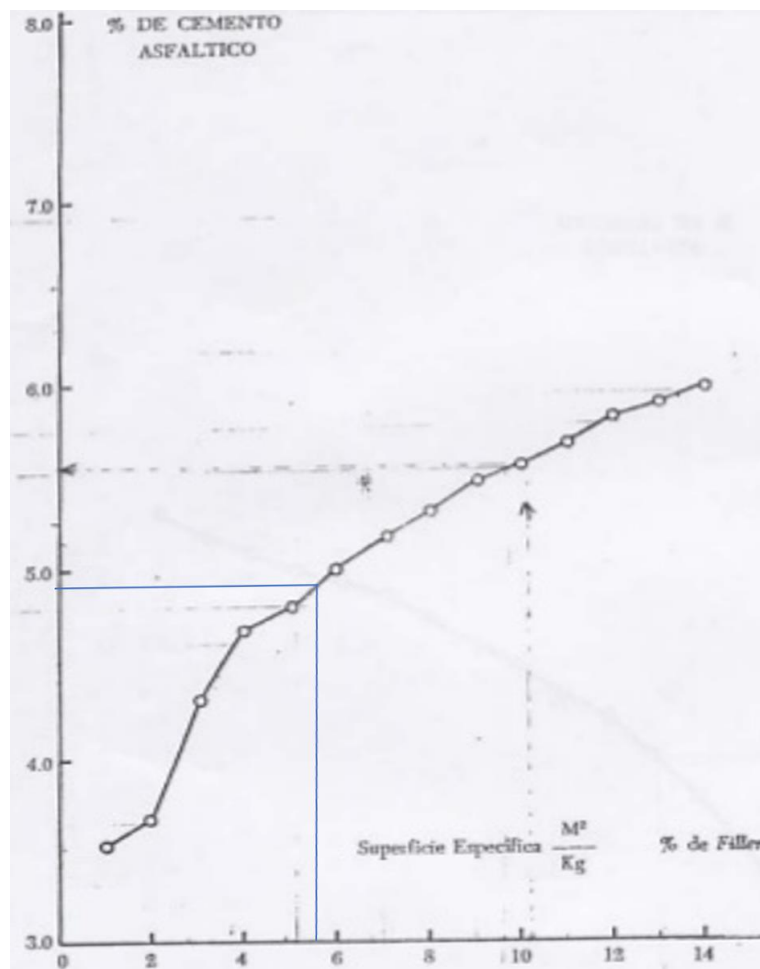


Figura 63. Solución Gráfica Método Duriez

$$\%C.A. = 4.95$$

El porcentaje de bitumen obtenido se transformó a porcentaje de emulsión con la ecuación que se muestra a continuación.

$$\% \text{ Emulsión} = \frac{\% C. A.}{\% \text{ de residuo en emulsión}}$$

De acuerdo con el ensayo de porcentaje de residuo, el porcentaje de emulsión para los tres tipos de emulsión fue:

Tabla 61. *Porcentajes de residuo de asfalto en emulsiones*

Tipo emulsión	% Residuo
CSS-1h EMULDEC	58.0%
CSS-1h modificada EMULDEC	58.1%
CSS-1h IMPTEK- CHOVA del Ecuador	59.4%

El porcentaje de emulsión para la mezcla, dependiendo del tipo de emulsión es:

Tabla 62. *Porcentaje de emulsión teórico por tipo de emulsión*

Tipo emulsión	% emulsión teórica
CSS-1h EMULDEC	8.53%
CSS-1h modificada EMULDEC	8.52%
CSS-1h IMPTEK- CHOVA del Ecuador	8.33%

Este método no considera diferencias entre el uso de un material granular nuevo y uno reciclado, por lo tanto, se obtienen valores de emulsión elevados en comparación a lo que se usa o recomienda en la práctica.

Se debe considerar que se debe hacer una corrección por asfalto residual que posee ya el fresado en su composición. Este asfalto, aunque ya este envejecido sigue aportando cohesión a la mezcla asfáltica y por ello se la debe tomar en cuenta. Se consideró la siguiente ecuación para obtener el porcentaje de emulsión efectiva estipulada en estudios realizados por la empresa Auscultar Ltda que se basa en la metodología de Duriez.

$$\% E_{efectiva} = \% E - \frac{\% A_{fresado}}{2}$$

dónde,

$\%E_{efectiva}$: porcentaje efectivo de emulsión asfáltica

$\%E$: porcentaje teórico de emulsión

$\%A_{fresado}$: porcentaje de asfalto en el fresado (5.68%)

Tabla 63. *Porcentaje de emulsión efectiva por tipo de emulsión*

Tipo de emulsión	% efectivo de emulsión
CSS-1h EMULDEC	5.69%
CSS-1h modificada EMULDEC	5.68%
CSS-1h IMPTEK- CHOVA del Ecuador	5.49%

Se puede aproximar que el porcentaje efectivo para emulsión está entre el 5 al 6% para los tres tipos de emulsión.

3.5.2 Determinación de la cantidad de agua para la mezcla

Es muy importante optimizar la cantidad de agua a utilizar en la mezcla con el objetivo de obtener una mezcla de diseño óptima. La cantidad de agua se calculó con la siguiente ecuación.

$$cantidad\ agua, gr = Peso_{muestra} \times \left(\frac{H_{\acute{o}pt} + 1}{1 + H_{inicial}} - 1 \right)$$

Dónde,

$Peso_{muestra}$: peso en gramos del material granular a mezclar

$H_{\acute{o}pt}$: humedad óptima del fresado

$H_{inicial}$: humedad inicial fresado

Por lo general, esta información se obtiene al realizar el ensayo Proctor Modificado.

Tabla 64. Datos para determinación de cantidad de agua

Datos	Valor
Peso muestra, gr	1200
Humedad óptima, %	7.49
Humedad inicial, %	4.14

La cantidad de agua para la mezcla, dependiendo del tipo de emulsión es:

$$cantidad\ agua, gr = 1200 \times \left(\frac{7.49/100 + 1}{1 + 4.14/100} - 1 \right)$$

$$cantidad\ agua, gr = 38.602$$

Se debe considerar que se debe hacer una corrección por asfalto residual que posee ya el fresado en su composición. Se consideró la siguiente ecuación para obtener el porcentaje de emulsión efectiva.

$$Cant. Agua_{efectiva} = Cant. Agua_{teórica} - \frac{\%A_e}{\% residuo\ en\ emulsión}$$

dónde,

Cant. Agua_{efectiva}: cantidad de agua efectiva para la mezcla

Cant. Agua_{teórica}: cantidad de agua teórica calculada

%A_e: porcentaje de agua en la emulsión (Tabla 5 y Tabla 6)

% residuo: porcentaje de residuo de asfalto en la emulsión (Tabla 60)

Tabla 65. Cantidad de agua efectiva para mezcla con emulsiones asfálticas

Tipo de emulsión	Cantidad agua (gr)
CSS-1h EMULDEC	37.968
CSS-1h modificada EMULDEC	36.969
CSS-1h IMPTEK- CHOVA del Ecuador	36.938

El valor de aproximadamente 37 gramos para una muestra de 1200gr, representa un porcentaje aproximado del 3% de agua lo cual se va a utilizar como dato referente para el diseño de mezcla.

3.5.3 Determinación del contenido óptimo de emulsión asfáltica (Método Marshall) – ASTM 1559.

Este método permite determinar la resistencia a la deformación plástica de muestras cilíndricas de mezclas asfálticas para pavimentos, empleando el equipo Marshall. También permite encontrar el porcentaje óptimo de asfalto, el cual está dado por el valor que proporciona la estabilidad y densidad Bulk máximas.

Consiste en la fabricación de briquetas, de 101.6mm de diámetro de 63.5mm de altura, con diferentes contenidos de ligante que se llevan a la rotura por medio de una prensa con el objetivo de determinar su estabilidad y deformación.

La estabilidad se obtiene empleando el principio de corte en compresión semi-confinada, sometiendo la probeta a esfuerzos de compresión en su diámetro. Este valor indica la resistencia estructural de la mezcla compactada y se encuentra directamente relacionada con el contenido de asfalto, granulometría, y clase de material granular. La estabilidad muestra la capacidad de resistencia al desplazamiento y deformaciones para las cargas de tránsito siendo dependiente de la fricción y cohesión de las partículas de la mezcla.

A su vez, el flujo indica la deformación producida en la dirección paralela al diámetro antes de que se produzca la fractura. Este se considera un indicador de la tendencia a alcanzar una condición plástica y de la resistencia a deformarse bajo la acción de cargas de tránsito.

3.5.3.1 Equipo.

- Moldes para probetas.
- Extractor de probetas.
- Martillo de compactación manual o automático.
- Pedestal de compactación.

- Sujetador para el molde.
- Mordaza y medidor de deformación.
- Prensa.
- Medidor de estabilidad.
- Elementos de calefacción.
- Mezcladora.
- Tanque para agua.
- Tamices.
- Termómetros.
- Balanzas con capacidad de 5 kg y precisión de 0.1gr.
- Guantes térmicos.
- Tiza o crayón.
- Bandeja metálica.

3.5.3.2 Preparación de materiales.

- Se realizan varias probetas para una constante granulometría, original o mezclada, con diferentes contenidos de asfalto.
- De acuerdo con el número de contenidos de asfalto a realizar se necesitan el triple de número de probetas. Para cada probeta se emplean aproximadamente 1200 gr.
- El material granular debe estar a temperatura ambiente.
- Pese en bandejas diferentes, una para cada fracción de muestra, las cantidades de cada porción del material granular de acuerdo con la gradación específica de las probetas.

3.5.3.3 Procedimiento elaboración probetas

- En el recipiente de mezcla, sitúe el material granular y realice un cráter en el centro de este. Coloque la cantidad de asfalto requerida de emulsión y mezcle de manera rápida hasta conseguir una mezcla homogénea donde todo el material granular este recubierto por el bitumen.



Figura 64. Mezcla de material fresado con emulsión asfáltica – Ensayo de estabilidad Marshall

- Arme el conjunto de compactación, una vez que estos hayan sido lavados y limpiados adecuadamente. Esto incluye las partes del molde, collar, placa base y base del martillo. Ubique un papel de filtro en el fondo del molde antes de ser insertada la muestra.



Figura 65. Armado del conjunto de compactación – Ensayo de estabilidad Marshall

- Coloque la muestra homogénea dentro del molde y golpee con una espátula 15 veces en el perímetro superficial y 10 veces en el interior. Retire el collar, alise la superficie con una espátula, vuelva a poner el collar con el sujetador sobre el pedestal de compactación. Coloque otro papel filtro en la superficie.
- Realice 50 golpes utilizando el martillo de compactación, mantenga el eje perpendicular a la base del molde.



Figura 66. Compactación de las probetas – Ensayo de estabilidad Marshall

- Retire la placa de base y el collar e invierta el molde, vuelva a montar el equipo y aplique el mismo número de golpes en la cara opuesta de la muestra.
- Una vez finalizada la compactación, retire la base y deje enfriar la muestra.



Figura 67. Resultado de compactación en briquetas – Ensayo de estabilidad Marshall

- Seque cuidadosamente la probeta, identifique con un nombre usando una tiza y deje en reposo durante una noche en horno a $163 \pm 5^\circ\text{C}$.
- Una vez transcurrido el tiempo, saque las probetas del horno y enfríe a temperatura ambiente por una hora. Pese las probetas en seco, sumergidas en agua y el peso saturado con superficie seca para la obtención de la densidad bulk.



Figura 68. Enfriamiento de probetas – Ensayo de estabilidad Marshall

3.5.3.4 Procedimiento ensayo de estabilidad y flujo

- Coloque las probetas en baño de agua aproximadamente entre 30 y 40 minutos o en horno durante dos horas a una temperatura de 60°C .

