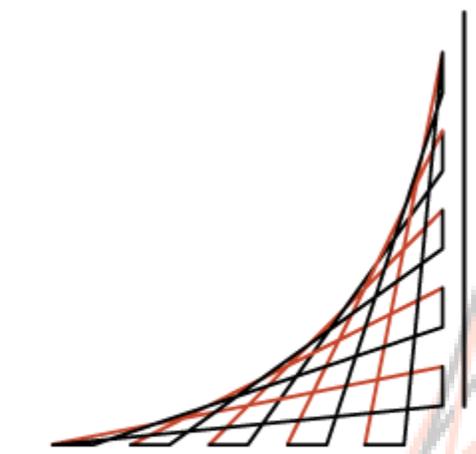


CONTEXTO LOCAL DE LOS PAVIMENTOS ASFALTICOS RECUPERADOS-RAP

*Trabajo de investigación en conjunto con el semillero de
investigación en pavimentos*



ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO

VIGILADA MINEDUCACIÓN

ALZATE RUIZ CRISTIAN DAVID
ROJAS AVILA DANNA VANESA
HERNÁNDEZ SÁNCHEZ JOAN SEBASTIÁN

Semillero de Investigación en Pavimentos

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO

Directora

INGENIERA SANDRA XIMENA CAMPAGNOLI MARTÍNEZ

VIGILADA MINEDUCACIÓN

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
BOGOTÁ D.C.

TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción.....	10
2. Objetivos del proyecto.....	11
2.1. Objetivo general	11
2.2. Objetivos Específicos	11
3. Descripción General del Proyecto.....	12
4. Estado del Arte.....	12
4.1. Generalidades.....	12
4.2. Estadísticas Internacionales.....	16
4.3. Argentina.....	16
4.4. Francia, USA y Europa.....	16
4.5. Países Bajos	18
4.6. Historia	19
4.7. Obtención.....	19
4.8. Fresado.....	20
4.9. Demolición de pavimento	21
4.10. Residuos de plantas	22
4.11. Aplicaciones del RAP.....	22
4.12. Limpieza.....	24
4.13. Acopio.....	24
4.14. Caracterización.....	28
4.15. Muestreo.....	30
4.16. Ensayos	32
4.17. Manejo de Inventario	32
4.18. Recomendaciones	33
5. Primera Parte: Comparación entre Especificaciones INVIAS e IDU relacionadas con Pavimento Asfáltico Reciclado	37

5.1. Aspectos Generales	37
5.2. Subbases y Bases.....	38
6. Segunda Parte: Estadísticas acerca de la Generación, Manejo y uso del RAP 48	
6.1. Entidad 1	48
6.2. Entidad 2	48
6.3. Entidad 3	50
6.4. ENTIDAD 4	50
7. Tercera Parte: Análisis de los resultados.....	52
7.1. Análisis de Resultados Aplicados al RAP	52
7.1.1. Granulometría (INV E -213-13).....	59
7.1.1.1. Condiciones del Ensayo.....	59
7.1.1.2. Resultados del Ensayo.....	61
7.1.2. Máquina de los Ángeles (INV E-218-13)	77
7.1.2.1. Condiciones del Ensayo	77
7.1.2.2. Resultados del Ensayo.....	77
7.1.3. Micro Deval (INV E-238-13).....	79
7.1.3.1. Condiciones del Ensayo.....	79
7.1.3.2. Resultados del Ensayo.....	79
7.1.4. Porcentaje de Asfalto (INV E-732-13).....	80
7.1.4.1. Condiciones del Ensayo.....	80
7.1.4.2. Resultados del Ensayo.....	80
7.1.5. Recuperación del Asfalto (INV E-759-13).....	81
7.1.6. Caracterización del Asfalto	82
7.1.6.1. Penetración (INV E 706-13)	82
7.1.6.1.1. Condiciones del Ensayo.....	82
7.1.6.1.2. Resultados del Ensayo	82