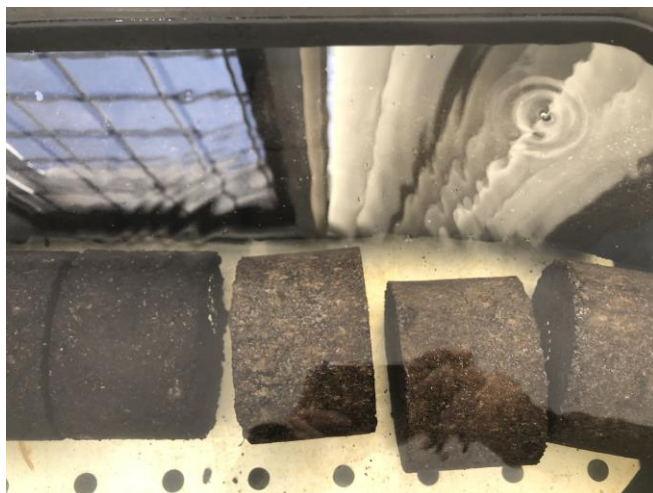


Figura 69. Baño de agua de probetas – Ensayo de estabilidad Marshall

- Retire una probeta del baño de agua u horno y coloque en la mordaza inferior, ubique la mordaza superior con el medidor de estabilidad y el medidor de flujo, ajuste a cero si es necesario y mantenga el vástago firme mientras se aplica la carga de ensayo hasta alcanzar la falla cuando la capacidad de carga máxima se haya alcanzado.



Figura 70. Colocación probeta en equipo Marshall– Ensayo de estabilidad Marshall

- Anote el valor del flujo en el instante en el que se alcanza la máxima capacidad de carga, el valor registrado de estabilidad deberá ser corregido por el factor de corrección que se especifica en la norma.
- El procedimiento anterior se realizará para cada probeta elaborada con diferente % de emulsión.

3.5.3.5 Cálculos.

El volumen de la briqueta se calculó como:

$$Volumen_{probeta} = P_{superficie\ seca} - P_{sumergida}$$

La densidad bulk se calculó como:

$$Densidad_{bulk} = \frac{P_{seco}}{Volúmen}$$

La estabilidad corregida se calculó como:

$$Estabilidad_{corregida} = Estabilidad_{medida} \times Factor \text{ corrección} \times Constante$$

La contante es una conversión de unidades entre kN a lbs-f, ya que el resultado obtenido en la máquina de ensayo es en kN, el valor de esta constante es de 224.81.

El factor de corrección está en función del volumen y el espesor de las probetas. A continuación, se muestra la tabla de factores de corrección utilizados.

Tabla 66. *Factores de corrección, relaciones para correlacionar estabilidades*

Factor de corrección	Volúmenes de las briquetas en c.c.														
1.79	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	
1.74	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379			
1.69	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392		
1.64	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405		
1.59	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417	418	419	420
1.54	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431				
1.49	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443			
1.44	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	456		
1.39	457	458	459	460	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470	
1.34	471	472	473	474	475	476	477	478	479	480	481	482			
1.29	483	484	485	486	487	488	489	490	491	492	493	494	495		
1.24	496	497	498	499	500	501	502	503	504	505	506	507	508		
1.19	509	510	511	512	513	514	515	516	517	518	519	520	521	522	
1.14	523	524	525	526	527	528	529	530	531	532	533	534	535		
1.09	536	537	538	539	540	541	542	543	544	545	546				
1.04	547	548	549	550	551	552	553	554	555	556	557	558	559		
1.00	560	561	562	563	564	565	566	567	568	569	570	571	572	573	
0.96	574	575	576	577	578	579	580	581	582	583	584	585			
0.93	536	537	538	539	540	541	542	543	544	545	546				
0.89	547	548	549	550	551	552	553	554	555	556	557	558	559		
0.86	560	561	562	563	564	565	566	567	568	569	570	571	572	573	

3.5.3.6 Resultados.

Para encontrar el porcentaje óptimo de emulsión de acuerdo con el método de Marshall, se realizaron 4 diferentes porcentajes de emulsión, para el mismo material granular fresado. Sin embargo, solo se utilizó un tipo de emulsión, la emulsión CSS-1h de EMULDEC para este cálculo ya que tanto la CSS-1h modificada de EMULDEC y la CSS-1h de IMPTEK tienen las mismas propiedades.

Tabla 67. Resultados ensayos de estabilidad y flujo

Muestra	% Emulsión	% Asfalto	Peso seco aire, gr	Peso superficie seca, gr	Peso sumergido, gr	Volumen c.c.	Densidad Bulk	Vacíos de aire. %	Factor corrección	Lectura dial, kN	Estabilidad corregida, lbs	Flujo, (1/100")	
1			1101.0	1118.0	533.0	585.0	1.882		0.86	23.56	4555	10	
2	3.00	1.80	1106.0	1124.0	541.0	583.0	1.897		0.86	22.35	4321	11	
3			1080.0	1098.0	522.0	576.0	1.875		0.86	23.21	4487	10	
			Promedio:					1.885	19.25			4454	10
4			1131.0	1136.0	547.0	589.0	1.920		0.86	25.10	4853	13	
5	4.00	2.40	1111.0	1117.0	540.0	577.0	1.925		0.86	25.38	4907	12	
6			1153.0	1160.0	557.0	603.0	1.912		0.86	24.98	4830	13	
			Promedio:					1.919	17.00			4863	13
7			1132.0	1137.0	551.0	586.0	1.932		0.86	23.89	4619	14	
8	5.00	3.00	1002.0	1007.0	487.0	520.0	1.927		1.19	21.84	5843	16	
9			1106.0	1114.0	543.0	571.0	1.937		0.86	24.16	4671	15	
			Promedio:					1.932	15.01			5044	15
10			1146.0	1152.0	554.0	598.0	1.916		0.86	24.69	4773	19	
11	6.00	3.60	1085.0	1091.0	526.0	565.0	1.920		0.86	25.82	4992	16	
12			1178.0	1184.0	571.0	613.0	1.922		0.86	24.33	4704	15	
			Promedio:					1.919	14.80			4823	17

Se graficó los resultados obtenidos para encontrar visualmente el porcentaje de asfalto óptimo para la mezcla final de diseño.

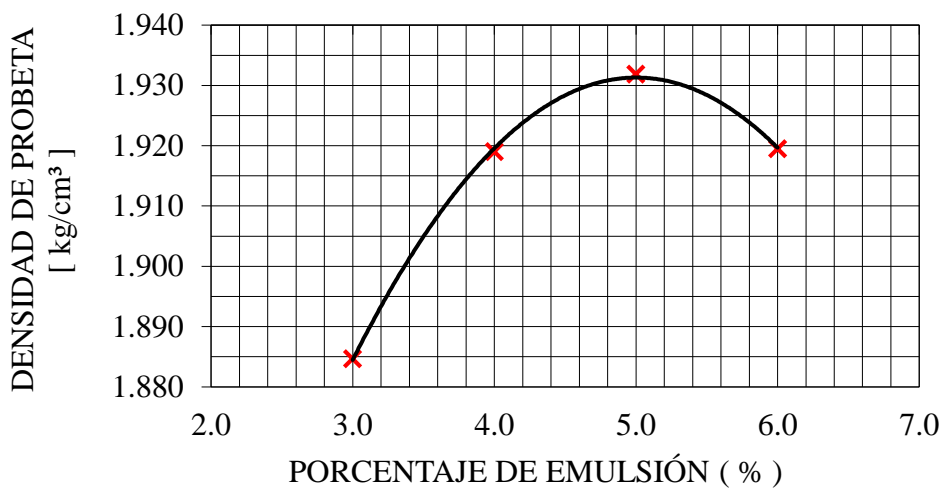


Figura 71. Relación porcentaje de emulsión y densidad bulk

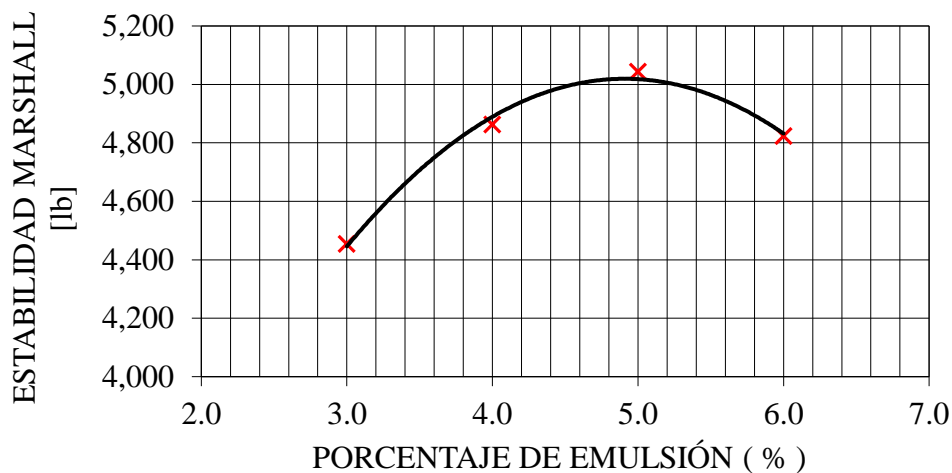


Figura 72. Relación porcentaje de emulsión y estabilidad

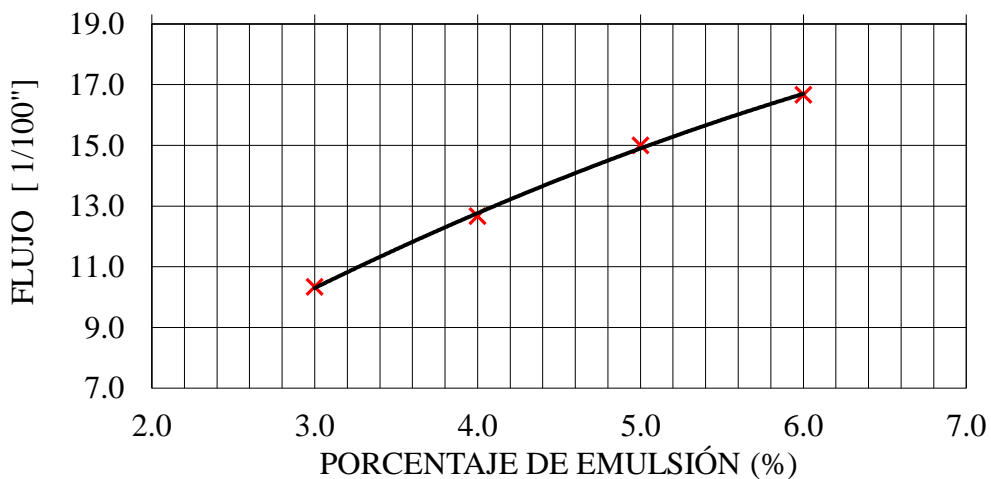
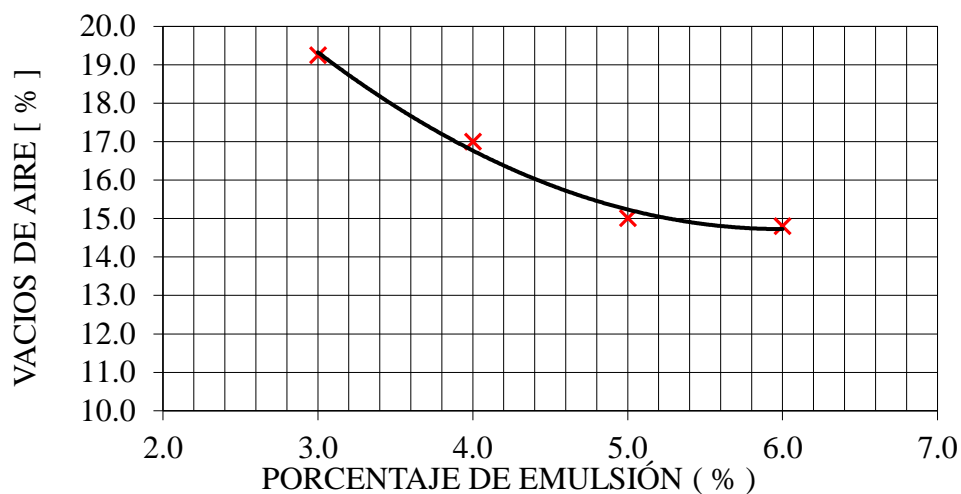


Figura 73. Relación porcentaje de emulsión y flujo



De las gráficas se puede determinar que, para obtener una densidad óptima, estabilidad y flujo óptimos, el porcentaje de emulsión óptimo es del 5% aproximadamente.

3.6 Diseño de mezcla definitivo para 100% material reciclado

Se muestra a continuación el diseño de mezcla que se va a utilizar para los tres tipos de emulsiones de estudio.

Tabla 68. Especificaciones diseño de mezcla definitivo

Componente	Valor
Material granular	
Fresado	100%
Ligante asfáltico	
Tipo de emulsión	Catiónica CSS-1h
% óptimo de emulsión	5%
Agua	
% de agua en la emulsión	~35%
% de agua de compactación	3%

3.6.1 Comparación diseño definitivo entre emulsiones.

Se fabricaron briquetas para realizar una comparación con el diseño definitivo planteado y se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 69. Resultados ensayo Marshall para diferentes tipos de emulsión

Muestra	% Emulsión	% Asfalto	Peso seco aire, gr	Peso superficie seca, gr	Peso sumergido, gr	Volumen c.c., gr	Densidad Bulk	Vacíos de aire, %	Factor corrección	Lectura dial, kN	Estabilidad corregida, lbs	Flujo, (1/100")	
CSS-1h EMULDEC													
1			1114.3	1118.0	540.0	578.0	1.928		0.86	28.40	5491	18.21	
2	5.00	3.00	1107.2	1111.0	531.0	580.0	1.909		0.86	25.09	4851	17.59	
3			1080.3	1084.0	514.0	570.0	1.895		0.86	25.00	4833	17.51	
			Promedio:					1.911	15.81			5058	18
CSS-1h modificada EMULDEC													
1			1122.0	1127.0	541.0	586.0	1.915		0.86	25.94	5015	18.62	
2	5.00	3.00	1006.3	1011.0	497.0	514.0	1.958		1.19	21.72	5811	10.92	
3			1102.0	1106.0	533.0	573.0	1.923		0.86	27.13	5245	18.56	
			Promedio:					1.932	15.06			5357	16
CSS-1h IMPTEK													
1			1129.5	1134.0	544.0	590.0	1.914		0.86	24.52	4741	16.22	
2	5.00	3.00	1118.6	1123.0	541.0	582.0	1.922		0.86	29.05	5616	17.12	
3			1113.6	1118.0	549.0	569.0	1.957		0.86	26.74	5170	17.58	
			Promedio:					1.931	16.99			5176	17

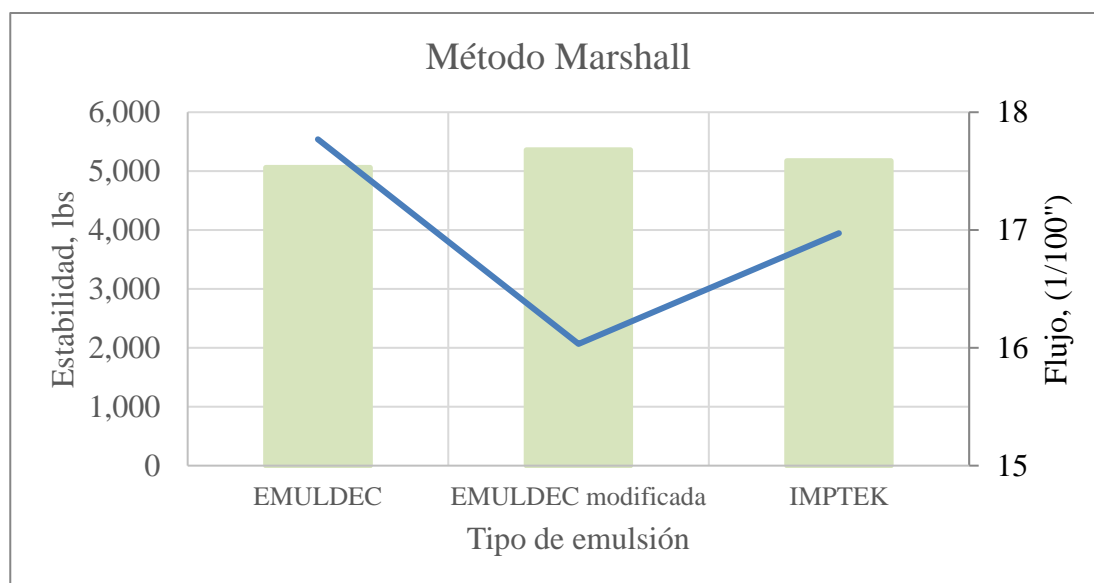


Figura 74. Resultados de estabilidad y flujo para cada emulsión

De acuerdo con la gráfica se puede establecer que la emulsión modificada es la que me da una mayor estabilidad, seguida de IMPTEK y en último la de EMULDEC normal. También se puede encontrar que la emulsión modificada es la que me da un menor flujo, seguida de IMPTEK y en último la de EMULDEC.

Se realizó una comprobación de las briquetas, fabricándose otro set de briquetas para asegurar que la tendencia de los resultados sea la misma y se obtuvieron los resultados que se muestran a continuación.

Tabla 70. *Comprobación ensayo Marshall para diferentes tipos de emulsión*

Muestra	% Emulsión	% Asfalto	Peso seco aire, gr	Peso superficie seca, gr	Peso sumergido, gr	Volumen c.c., gr	Densidad Bulk	Vacíos de aire, %	Factor corrección	Lectura dial, kN	Estabilidad corregida, lbs	Flujo, (1/100")
CSS-1h EMULDEC												
1			1125.0	1130.0	539.0	591.0	1.904		0.86	21.38	4134	14.89
2	5.00	3.00	1118.0	1124.0	536.0	588.0	1.901		0.86	24.74	4783	15.64
3				-	-	-	-		-	-	-	-
				Promedio:			1.902	16.18			4458	15
CSS-1h modificada EMULDEC												
1			1124.0	1128.0	540.0	588.0	1.912		0.86	28.60	5529	15.73
2	5.00	3.00	1121.0	1125.0	536.0	589.0	1.903		0.86	29.13	5632	15.82
3				-	-	-	-		-	-		
				Promedio:			1.932	16.19			5581	16
CSS-1h IMPTEK												
1			1122.0	1126.0	539.0	587.0	1.911		0.86	21.38	4134	11.6
2	5.00	3.00	1124.0	1128.0	538.0	590.0	1.905		0.86	24.74	4783	16.36
3				-	-	-	-		-	-	-	-
				Promedio:			1.931	18.02			4458	14

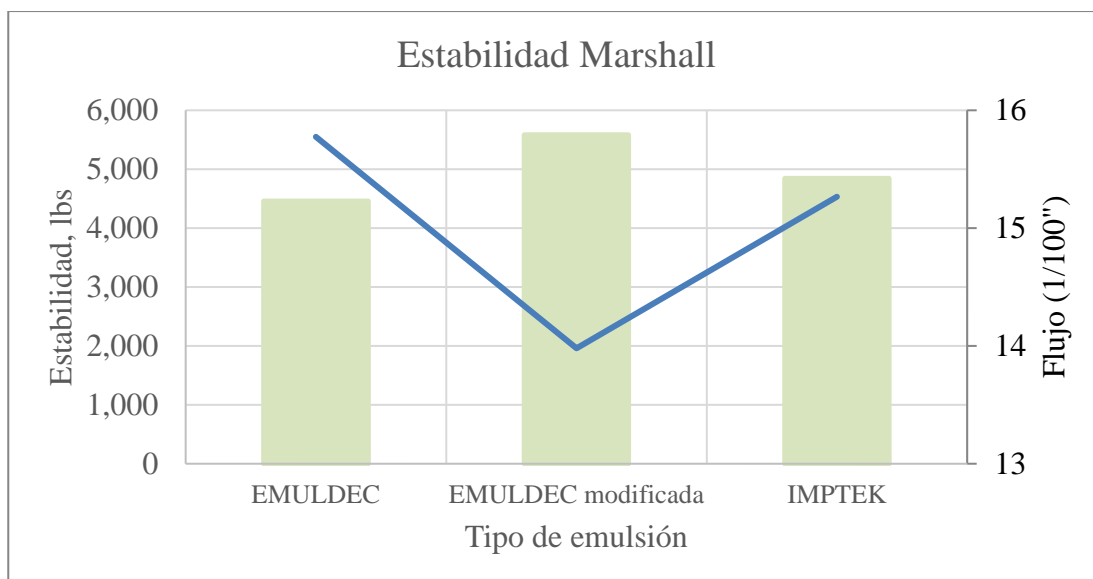


Figura 75. Resultados de la comprobación de estabilidad y flujo para cada emulsión

Se encontró el mismo patrón, dónde la estabilidad mayor con menor flujo es con la emulsión de EMULDEC modificada, seguida de IMPTEK y en último por la emulsión normal de EMULDEC.

La estabilidad al ser la capacidad de resistir deformaciones debido a cargas de tráfico nos indica que hay una adecuada fricción y cohesión interna entre agregados dentro de la mezcla.

3.7 Diseño de mezcla para 80% material reciclado

Se realizó un diseño de mezcla con material reciclado del 80% y 20% material granular normal usado para bases asfálticas con objetivo de comparar el desempeño de una mezcla sin y con granulometría corregida. Se utilizó el porcentaje de emulsión obtenida en el diseño antes planteado, y se realizó variación de porcentaje de agua de mezcla. El agregado nuevo utilizado se obtuvo de la antera de San Antonio, cantera autorizada y se adquirió el material granular que usualmente se usa para capas de rodadura de pavimentos con el fin de proporcionar similitud de propiedades entre el fresado proveniente de capas de rodadura y el nuevo material granular para que exista una buena y constante adhesividad con el ligante.

Para la fabricación de briquetas se utilizó la emulsión CSS-1h modificada de EMULDEC, y se utilizó la granulometría normal del fresado y una granulometría corregida para material de clase C.

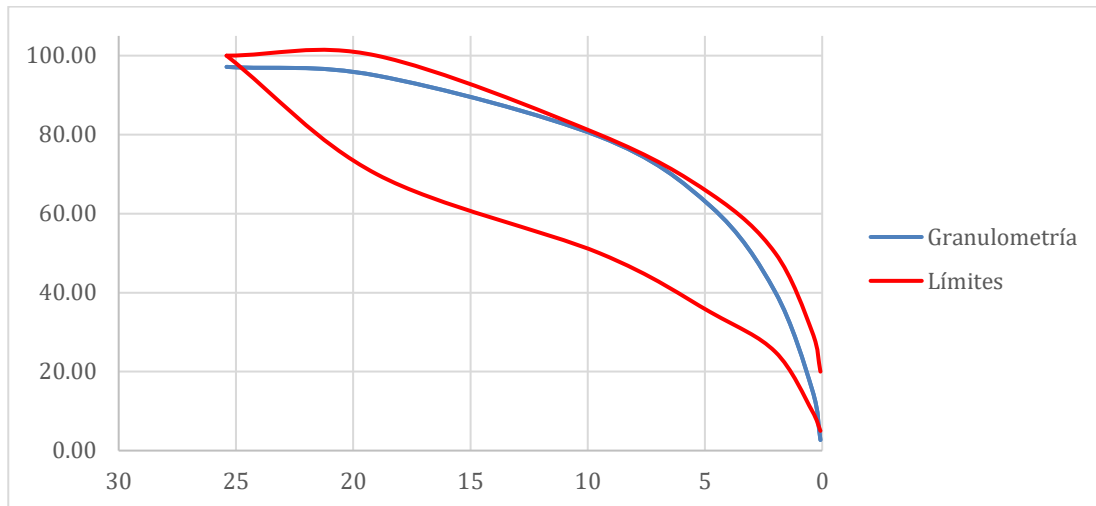


Figura 76. Granulometría sin corrección con 100% material reciclado (original)