7.1.6.2. Punto de Ablandamiento (Aparato de Anillo y Bola) (INV E 712-13)	83
7.1.6.2.1. Condiciones del Ensayo.....	83
7.1.6.2.2. Resultados del Ensayo	83
7.1.6.3. Índice de Penetración de los Cementos Asfálticos (INV E 724-13)	84
7.1.6.4. Viscosidad del Asfalto empleando un Viscosímetro Rotacional (INV E 717-13)	87
7.1.6.4.1. Condiciones del Ensayo.....	87
7.1.6.4.2. Resultados del Ensayo	87
7.1.6.5. Evaluación de la Susceptibilidad Térmica del Cemento Asfáltico (Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos en Vías con Medios y Altos Volúmenes de Tránsito)	90
7.2. Análisis de Resultados Aplicados al Agregado Mineral.....	99
7.2.1. Granulometría (INV E-213-13).....	99
7.2.1.1. Condiciones del Ensayo	99
7.2.1.2. Resultados del Ensayo.....	100
7.2.2. Máquina de los Ángeles (INV E-218-13)	114
7.2.2.1. Condiciones del Ensayo	114
7.2.2.2. Resultados del Ensayo.....	114
7.2.3. Micro Deval (INV E-238-13).....	117
7.2.3.1. Condiciones del Ensayo	117
7.2.3.2. Resultados del Ensayo.....	118
7.3. Porcentaje de Caras Fracturadas (INV E 227-13).....	121
7.3.1.1. Condiciones del Ensayo	121
7.3.1.2. Resultados del Ensayo.....	122
7.3.2. Índices de Aplanamiento y de Alargamiento de los Agregados (INV E 230-13)	124
7.3.2.1. Condiciones del Ensayo	124
7.3.2.2. Resultados del Ensayo.....	125

7.3.2.2.1. Índice de Aplanamiento.....	125
7.3.2.2.2. Índice de Alargamiento	125
8. Conclusiones.....	127
9. Agradecimientos	130
10. Bibliografía.....	131

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Selección del asfalto según el contenido de RAP en la muestra-metodología Superpave.....	15
Tabla 2 Tasas de reciclaje en diferentes países europeos- European Asphalt Pavement Association.....	23
Tabla 3 Ventajas y desventajas del pretratamiento del RAP-Randy C. West, 2015	28
Tabla 4 Niveles de Tránsito INVIAS-Especificaciones INVIAS.....	38
Tabla 5 Uso Típico de las diferentes clases de Base granular- Especificaciones INVIAS	39
Tabla 6 Uso Típico de las diferentes clases de sub-base granular- Especificaciones INVIAS	39
Tabla 7 Requisitos de los agregados para bases granulares INVIAS- Especificaciones INVIAS.....	40
Tabla 8 Franjas granulométricas del material de base granular INVIAS- Especificaciones INVIAS.....	41
Tabla 9 Requisitos de los agregados para sub-bases granulares INVIAS- Especificaciones INVIAS.....	41
Tabla 10 Franjas granulométricas del material de sub-base granular INVIAS- Especificaciones INVIAS.....	42
Tabla 11 Categorías de Tránsito IDU- Especificaciones IDU.....	44
Tabla 12 Categorías de Tránsito INVIAS- Especificaciones INVIAS.....	44
Tabla 13 Resultados del ensayo de Máquina de los Ángeles para las muestras de RAP	77
Tabla 14 Comparación con Especificaciones INVIAS Máquina de Los Ángeles RAP	78
Tabla 15 Comparación con Especificaciones IDU Máquina de Los Ángeles RAP	78