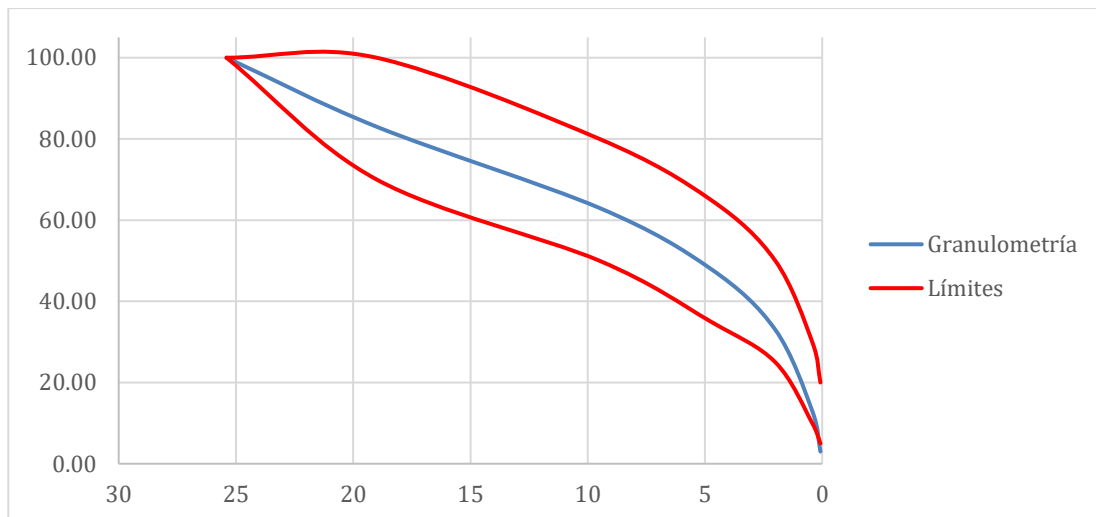


Figura 77. Granulometría corregida 80% material reciclado, 20% material nuevo

Al realizar el ensayo de estabilidad y flujo de Marshall se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 71. Resultados ensayo Marshall granulometría original y granulometría corregida

Muestra	% Emulsión	% Asfalto	Peso seco aire, gr	Peso superficie seca, gr	Peso sumergido, gr	Volumen c.c., gr	Densidad Bulk	Vacíos de aire, %	Factor corrección	Lectura dial, kN	Estabilidad corregida, lbs	Flujo, s	
100% material reciclado (3% agua)													
1			1004.0	1019.0	501.0	518.0	1.938		1.19	22.47	6011	8.8	
2	5.00	3.00	1016.0	1026.0	500.0	526.0	1.932		1.14	20.14	5162	12.42	
3			996.0	1009.0	486.0	523.0	1.904		1.14	20.57	5272	9.25	
			Promedio:					1.925	15.20			5482	10
80% material reciclado, 20% material nuevo (4% agua)													
1			1008.0	1012.0	509.0	503.0	2.004		1.24	26.22	7309	9.49	
2	5.00	3.00	1003.0	1009.0	483.0	526.0	1.907		1.14	25.96	6653	12.15	
3			1009.0	1013.0	508.0	505.0	1.998		1.24	25.99	7245	9.39	
			Promedio:					1.970	13.21			7069	10

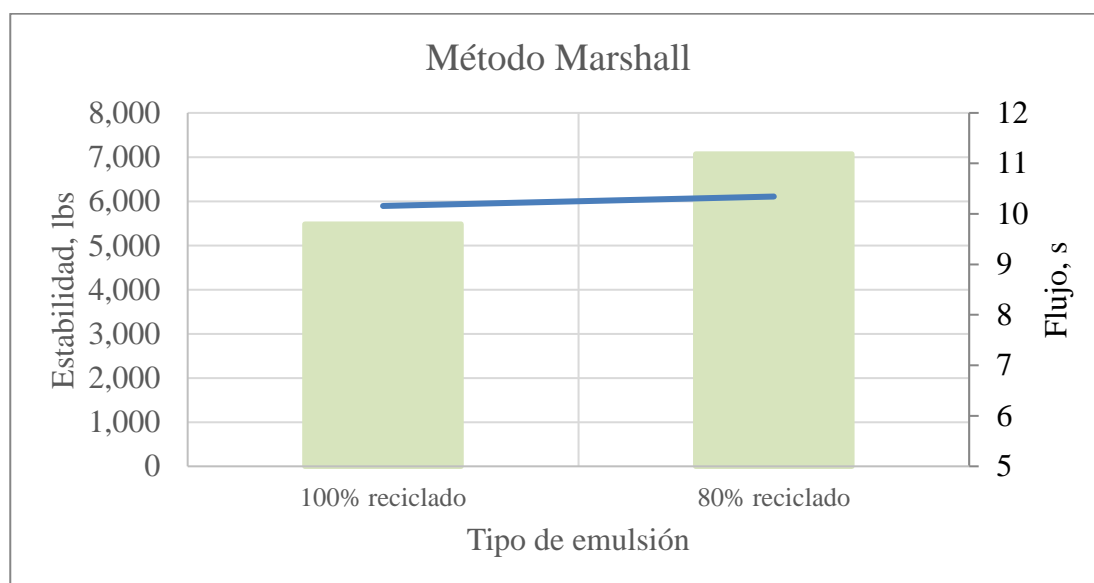


Figura 78. Comparación resultados de estabilidad y flujo granulometría original y corregida

Se puede apreciar que, para un mismo porcentaje de emulsión, la granulometría corregida en comparación a la granulometría original tiene mejores resultados en cuanto a estabilidad. Como se utilizó el mismo tipo de emulsión el flujo en los dos casos estuvo muy cercano.

3.8 Resultados criterios de estandarización de emulsiones asfálticas para reciclado.

Se presenta a continuación un resumen de la información y ensayos necesarios que se recomiendan realizar, de acuerdo con lo encontrado con los resultados obtenidos, para las emulsiones asfálticas usadas en el reciclado de pavimentos para garantizar calidad y buen funcionamiento en la fabricación de bases estabilizada. Estos ensayos se deben realizar a la emulsión como tal, y al residuo de asfalto proveniente de ella.

Tabla 72. Resumen criterios recomendados para emulsiones asfálticas usadas en reciclado en frío de pavimentos

CRITERIOS
Tipo de emulsión
% Asfalto en emulsión
% Emulsificante
% aditivo rejuvenecedor (con respecto al peso del asfalto)
Agua
% ácido clorhídrico, (hasta llegar a un ph de 2)
<i>Ensayos Emulsión</i>
Viscosidad FUROL 25°C, s
Estabilidad almacenaje 24 h, %
Carga de partícula
Mezcla con cemento
Ensayo de tamizado
Residuo por evaporación, %
Asentamiento (5 días), %
<i>Ensayos residuo emulsión</i>
Penetración (25°C, 100gr, 5s) mm
Ductilidad (25°C, 5cm/min), cm
Punto de ablandamiento

Además, es muy importante caracterizar el material recuperado reciclado porque dependiendo de ello se basa el diseño de mezcla. A continuación, se recomiendan los siguientes ensayos para la caracterización del fresado necesarios para la realización de un diseño de mezcla óptimo y adecuado.

Tabla 73. *Resumen criterios recomendados para material recuperado para el uso en reciclado en frío de pavimentos*

Ensayo
<i>Fresado</i>
Índice de plasticidad (TAMIZ NO. 40)
Equivalente de arena
Graduación
Peso específico fresado grueso, gr
Peso específico fresado fino, gr
Absorción fresado grueso, %
Absorción fresado fino, %
Peso volumétrico seco suelto, gr/cm ³
Peso volumétrico seco compacto, gr/cm ³
Densidad máxima, g/cm ³
Humedad óptima, %
<i>Residuo</i>
Contenido de ligante, %

3.9 Aplicaciones diseño de mezcla

El reciclado en frío de carpeta asfáltica tiene varias aplicaciones, entre las más importantes se encuentra:

- Rehabilitación de la carpeta asfáltica del pavimento en deterioro
- Mejoramiento del número estructural del pavimento conservando

3.9.1 Ejemplo de aplicación.

Se realizó un ejemplo de aplicación, dónde se considera que una vía se ha deteriorado con rapidez debido al paso del tiempo porque ya ha cumplido con su periodo de diseño, por lo que se debe realizar una repavimentación para que la vida útil del pavimento se prolongue, manteniendo el nivel de la subrasante y rasante debido a que pueden existir instalaciones que pueden ser afectadas.

Este ejemplo representa un problema que ocurre en las vías del Distrito Metropolitano de Quito, ya que son vías diseñadas hace muchos años y ya han cumplido con su periodo de diseño y es necesario una rehabilitación de las vías.

3.9.1.1 Planteamiento problema.

El pavimento flexible diseñado tiene los siguientes datos:

El nivel de confianza con el que se diseño fue para una zona urbana considerada como arteria principal, este porcentaje integra un grado de certidumbre para asegurar que el diseño alcance el periodo de análisis.

La capacidad del pavimento para servir al tránsito fue de 4.5 en un principio que es un valor considerado como muy bueno y se redujo a 2.5 que indica un nivel regular, lo que nos da una pérdida de serviciabilidad de 2.

Para el diseño de pavimentos flexibles la desviación estándar varía entre 0.4 y 0.5 y esta indica la posibilidad de variación de la predicción del tráfico y la variación normal de la predicción del comportamiento del pavimento a considerarse.

Se conoce también que la cantidad pronosticada de repeticiones del eje de carga equivalente (18 kip) es de 1'800.000, el cual toma en consideración los diferentes tipos de vehículo con su número de eje y peso. 1'800.000 ESAL's equivalen aproximadamente a un tráfico promedio anual (TPDA) de 250 vehículos. El TPDA es el promedio del tránsito diario en 24 horas que cruza por la sección transversal de la vía durante los 365 días del año, considera un tráfico mezclado y en ambas direcciones.

El número estructural de la vía es de 3.6, y este es el indicador de resistencia tomando en consideración el soporte del suelo, tráfico y serviciabilidad. Este permite conocer los espesores reales de la estructura del pavimento.

El CBR (California Bearing Ratio) es una prueba de penetración que sirve para conocer características mecánicas de un suelo, consiste en la medición de la presión necesaria para penetrar un pistón en una muestra de suelo. Este ensayo permite medir la calidad con respecto a la capacidad de carga de los suelos en base a su resistencia. Valores de CBR cercano a 0% representan suelos de baja calidad, mientras que los cercanos al 100% son suelos de muy buena calidad. En el caso de este problema se plantea un suelo de baja calidad en la subrasante de CBR del 6%.

A continuación, se muestra el resumen de datos del problema, además de la configuración estructural del pavimento a desarrollarse.

Tabla 74. Resumen información ejemplo aplicación

Nivel de confiabilidad, %	80
Desviación estándar	0.45
Pérdida de serviciabilidad ESAL's	2 1'800.000
SN	3.6
CBR subrasante, %	6

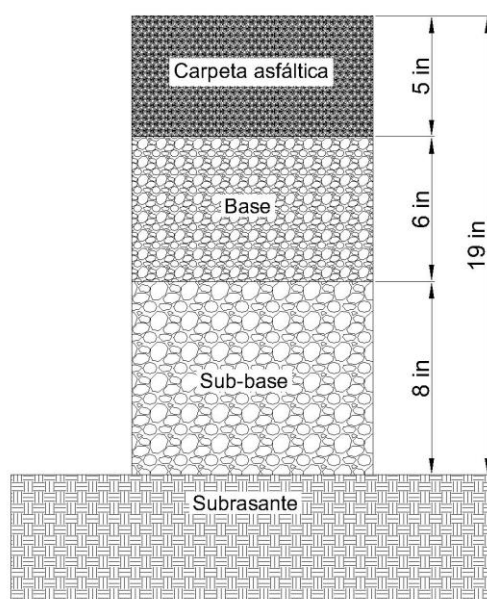


Figura 79. Estructura del pavimento original – ejemplo de aplicación

3.9.1.2 Solución.

Se plantean dos soluciones para el problema propuesto:

- Restauración total de la carpeta asfáltica en caliente y se conserva los espesores de base y sub-base.
- Reciclado en frío de carpeta asfáltica para la fabricación de base estabilizada, sellada lechada asfáltica (slurry seal). Se conserva el espesor de la sub-base.

3.9.1.2.1 Primera opción: restauración total carpeta asfáltica en frío o en caliente

Debido a que ha cumplido con su periodo de diseño el pavimento, este ha perdido capacidad estructural por lo que es necesario restaurar. Un método común de rehabilitación es retirar la carpeta asfáltica y colocar una nueva, conservando los espesores de las capas inferiores. Esto implica que la carpeta asfáltica debe ser del mismo espesor que la original.

Se encontró el espesor de las capas con la expresión propuesta de número estructural SN en la Guía AASHTO para diseño de estructuras de pavimento (1993) que se muestra a continuación.

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3 + \dots$$

dónde,

SN : número estructural

a_i : coeficiente estructural

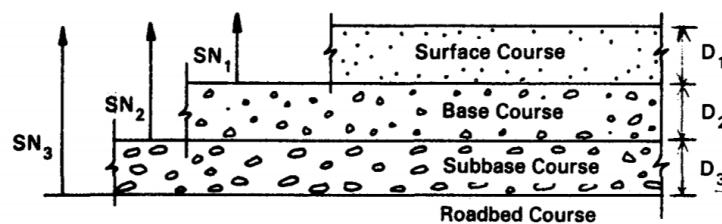
D_i : espesor capa (in)

m_i : coeficiente de drenaje

El coeficiente estructural indica la capacidad relativa de una unidad de espesor de una determinada capa para funcionar como capa estructural del pavimento, depende principalmente de la resistencia del material, calidad de construcción y estado de esfuerzos.

A su vez, el coeficiente de drenaje se establece de acuerdo con la calidad de drenaje del pavimento y el tiempo en el que el pavimento se encuentra con una cantidad de agua cercana a la saturación.

Se plantean las siguientes relaciones que se deben considerar para encontrar cada espesor que plantea la Guía AASHTO para diseño de estructuras de pavimento (1993).



$$D^*_1 \geq \frac{SN_1}{a_1}$$

$$SN^*_1 = a_1 D^*_1 \geq SN_1$$

$$D^*_2 \geq \frac{SN_2 - SN^*_1}{a_2 m_2}$$

$$SN^*_1 + SN^*_2 \geq SN_2$$

$$D^*_3 \geq \frac{SN_3 - (SN^*_1 + SN^*_2)}{a_3 m_3}$$

Figura 80. Configuración estructural para espesores de capa original – ejemplo de aplicación

La Guía AASHTO para diseño de estructuras de pavimento (1993), presenta gráficas para encontrar este coeficiente estructural de acuerdo con las

características de cada capa, y tablas para encontrar el coeficiente de drenaje, que se muestran a continuación.

Como primer paso, se encontraron los coeficientes estructurales para cada capa de la siguiente manera:

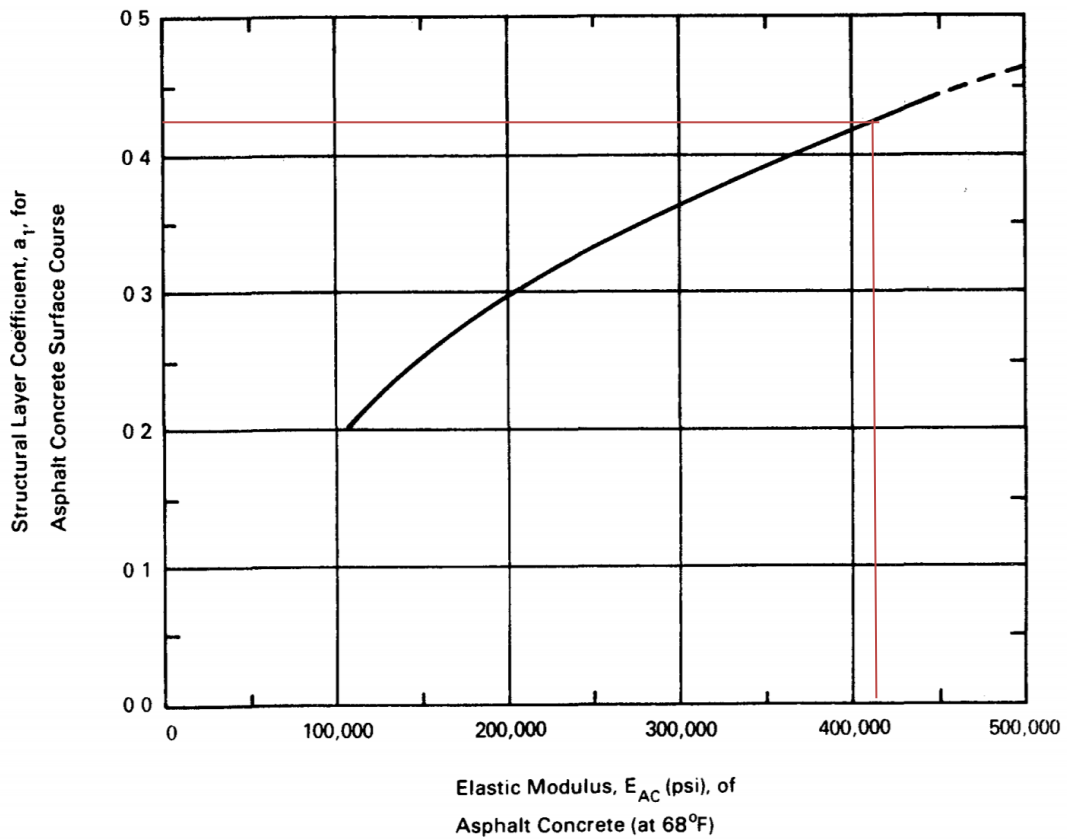
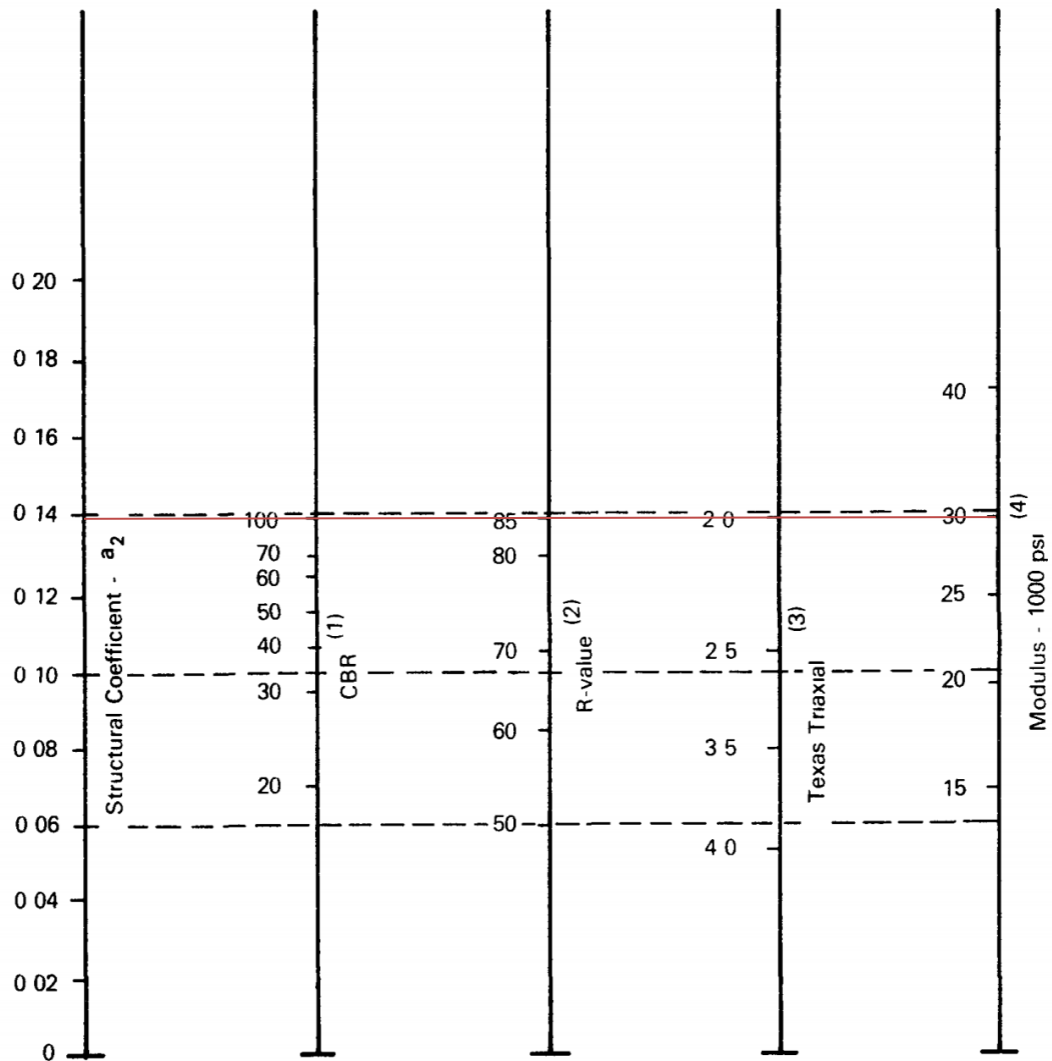


Figura 81. Gráfico para estimar el coeficiente estructural para hormigón asfáltico denso en función del módulo elástico.

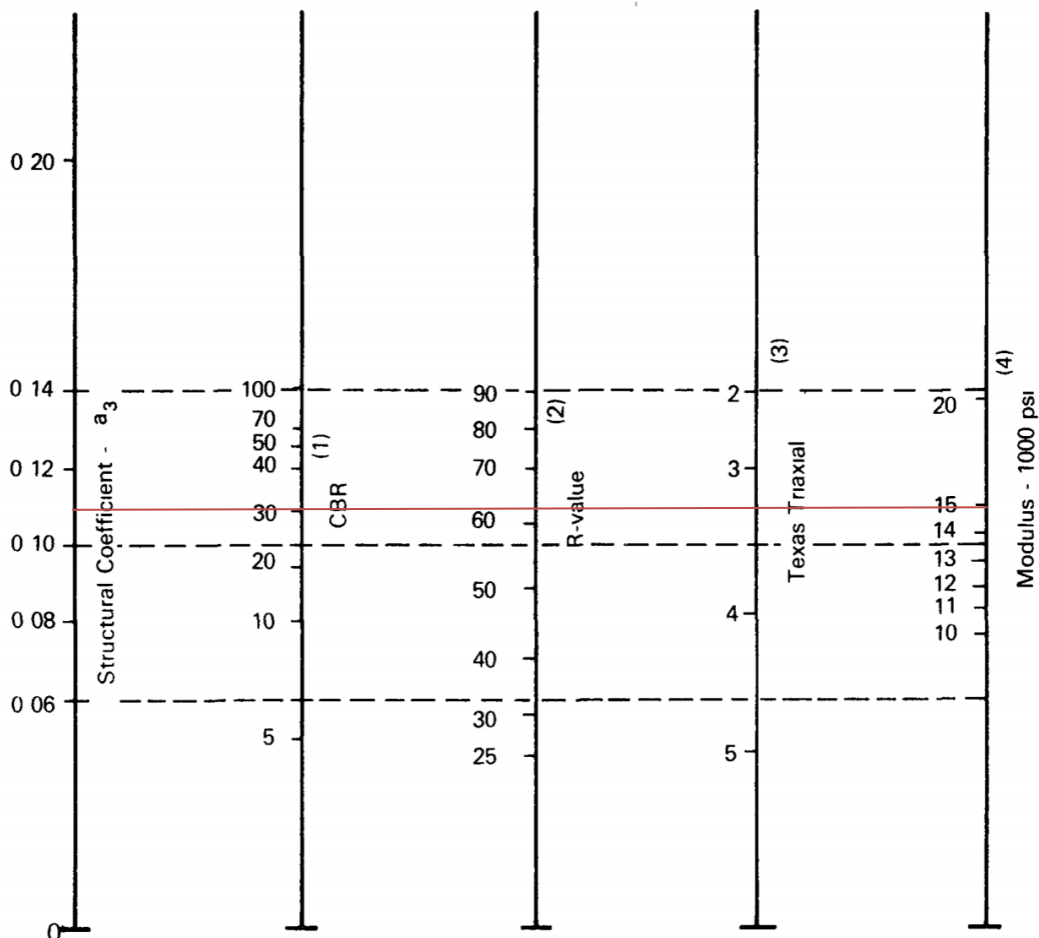
El módulo de elasticidad común para una carpeta asfáltica es de 410,000 psi lo que equivale un coeficiente estructural de 0.42.