Tabla 16 Resultados del ensayo de Micro Deval para las muestras de RAP	79
Tabla 17 Comparación con Especificaciones INVIAS Micro Deval RAP	79
Tabla 18 Comparación con Especificaciones IDU Micro Deval RAP	80
Tabla 19 Resultados Porcentaje de Asfalto	80
Tabla 20 Porcentajes de Asfalto 2018-II y 2016-II.....	81
Tabla 21 Resultados Penetración	82
Tabla 22 Resultados Penetración 2016-II	83
Tabla 23 Resultados Punto de Ablandamiento	83
Tabla 24 Punto de Ablandamiento 2018-II y 2016-II	84
Tabla 25 Resultados Índice de Penetración (IP)	86
Tabla 26 Relación entre viscosidad y los diferentes ensayos.	92
Tabla 27 Tabla de Susceptibilidad Térmica Muestra 1.....	93
Tabla 28 Susceptibilidad Térmica Muestra 1.....	94
Tabla 29 Tabla de Susceptibilidad Térmica Muestra 2.....	94
Tabla 30 Susceptibilidad Térmica Muestra 2.....	95
Tabla 31 Tabla de Susceptibilidad Térmica Muestra 3.....	96
Tabla 32 Susceptibilidad Térmica Muestra 3.....	97
Tabla 33 Tabla de Susceptibilidad Térmica Muestra 4.....	97
Tabla 34 Susceptibilidad Térmica Muestra 4.....	98
Tabla 35 Resultados del Ensayo de Máquina de Los Ángeles para las muestras de Agregado Mineral	114
Tabla 36 Especificaciones INVIAS Mezclas Asfálticas en Caliente de Gradación Continua - Máquina de Los Ángeles	115
Tabla 37 Especificaciones IDU Mezclas Asfálticas en Caliente Densa, Semidensa y Gruesa - Máquina de Los Ángeles	115
Tabla 38 Especificaciones IDU Mezcla Asfálticas en Caliente de Alto Módulo - Máquina de Los Ángeles.....	116
Tabla 39 Especificaciones IDU Mezcla Asfálticas en Caliente Drenante - Máquina de Los Ángeles.....	116
Tabla 40 Especificaciones IDU Mezcla Asfálticas en Caliente Abierta - Máquina de Los Ángeles.....	116
Tabla 41 Especificaciones IDU Mezcla Asfálticas en Caliente Discontinua para Capa de Rodadura (Microaglomerado en Caliente) - Máquina de Los Ángeles	117
Tabla 42 Resultados Ensayo Micro Deval Agregado Mineral	118

Tabla 43 Especificaciones INVIAS Mezclas Asfálticas en Caliente de Gradación Continua – Micro Deval	118
Tabla 44 Especificaciones IDU Mezclas Asfálticas en Caliente Densa, Semidensa y Gruesa – Micro Deval.....	119
Tabla 45 Especificaciones IDU Mezcla Asfálticas en Caliente de Alto Módulo – Micro Deval	119
Tabla 46 Especificaciones IDU Mezcla Asfálticas en Caliente Drenante – Micro Deval	120
Tabla 47 Especificaciones IDU Mezcla Asfálticas en Caliente Abierta - Micro Deval	120
Tabla 48 Especificaciones IDU Mezcla Asfálticas en Caliente Discontinua para Capa de Rodadura (Microaglomerado en Caliente) – Micro Deval.....	120
Tabla 49 Resultados Porcentaje de Caras Fracturadas Agregado Mineral.....	122
Tabla 50 Mezclas Asfálticas en Caliente de Gradación Continua Especificaciones INVIAS para Caras Fracturadas, agregado grueso (Para una cara)	122
Tabla 51 Especificaciones IDU Mezclas Asfálticas en Caliente Densa, Semidensa y Gruesa – Caras Fracturadas	123
Tabla 52 Especificaciones IDU Mezcla Asfálticas en Caliente de Alto Módulo – Caras Fracturadas.....	123
Tabla 53 Especificaciones IDU Mezclas Asfáltica en Caliente Drenante– Caras Fracturadas	123
Tabla 54 Especificaciones IDU Mezclas Asfáltica en Caliente Abierta– Caras Fracturadas	124
Tabla 55 Especificaciones IDU Mezclas Asfáltica Discontinua para Capa de Rodadura (Microaglomerado en Caliente)– Caras Fracturadas.....	124
Tabla 56 Tabla Resumen Índice de Aplanamiento.....	125
Tabla 57 Tabla Resumen Índice de Alargamiento.....	125