- (1) Scale derived by averaging correlations obtained from Illinois
- (2) Scale derived by averaging correlations obtained from California, New Mexico and Wyoming
- (3) Scale derived by averaging correlations obtained from Texas
- (4) Scale derived on NCHRP project (3)

Figura 82. Variación del coeficiente estructural para capa de base granular

Se consideró una base granular con CBR del 100%, esto se debe a que debido al tráfico indicado se necesita una buena capacidad portante del suelo. Por lo tanto, el coeficiente estructural es de 0.14.



- (1) Scale derived from correlations from Illinois
- (2) Scale derived from correlations obtained from The Asphalt Institute, California, New Mexico and Wyoming
- (3) Scale derived from correlations obtained from Texas
- (4) Scale derived on NCHRP project (3)

Figura 83. Variación del coeficiente estructural para capa de sub-base granular

Se consideró una sub-base granular con un CBR del 30%, lo que equivale a un suelo de calidad media-baja, común para las sub-bases. Se encontró que el coeficiente estructural es de 0.11.

Tabla 75. *Coefficientes de drenaje*

Calidad de drenaje		Porcentaje del tiempo en que la estructura del pavimento está expuesta a niveles de humedad cercana a la saturación			
Condición	Tiempo evacuación	>1%	1% - 5%	5% - 15%	> 25%
Excelente	2 horas	1.40-1.35	1.35-1.25	1.30-1.20	1.2
Bueno	1 día	1.35-1.25	1.25-1.15	1.15-1.00	1.0
Regular	1 semana	1.25-1.15	1.15-1.05	1.00-0.80	0.8
Malo	1 mes	1.15-1.05	1.05-0.80	0.80-0.60	0.6
Muy malo	No drena	1.05-0.95	0.95-0.75	0.75-0.40	0.4

Se consideró una calidad de drenaje para la base granular de condición Buena, tiempo de evacuación de 1 día con un porcentaje del tiempo del pavimento expuesto a humedad de saturación del 5% al 15% tomando en consideración el clima de Quito, el coeficiente de drenaje se escogió de un valor de 1. Para la sub-base se consideró una calidad de drenaje de condición Regular, con un tiempo de evacuación de 1 semana y con el mismo porcentaje de exposición a humedades cercanas a la saturación y con estos parámetros se escogió un coeficiente de drenaje de valor de 0.8.

De acuerdo con los espesores de capa y los coeficientes se encontró el SN efectivo para el diseño de la carpeta asfáltica.

Tabla 76. *Resultado primera opción ejemplo aplicación*

Capas	Coeficientes		Espesores hi (in)	SN
	Estructural	Drenaje		
Capa asfalto	0.42	-	5	2.1
Base	0.14	1	6	0.84
Subbase	0.11	0.8	8	0.704
		Σ	19	3.6

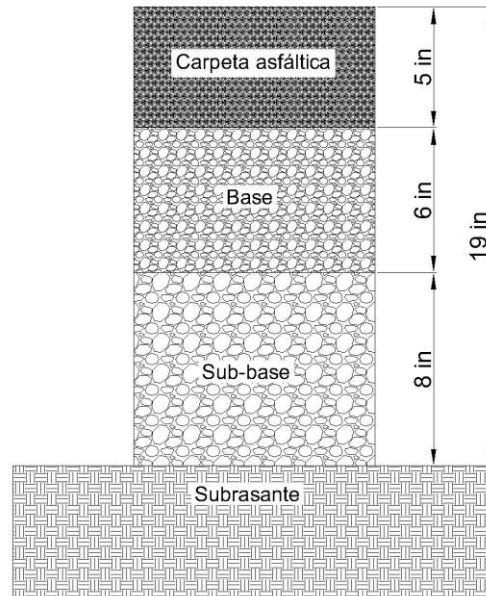


Figura 84. Solución estructura del pavimento primera opción – ejemplo de aplicación

3.9.1.2.2 Segunda opción: Reciclado en frío para fabricación base asfáltica y utilización de lechada asfáltica.

Para esta opción, se aumentó una capa correspondiente a la base asfáltica entre la lechada asfáltica y la base granular original. Esto implica la obtención de 4 capas.

La primera capa perteneciente a la lechada asfáltica no aporta capacidad estructural, una lechada asfáltica es un sello de mezcla que por lo general está conformada por agregado fino de buena graduación, agua, emulsión asfáltica y aditivos. Se utilizan sobre superficies que poseen un valor estructural alto además de portante como lo es la base asfáltica propuesta. Entre sus funciones se puede mencionar, impermeabilizaciones, sello de grietas y mejoramiento de la resistencia al deslizamiento. De acuerdo con el espesor su campo de aplicación es diferente, si su espesor es grueso puede aplicarse en vías con alto nivel de tránsito.

En cuanto al coeficiente estructural de la base asfáltica, debido a los altos valores de estabilidad obtenidos en el ensayo Marshall, se puede considerar que actúa de manera similar que un hormigón asfáltico denso, por lo que el coeficiente se consideró de 0.42. Y al ser una capa estabilizada con ligante, el drenaje se consideró como una capa de rodadura de condición buena, tiempo de drenaje entre 1 día y un porcentaje de exposición a humedades cercanas a la saturación entre 5 y 15%, por lo que el coeficiente de drenaje se escogió de 1.

Con los coeficientes determinados, se obtuvieron los espesores de las nuevas capas. Hay que recalcar que en el proceso de fresado por lo general se fresan 6 pulgadas, lo que a veces incluye el fresado de una cierta cantidad de base granular, como consecuencia la base granular cambia de espesor como se muestra a continuación.

De acuerdo con los espesores de capa y los coeficientes se encontró el SN efectivo para el diseño de la nueva capa.

Tabla 77. *Resultado segunda opción ejemplo aplicación*

Capas	Coeficientes		Espesores hi (in)	SN
	Estructural	Drenaje		
Lechada asfáltica			1	0
Base estabilizada	0.42	1	6	2.52
Base	0.14	1	5	0.7
Subbase	0.11	0.8	8	0.704
		Σ	20	3.9

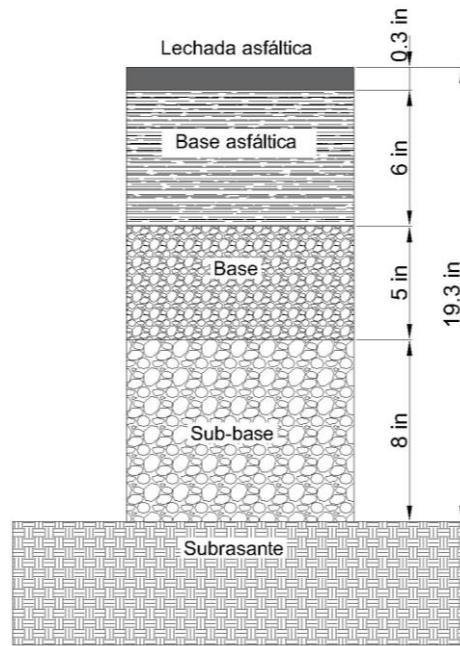
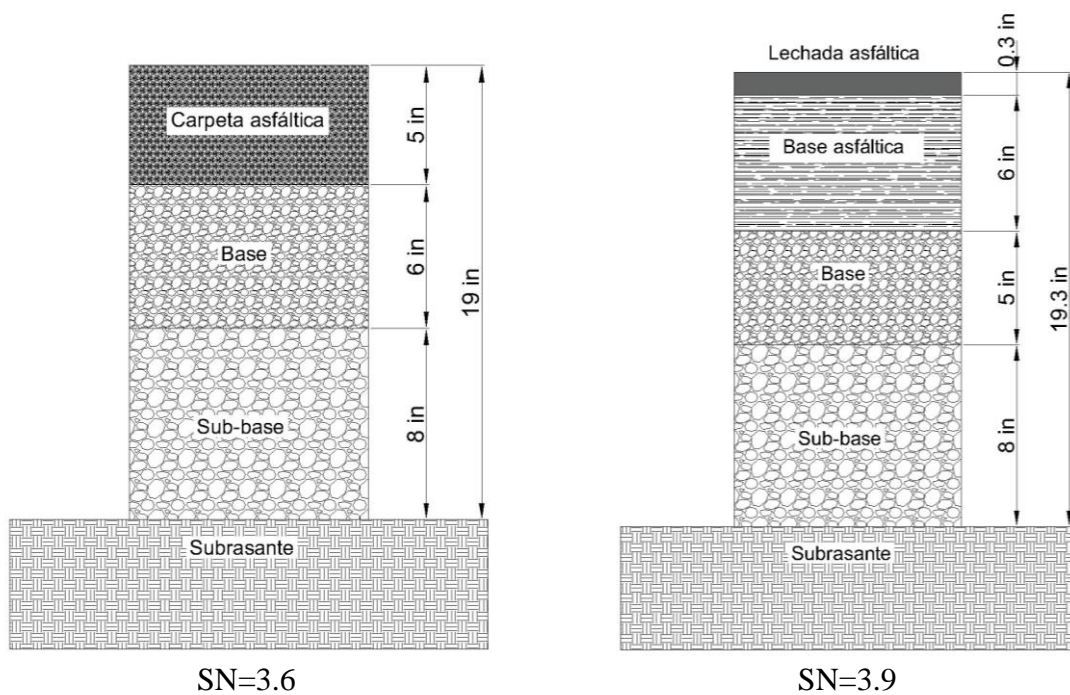


Figura 85. Solución estructura del pavimento segunda opción – ejemplo de aplicación

3.9.2 Comparación de soluciones para ejemplo de aplicación

Se muestra a continuación una comparación de las dos soluciones planteadas y el número estructural a la que funcionan debido al tráfico especificado.

Tabla 78. Comparación resultados ejemplo de aplicación



Como se puede observar la solución con reciclado nos da un número estructural más alto, que es lo que se busca ya que va a resistir más cargas de tráfico si es que estas incrementaran, manteniendo prácticamente los niveles de subrasante y rasante. Hay un aporte estructural mayor por parte de la base estabilizada en comparación al aporte que brinda una base granular común.

3.10 Análisis de costos

Los costos para la realización de bases estabilizados usando un proceso de reciclado varían dependiendo de factores como localización, transporte, disponibilidad de materiales, cantidades, mantenimientos, entre otros.

Una manera de medir y pagar la construcción de bases asfálticas usando reciclado incluye:

- Capa de base recuperada m^3
- Material granular adicional m^3
- Emulsión asfáltica para la base L
- Agente rejuvenecedor L

Debido a que el material granular recuperado en las vías pertenece al estado, entonces la EPMMOP se ahorra el costo del material granular que utilizaría para la construcción de una base asfáltica normal, solo asume el costo de emulsión, aditivos, mano de obra, maquinaria y equipo.

Tabla 79. Resumen costos aproximados rubros reciclado para base asfáltica

Rubro	Unidades	Costo Total
Capa base recuperada	$\$/m^3$	6.76
Material granular	$\$/m^3$	11.00
Emulsión asfáltica	$\$/L$	0.352
Agente rejuvenecedor	$\$/L$	0.017

3.10.1 Comparación de costos ejemplo de aplicación

Se realizó una comparación del presupuesto que implicaría realizar cualquiera de las opciones planteadas como solución en el ejemplo de aplicación para tener una mejor visibilidad de lo que implicaría usar reciclado. Para todos los casos se consideró la construcción de 1km de vía. El análisis de precios unitarios se encuentra en el Apéndice B y especificados en detalle cada uno de los rubros.

3.10.1.1 Presupuesto por km de vía con restauración de carpeta asfáltica en caliente.

Tabla 80. Presupuesto por km de vía con restauración de carpeta asfáltica en caliente

RUBRO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANT.	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
1A	Fresado pavimento asfáltico e=13 cm	m3	949	\$6.66	\$6323.07
1B	Riego de liga con emulsión	m2	7300	\$0.48	\$3528.88
1C	Capa de rodadura en caliente, e=13 cm	m2	7300	\$19.94	\$145592.95
				TOTAL	\$155444.9

3.10.1.2 Presupuesto por km de vía con reciclado en frío de carpeta asfáltica para fabricación base asfáltica

Tabla 81. Presupuesto por km de vía con reciclado en frío de carpeta asfáltica

RUBRO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANT.	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
2A	Reciclado en sitio e=15cm	m3	1095	\$57.78	\$63265.68
2B	Imprimación con emulsión	m2	7300	\$1.14	\$8288.36
2C	Slurry Seal e=8mm	m2	7300	\$3.44	\$25126.18
				TOTAL	\$96680.22

Aproximadamente entre las dos opciones existe una diferencia de \$60,000 por km de vía, lo cual implica que es una buena opción de rehabilitación que puede utilizar el Distrito Metropolitano de Quito.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Principalmente, se puede concluir que es muy importante caracterizar tanto a la emulsión como al material granular recuperado de pavimentos ya que ambos tienen una influencia muy grande en el diseño de mezcla. Es por ello por lo que se establecieron los criterios mínimos en cuanto a características y ensayos que se deben realizar que fueron antes estipulados para la realización de mezclas en frío para reciclado y que esta tenga un buen comportamiento debido a la realización de un buen diseño de mezcla.

Para el diseño de mezcla utilizando material reciclado es muy importante conocer las características del material como lo es su porcentaje de asfalto residual, densidad, porcentaje de absorción de agua, granulometría, ya que dependiendo de estos parámetros se obtienen resultados variados en la cantidad de agua de mezcla, cantidad de emulsión, estabilidad y flujo.

El material granular reciclado usado en el presente trabajo presentó un porcentaje de asfalto residual entre el 5 y 6%, el cual difirió del porcentaje de emulsión asfáltica obtenido teóricamente, porque el cálculo teórico no hace una diferenciación entre material reciclado o material nuevo, este porcentaje de asfalto, aunque este oxidado sigue aportando cohesión a la mezcla. Esto se pudo comprobar ya que, al realizar probetas con el porcentaje de asfalto teórico calculado, estas presentaban un exceso de ligante que no permitían la compactación de estas.

El asfalto residual proveniente del material fresado presenta características pobres en cuanto a penetración y ductilidad, y esto es debido al envejecimiento del asfalto. Es por ello que se puede plantear la importancia de un agente rejuvenecedor en la emulsión asfáltica a utilizarse que mejore en cierto grado sus propiedades.

La combinación de material granular reciclado y nuevo corrige la granulometría final y con ello se puede lograr cumplir con otros tipos de granulometrías que exijan futuros

proyectos. En cuanto a la granulometría Clase C para bases asfálticas, se comprobó que una granulometría corregida, lo que implica una mejor graduación de los agregados, se tienen resultados de estabilidad más altos (de 5634 lbs a 7069 lbs) y de flujo más bajos (10 a 11) que nos proporcionan capacidad de resistencia y capacidad de deformaciones óptimas. Es importante tomar en cuenta que el porcentaje de absorción de agua cambia y por lo tanto aumenta en cantidad debido al nuevo material pétreo que absorbe más agua y esto se debe tomar en consideración.

Una de las ventajas al utilizar material reciclado es que se garantiza el trabajo con materiales que no muestran características plásticas debido a la falta de partículas de tipo arcilla o limos que presentan usualmente algunos tipos de suelos usados como bases. El material reciclado ya aporta una cierta capacidad a resistir deformaciones.

Un problema que presenta la utilización de material reciclado es que se pierde mucho material fino y este es un problema común en las granulometrías de este tipo, donde es necesario hacer una corrección. En el caso de este trabajo no fue necesario hacer corrección, sin embargo, es muy importante determinar si hay la cantidad suficiente de finos para evitar porcentajes de vacíos elevados en la mezcla que podrían producir fragilidad en la base asfáltica.

La emulsión para emplearse debe ser del tipo catiónica y de curado lento, como es la CSS-1h, debido a que actúa efectivamente en material granular de tipo reciclado en cuanto adherencia y cobertura, tomando en cuenta solo material granular reciclado o una combinación de reciclado y agregado nuevo que son de diferentes procedencias.

En los gráficos obtenidos, el mayor valor de estabilidad se obtuvo con cantidades de emulsión de aproximadamente el 5% para las tres emulsiones CSS-1h disponibles en el mercado, considerado este como el contenido óptimo de emulsión. Valores más bajos

presentan flujos altos y valores de estabilidad menores y valores más altos presentan valores más altos de flujo y menores de estabilidad.

Los resultados de estabilidad para los tres tipos de emulsión cumplen con el valor mínimo de estabilidad de 750 lb/min propuesta en la MOP-001F-2002. Sin embargo, la emulsión modificada CSS-1h la cual incluye un agente rejuvenecedor presenta los mejores resultados en cuanto a los parámetros de estabilidad y flujo. Se puede inferir que al haber una mejora en las propiedades del asfalto envejecido existe una mayor cohesión y adhesión entre los elementos lo que resulta en una mayor capacidad de resistencia a cargas y menos deformaciones. Un valor alto de flujo implica tendencias de deformación altas debido a cargas de tránsito que es lo que no queremos, solo deformaciones necesarias.

Como se pudo observar en el ejemplo de aplicación, el reciclado en frío es una muy buena opción para un refuerzo estructural del pavimento permitiendo conservar los niveles de rasante y subrasante que a veces es necesario para evitar problemas con las instalaciones como de drenaje, sistemas eléctricos, entre otro que se pueden presentar.

El reciclado en frío de pavimentos se puede utilizar para proyectos de largo plazo, ya que permite mejorar el número estructural del pavimento dando un nuevo periodo de vida útil del mismo.

En el presupuesto aproximado planteado se puede ver que hay un ahorro de \$60,000 por km de vía, el cual implica la realización de un mayor número de rehabilitación, muy necesaria en las vías de Quito, con el mismo presupuesto anual disponible.

Algo muy importante del reciclado de pavimentos asfálticos es del punto de vista ambiental, ya que estamos hablando de un proceso mucho más amigable con el ambiente ya que se minimiza el uso de material nuevo, se elimina el uso de energía para el calentamiento y combustión necesaria para un proceso de rehabilitación común en caliente.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Asociación Mexicana de Asfalto (AMAAC). (2012). Recomendación AMAAC REA 15/2012

- Reciclado con emulsiones asfálticas.

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (1993).

Guía de diseño estructural de pavimentos.

Delgado, J. (2011). Guía para la realización de ensayos de asfaltos, emulsiones asfálticas

rebajados según el Reglamento Técnico Centroamericano. Recuperado de

file:///C:/Users/carol/Downloads/Dialnet-

GuiaParaLaRealizacionDeEnsayosYClasificacionDeAsfa-6240952.pdf

Ecuador Noticias (2016). Mapa del Distrito Metropolitano de Quito. Recuperado de

<https://www.ecuadornoticias.com/2016/02/mapa-del-distrito-metropolitano-de-quito.html>

Empresa Pública Metropolitana de agua Potable y Saneamiento (EPMAPS). (2018).

Resumen de la calidad del agua en las redes de distribución del Distrito Metropolitano de

quito. Recuperado de: [https://www.aguaquito.gob.ec/wp-](https://www.aguaquito.gob.ec/wp-content/uploads/2019/01/CALIDAD-DE-AGUA-EN-REDES-NOVIEMBRE.pdf)

[content/uploads/2019/01/CALIDAD-DE-AGUA-EN-REDES-NOVIEMBRE.pdf](https://www.aguaquito.gob.ec/wp-content/uploads/2019/01/CALIDAD-DE-AGUA-EN-REDES-NOVIEMBRE.pdf)

Empresa Pública Metropolitana de Movilidad y Obras Públicas. (2017). Informe rendición de

cuentas Municipio de Quito (EPMOP). Recuperado de

http://www.quito.gob.ec/documents/rendicion_2017_4.pdf

European Asphalt Pavement Association. Driving Ahead with Sustainable Asphalt Roads.

Recuperado de <https://eapa.org/warm-mix-asphalt>

Manual básico de emulsiones asfálticas. (1976). Asphalt Emulsion Manufacturers

Association (AEMA). Asphalt Institute. Manual No. 19

Marcó, R., Azario, C., Metzler, C., Garcia, M. (2014). La turbidez como indicador básico de calidad de aguas potabilizadoras a partir de fuentes superficiales. *Hig. Sanid. Ambient.* 4: 72-82 (2004). Recuperado de [http://www.salud-publica.es/secciones/revista/revistaspdf/bc510156890491c_Hig.Sanid.Ambient.4.72-82\(2004\).pdf](http://www.salud-publica.es/secciones/revista/revistaspdf/bc510156890491c_Hig.Sanid.Ambient.4.72-82(2004).pdf)

Ministerio de Transporte y Obras Públicas. (2018). Rendición de cuentas Ministerio de Transporte y Obras Públicas 2018. Recuperado de https://drive.google.com/file/d/17PdMPbUdwW24INn_27NvZyERN0crCsjD/view

Ministerio de Transporte y Obras Públicas. (2002). MOP-001F-2002. Especificaciones técnicas para construcción de caminos y puentes.

Ministerio de Transporte y Obras Públicas. (2012). NEVI-12. Volumen No. 3 – Especificaciones técnicas para construcción de caminos y puentes.

Orellana, J. (s/f). Libro de Ingeniería Sanitaria. Unidad 3. Características del Agua Potable.

Recuperado de:

https://www.fro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/ing_sanitaria/Ingenieria_Sanitaria_A4_Capitulo_03_Caracteristicas_del_Agua_Potable.pdf

Revista Scielo. (2017). Revista ingeniería de construcción. Pontificia Universidad Católica de Chile. Recuperado de https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-50732017000100006

Rock, C., Rivera, B. (2014). La Calidad del Agua, E. Coli y su Salud. College of Agriculture and Life Sciences. The University of Arizona. Recuperado de <https://extension.arizona.edu/sites/extension.arizona.edu/files/pubs/az1624s.pdf>

Talavera, R., Castaño, V., Martínez, M. (2001). Emulsiones Asfálticas. Secretaría de Comunicación y Transporte. Instituto Mexicano del Transporte. Recuperado de <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/DocumentoTecnico/dt23.pdf>

Ulloa, A., (2012). Preparación de emulsiones asfálticas en laboratorio. Recuperado de [file:///C:/Users/carol/Downloads/13469-Texto%20del%20art%C3%ADculo-24412-1-10-20140327%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/carol/Downloads/13469-Texto%20del%20art%C3%ADculo-24412-1-10-20140327%20(2).pdf)