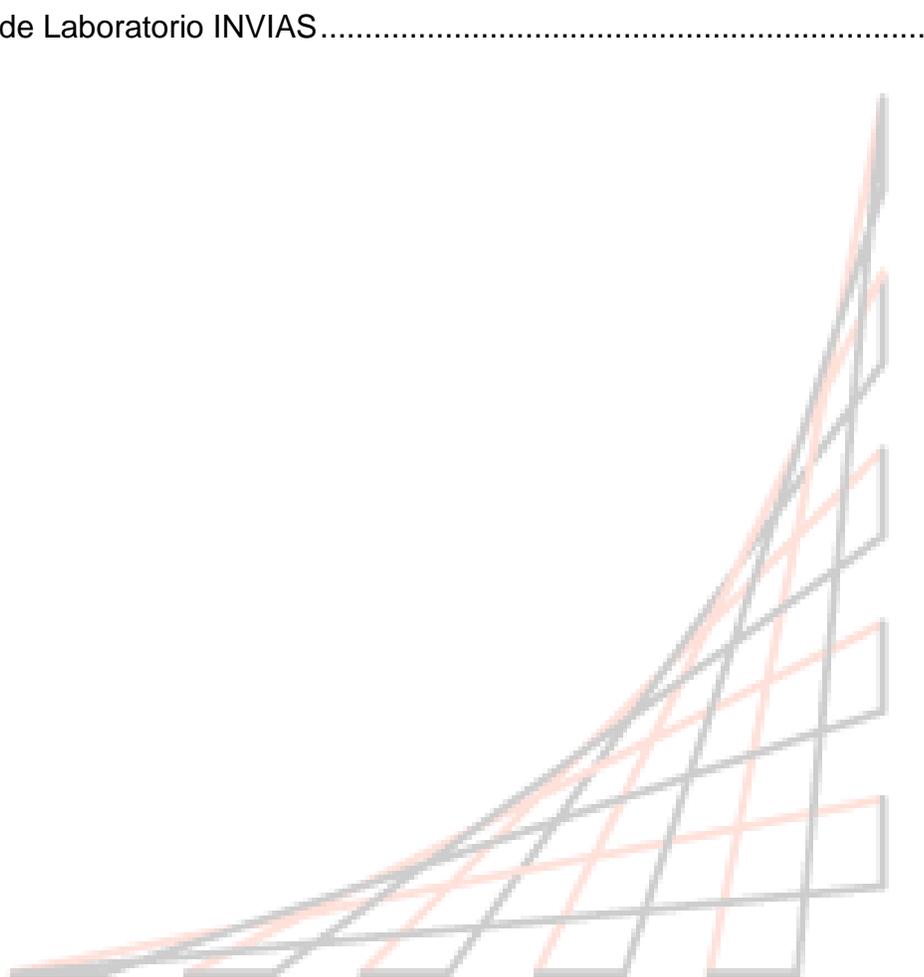
ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Producción de HMA y WMA entre el 2007-2012 en Francia, Europa y USA-Transportation Research Board, 2014	17
Figura 2 Comparación de toneladas de RAP aceptadas para su uso en mezclas asfálticas y toneladas de RAP usadas o dispuestas en botaderos (million Tons),	

2009-2017-Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage 2017	18
Figura 3 Tambor de micro Fresado-Randy C. West, 2015.....	20
Figura 4 Demolición de carpeta asfáltica-Randy C. West, 2015	21
Figura 5 Pila contaminada con tierra-Randy C. West, 2015.....	25
Figura 6 Acopio horizontal en capas-Randy C. West, 2015	26
Figura 7 Pila cónica cubierta adecuadamente-Randy C. West	27
Figura 8 Pasos del correcto muestreo (1-2-3-4)-Randy C. West.....	31
Figura 9 Pasos del correcto muestreo (5-6-7-8)- Randy C. West.....	31
Figura 10 Pilas debidamente separadas-Fujie Zhou, Gautam Das, Tom Scullion & Sheng Hu, 2010	33
Figura 11 Acopio horizontal-Fujie Zhou, Gautam Das, Tom Scullion & Sheng Hu, 2010	34
Figura 12 Superficie pavimentada que favorece el drenaje y pila cubierta Randy C. West.....	35
Figura 13 Pilas debidamente separadas por fracciones y marcadas- Fujie Zhou, Gautam Das, Tom Scullion & Sheng Hu, 2010	36
Figura 14 Acopio Muestra 1	52
Figura 15 Planta Asfáltica Entidad 1	53
Figura 16 Acopio Muestra 2	55
Figura 17 Vista de la Planta Entidad 2	55
Figura 18 Acopio Muestra 3	56
Figura 19 Vista de la planta de la Entidad 4 con el acopio de RAP.....	57
Figura 20 Acopio Muestra 4	58
Figura 21 Granulometría RAP Muestra 1	59
Figura 22 Granulometría RAP Muestra 2	60
Figura 23 Curva Granulométrica RAP.....	61
Figura 24 Curva Granulométrica Agregado Mineral Vs. RAP Muestra 1.....	62
Figura 25 Curva Granulométrica Agregado Mineral Muestra 3	63
Figura 26 Curva Granulométrica Agregado Mineral Vs. RAP Muestra 2.....	63
Figura 27 Curva Granulométrica Agregado Mineral Muestra 4	64
Figura 28 Curva Granulométrica BG-40 INVIAS	65
Figura 29 Curva Granulométrica BG-27 INVIAS	66
Figura 30 Curva Granulométrica BG-38 INVIAS	67
Figura 31 Curva Granulométrica BG-25 INVIAS	68

Figura 32 Pulverizado del Pavimento Existente	69
Figura 33 Curva Granulométrica SBG-50 INVIAS.....	70
Figura 34 Curva Granulométrica SBG-38 INVIAS.....	71
Figura 35 Curva Granulométrica BG-25 IDU.....	72
Figura 36 Curva Granulométrica BG-38 IDU.....	73
Figura 37 Curva Granulométrica SB-50 IDU	74
Figura 38 Curva Granulométrica PEA B - IDU	75
Figura 39 Curva Granulométrica PEA A - IDU	76
Figura 40 Resultados Viscosidades	87
Figura 41 Viscosidades Muestra 1 2018-II y 2016-II	88
Figura 42 Viscosidades Muestra 2 2018-II y 2016-II	89
Figura 43 Viscosidades Muestra 3 2018-II y 2016-II	90
Figura 44 Curva de Susceptibilidad Térmica del Cemento Asfáltico Recuperado - Muestra 1	93
Figura 45 Curva de Susceptibilidad Térmica del Cemento Asfáltico Recuperado - Muestra 2	95
Figura 46 Curva de Susceptibilidad Térmica del Cemento Asfáltico Recuperado - Muestra 3	96
Figura 47 Curva de Susceptibilidad Térmica del Cemento Asfáltico Recuperado - Muestra 4	97
Figura 48 Curva Granulométrica Agregado Mineral.....	100
Figura 49 Curva Granulométrica MDC-25.....	101
Figura 50 Curva Granulométrica MDC-10.....	102
Figura 51 Curva Granulométrica MDC-19.....	102
Figura 52 Curva Granulométrica MSC-19.....	104
Figura 53 Curva Granulométrica MSC-25.....	104
Figura 54 Curva Granulométrica MGC-33.....	105
Figura 55 Gráfica 26 Curva Granulométrica MGC-25.....	106
Figura 56 Curva Granulométrica MAM-25.....	107
Figura 57 Curva Granulométrica MD-19	108
Figura 58 Curva Granulométrica MD-13.....	108
Figura 59 Curva Granulométrica MD-25	109
Figura 60 Curva Granulométrica MS-19.....	110
Figura 61 Curva Granulométrica MS-38.....	110
Figura 62 Curva Granulométrica MS-25.....	111

Figura 63 Curva Granulométrica MG-25	112
Figura 64 Curva Granulométrica MG-38	112
Figura 65 Curva Granulométrica MAM-25.....	113
Figura 66 Esquema de una partícula fracturada con cara fracturada-Normas Ensayos de Laboratorio INVIAS.....	121



ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO

VIGILADA MINEDUCACIÓN

1. INTRODUCCIÓN

Desde hace algún tiempo se viene evidenciando la importancia del reciclaje en la sociedad, esto debido a que el no hacerlo contribuye a un desperdicio de un material que puede servir nuevamente en la industria. El reciclaje es un concepto que nos trae a la mente en principio el proceso de reutilización de materiales sólidos desechos de las sociedades como plásticos, cartón etc. Pero este concepto es aplicable también en el caso de los pavimentos a través del RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*) como un material de aporte y como componente de nuevas mezclas, que ha tomado cada vez más valor. Al pasar de los años el RAP ha sido motivo de numerosos estudios y se encuentran a nivel mundial interesantes desarrollos como los mostrados en (Copeland, 2011) y (Austroads, 2013) así como por varios investigadores en Colombia; específicamente se conocen las desarrolladas en las Universidades de los Andes y Militar Nueva Granada.