6. APÉNDICE A: ENSAYOS ASFALTO AC-20 PETROECUADOR

ENSAYOS	REFERENCIA			ASFALTO VIRGEN			ASFALTO ADITIVADO				
	NORMA	MÍN	MÁX	RESULTADOS	FINAL	RESULTADOS	FINAL	RESULTADOS	FINAL		
Betún original											
Penetración (25°C, 100gr, 5s), dmm	INEN 917	60	-	74	71	90	78.3	115	118	120	117.7
Punto de ablandamiento A y B, °C	INEN 920	48	57	50	49.5	49	49.5	46.75	47	47	46.9
Índice de penetración	MOP	-1.5	1.5	-	-0.2	-	-0.2	0.4	0.4	0.4	0.4
Ductilidad (25°C, 5cm/min), cm	INEN 916	100	-	114	>118	>118	116.7	>118	>118	>118	>118
Punto de inflamación, Copa Cleveland, °C	INEN 808	232	-	248	248	248	248	238	238	238	238
Densidad Relativa, 25°C/25°C	INEN 923	1	-	1.00858	1.00858	1.00858	1.00858	1.00814	1.00814	1.00814	1.00814
Ensayo de la mancha	AASHTO T102	NEGATIVO	-	NEG.	NEG.	NEG.	NEGATIVO	NEG.	NEG.	NEG.	NEGATIVO
Viscosidad absoluta a 60°C, Pa.s	INEN 810	160	240	76.5	76.5	76.5	76.5	69.4	69.4	69.4	69.4
Viscosidad absoluta a 135°C, Pa.s	INEN 810	250	-	0.34	0.34	0.335	0.335	0.31	0.31	0.31	0.31
Viscosidad Brookfield a 135°C, cP	ASTM D4402	250	-	335	335	335	335	305	305	305	305
Viscosidad Brookfield a 140°C, cP	ASTM D4402	-	-	260	260	260	260	240	240	240	240
Viscosidad Brookfield a 145°C, cP	ASTM D4402	-	-	202	202	202	202	190	190	190	190
Viscosidad cinemática a 135°C, mm ² /s	INEN 810	300	-	333.11	333.11	333.11	333.11	303.41	303.41	303.41	303.41
Viscosidad cinemática a 60°C, mm ² /s	INEN 810	-	-	76067.93	76067.93	76067.93	76067.93	69037.55	69037.55	69037.55	69037.55
Viscosidad Brookfield a 60°C, cP	ASTM D4402	-	-	76500	76500	76500	76500	69400	69400	69400	69400
Residuo											
Variación de masa, %	INEN 924	-	0.8	0.3	0.3	0.3	0.3	0.56	0.56	0.56	0.56
Penetración (25°C, 100gr, 5s)	INEN 917	-	-	54	56	58	56	64	65	66	65
Penetración, % penetración original	INEN 918	54	-	-	-	71.5	71.5	-	-	-	55.2
Ductilidad, cm	INEN 916	50	-	43	44.5	43.75	43.8	55	54.5	-	54.8
Punto de ablandamiento A y B, °C	INEN 920	48	57	57.25	57	-	43.75	55	55	-	55
Resistencia al endurecimiento	MOP	-	5	9.2	9.2	9.2	9.2	8.3	8.3	8.3	8.3
Viscosidad absoluta 60 °C, Pa.s	INEN 810	-	800	707	707	707	707	579	579	579	579
Viscosidad Brookfield a 135°C, cP	ASTM D4402	250	-	647.5	647.5	647.5	647.5	507.5	507.5	507.5	507.5
Viscosidad Brookfield a 140°C, cP	ASTM D4402	-	-	485	485	485	485	382.5	382.5	382.5	382.5
Viscosidad Brookfield a 145°C, cP	ASTM D4402	-	-	375	375	375	375	292.5	292.5	292.5	292.5
Viscosidad Brookfield a 60°C, cP	ASTM D4402	-	-	707000	707000	707000	707000	579000	579000	579000	579000

7. APÉNDICE B: ANÁLISIS PRECIOS UNITARIOS

7.1 Restauración carpeta asfáltica en caliente, e=15cm

Rubro: 1A Fresado pavimento asfáltico, e=15cm
Unidad: m3

1. MATERIALES		UNIDAD	CANTIDAD	C.UNITARIO	C.TOTAL		
Puntas de tungsteno		u	0.040	7.45	0.298		
				SUBTOTAL	0.30		
2. MANO DE OBRA		CAT.	CANTIDAD	JORNAL/HR	C. HORA	REND.	C.TOTAL
Op. Fresadora de pavimento asfáltico		C1	1	4.01	4.01	0.04	0.1604
Inspector de obra		B3	1	4.02	4.02	0.04	0.1608
Chofer		C!	1	4.01	4.01	0.04	0.1604
Peón		E2	4	3.58	14.32	0.04	0.5728
				SUBTOTAL			1.05
3. EQUIPO		CANTIDAD	TARIFA	C. HORA	REND.	C. TOTAL	
Volqueta 8m3		1	30	30	0.04	1.2	
Escoba mecánica		1	20	20	0.04	0.8	
Fresadora de pavimento asfáltico		1	55	55	0.04	2.2	
				SUBTOTAL			4.2
					4. COSTO UNITARIO DIRECTO		5.6
					5. COSTO UNITARIO INDIRECTO		1.11
					6. COSTO TOTAL RUBRO		6.66

Rubro: 1B Riego de liga
Unidad: m2

1. MATERIALES		UNIDAD	CANTIDAD	C.UNITARIO	C.TOTAL		
Emulsión		L	0.500	0.36	0.18		
Agua		m3	0.50				
				SUBTOTAL	0.18		
2. MANO DE OBRA		CAT.	CANTIDAD	JORNAL/HR	C. HORA	REND.	C.TOTAL
Op. Distribuidor asfalto		C2	1	3.82	3.82	0.002	0.00764
Inspector de obra		B3	1	4.02	4.02	0.002	0.00804
Peón		E2	1	3.58	3.58	0.002	0.00716
				SUBTOTAL			0.02
3. EQUIPO		CANTIDAD	TARIFA	C. HORA	REND.	C. TOTAL	
Distribuidora de asfalto		1	70	70	0.002	0.14	
Escoba		1	30	30	0.002	0.06	
				SUBTOTAL			0.2
					4. COSTO UNITARIO DIRECTO		0.4
					5. COSTO UNITARIO INDIRECTO		0.08
					6. COSTO TOTAL RUBRO		0.48

Rubro: 1C Capa de rodadura de hormigón asfáltico en caliente, e= 13cm
Unidad: m2

1. MATERIALES		UNIDAD	CANTIDAD	C.UNITARIO	C.TOTAL		
Asfalto		gln	3.800	1.5	5.7		
Diesel		gln	1.200	1.037	1.2444		
Material granular		m3	0.130	11	1.43		
				SUBTOTAL	8.37		
2. MANO DE OBRA		CAT.	CANTIDAD	JORNAL/HR	C. HORA	REND.	C.TOTAL
Op. Distribuidor de asfalto		C2	1	3.82	3.82	0.02	0.0764
Op. Distribuidor de agregados		C2	1	3.82	3.82	0.02	0.0764
Op. Acabadora de pavimento asfáltico		C2	1	3.82	3.82	0.02	0.0764
Op. Rodillo autopropulsado		C2	1	3.82	3.82	0.02	0.0764
Op. Cargadora frontal		C1	1	4.01	4.01	0.02	0.0802
Op. Planta asfaltto		C2	1	3.82	3.82	0.02	0.0764
Inspector de obra		B3	1	4.02	4.02	0.02	0.0804
Peón		E2	2	3.58	7.16	0.02	0.1432
				SUBTOTAL			0.69
3. EQUIPO		CANTIDAD	TARIFA	C. HORA	REND.	C. TOTAL	
Distribuidora de asfalto		1	70	70	0.02	1.4	
Distribuidora de agregados		1	50	50	0.02	1	
Acabadora pavimentos asfálticos		1	80	80	0.02	1.6	
Rodillo autopropulsado		1	50	50	0.02	1	
Planta de asfalto		1	88	88	0.02	1.76	
Cargadora frontal		1	40	40	0.02	0.8	
				SUBTOTAL		7.56	
					4. COSTO UNITARIO DIRECTO	16.6	
					5. COSTO UNITARIO INDIRECTO	3.32	
					6. COSTO TOTAL RUBRO	19.94	

7.2 Reciclado en frío de carpeta asfáltica para fabricación de base asfáltica y Slurry Seal.

Rubro: 2A Reciclado en sitio e=15cm
Unidad: m3

1. MATERIALES		UNIDAD	CANTIDAD	C.UNITARIO	C.TOTAL		
Emulsión asfáltica CSS-1h		L	50.000	0.352	17.6		
Aditivo		L	5.00	0.017	0.085		
Material granular		m3	0.2	11.000	2.2		
					SUBTOTAL	19.89	
2. MANO DE OBRA		CAT.	CANTIDAD	JORNAL/HR	C. HORA	REND.	C.TOTAL
Op. Recicladora pavimento asfáltico		C1	1	4.01	4.01	0.08	0.3208
Op. Motoniveladora		C1	1	4.01	4.01	0.08	0.3208
Op. Acabadora pavimentos asfálticos		C2	1	3.82	3.82	0.08	0.3056
Inspector de obra		B3	1	4.02	4.02	0.08	0.3216
Peón		E2	2	3.58	7.16	0.08	0.5728
Chofer		E2	1	5.26	5.26	0.08	0.4208
					SUBTOTAL	2.26	
3. EQUIPO		CANTIDAD	TARIFA	C. HORA	REND.	C. TOTAL	
Recicladora de pavimento asfáltico		1	200	200	0.08	16	
Motoniveladora		1	45	45	0.08	3.6	
Acabadora pavimentos asfálticos		1	80	80	0.08	6.4	
					SUBTOTAL	26	
					4. COSTO UNITARIO DIRECTO	48.15	
					5. COSTO UNITARIO INDIRECTO	9.63	
					6. COSTO TOTAL RUBRO	57.78	

Rubro: 2B Imprimación con emulsión
Unidad: m2

1. MATERIALES		UNIDAD	CANTIDAD	C.UNITARIO	C.TOTAL		
Emulsión		gln	0.300	1.5	0.45		
Agua		gln	0.08	1.037	0.08296		
					SUBTOTAL	0.53	
2. MANO DE OBRA		CAT.	CANTIDAD	JORNAL/HR	C. HORA	REND.	C.TOTAL
Op. Distribuidor asfalto		C2	1	3.82	3.82	0.02	0.0764
Op. Barredora autopropulsada		C2	1	3.82	3.82	0.02	0.0764
Inspector de obra		B3	1	4.02	4.02	0.02	0.0804
					SUBTOTAL	0.23	
3. EQUIPO		CANTIDAD	TARIFA	C. HORA	REND.	C. TOTAL	
Distribuidora de asfalto		1	70	70	0.002	0.14	
Barredora autopropulsada		1	20	20	0.002	0.04	
					SUBTOTAL	0.18	
					4. COSTO UNITARIO DIRECTO	0.95	
					5. COSTO UNITARIO INDIRECTO	0.19	
					6. COSTO TOTAL RUBRO	1.14	

Rubro: 2C Slurry seal e=8mm
Unidad: m2

1. MATERIALES		UNIDAD	CANTIDAD		C.UNITARIO	C.TOTAL	
Emulsión asfáltica CSS-1h		L	3.100		0.352	1.0912	
Agua		m3	0.01		0.017	0.000085	
Material granular		m3	0.025		11.000	0.275	
					SUBTOTAL	1.37	
2. MANO DE OBRA		CAT.	CANTIDAD	JORNAL/HR	C. HORA	REND.	C. TOTAL
Op. Distribuidor asfalto		C2	1	3.82	3.82	0.02	0.0764
Op. Barredora autopropulsada		C2	1	3.82	3.82	0.02	0.0764
Op. Cargadora frontal		C1	1	4.01	4.01	0.02	0.0802
Op. Máquina para sellos asfálticos		C1	1	4.01	4.01	0.02	0.0802
Inspector de obra		B3	1	4.02	4.02	0.02	0.0804
Peón		E2	2	3.58	7.16	0.02	0.1432
Chofer		E2	1	5.26	5.26	0.02	0.1052
					SUBTOTAL	0.64	
3. EQUIPO		CANTIDAD	TARIFA	C. HORA	REND.	C. TOTAL	
Distribuidora de asfalto		1	70	70	0.004	0.28	
Barredora autopropulsada		1	20	20	0.004	0.08	
Cargadora frontal		1	40	40	0.004	0.16	
Máquina para sellos asfálticos		1	60	60	0.004	0.24	
Camión cisterna 12m3		1	25	25	0.004	0.1	
					SUBTOTAL	0.86	
4. COSTO UNITARIO DIRECTO						2.87	
5. COSTO UNITARIO INDIRECTO						0.57	
6. COSTO TOTAL RUBRO						3.44	