El interés en este material está en aumento debido a que la ingeniería se está concientizando y está entendiendo que para lograr avance se requiere de estructuras sostenibles encaminadas hacia una economía circular y no lineal. Estas estructuras son aquellas que no solo consideran el ciclo de construcción si no también el ciclo de vida en las cuales intervienen materiales que pueden reemplazar a aquellos componentes que no son renovables como los agregados en el caso de las estructuras de pavimento. También se busca un ahorro energético en la producción y una reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

Para el presente trabajo, se pretende dar una mirada al uso del RAP en Bogotá, conocer como es el mercado, así como evaluar cómo se maneja, acopia y procesa este material - 100% reciclable. Es de suma importancia estudiar este material para crear políticas para su uso, ya que en la actualidad no se encuentra un documento concreto en este tema, aún cuando algunas instituciones como el IDU e INVIAS han comenzado a especificar su tratamiento y uso como un RCD (Residuo de Construcción y Demolición) o MBR (Material Bituminoso Reciclado) en el caso del IDU.

Con este trabajo se espera comparar las especificaciones del IDU con las del INVIAS en lo que respecta al RAP, considerando a su vez el mercado de este material a través de indagaciones sobre los volúmenes que generan y mueven entidades como UMV (Unidad de Mantenimiento Vial) e IDU (Instituto de Desarrollo

Urbano) del ámbito público y empresas como CTU S.A (Compañía de Trabajos Urbanos).

A lo largo del año 2019 se ampliará esta información, lo que hace de este documento la primera entrega de las investigaciones y análisis realizados durante el año 2018.

Así mismo, en el documento se presentarán los resultados de algunos ensayos hechos a muestras pertenecientes a las cuatro entidades en el periodo 2016-2, por el Semillero de Investigación en Pavimentos.

Por último, se complementa el trabajo que ha venido haciendo el Semillero de investigación en Pavimentos en lo que respecta a la caracterización y al acopio de este material ofreciendo algunas recomendaciones de buenas prácticas.

2. OBJETIVOS DEL PROYECTO

2.1. OBJETIVO GENERAL

- Generar un documento de ayuda para comprender el manejo del RAP en Bogotá.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Comparar las especificaciones del IDU con las del INVIAS en lo relativo al uso del RAP.
- Realizar visitas a las plantas y acopios de *UMV, IDU, CTU, CONCRESCOL, PAVIMENTOS COLOMBIA, MARIO HUERTAS PAVIMENTOS* para obtener información sobre el manejo y sobre los volúmenes de material utilizados, así como extraer muestras para su caracterización.
- Complementar el trabajo realizado por el Semillero de Investigación en Pavimentos correspondiente a la caracterización y acopio del RAP.

3. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO

Este documento se organiza en tres secciones las cuales corresponden a las etapas en las que se enfoca el trabajo, la **primera parte** corresponde a la comparación entre las especificaciones INVIAS e IDU en lo que respecta a todo lo relacionado con el RAP según INVIAS o MBR según el IDU. La **segunda parte** corresponde a la información recolectada del manejo del RAP en Bogotá, los volúmenes generados, tratados y utilizados, el principal uso que se le da y las estadísticas o datos recolectados por las entidades públicas y privadas que manejan este material y por último en la **tercera parte** se presentan los resultados y análisis de la caracterización realizada a las muestras suministradas por cada una de las organizaciones que fueron visitadas.

4. ESTADO DEL ARTE

4.1. GENERALIDADES

Las estructuras de pavimento se desarrollan para distribuir las cargas que son impuestas por el tránsito al nivel de subrasante, esta transferencia se hace a través de diferentes capas que van atenuando la carga para que a la subrasante llegue conforme a su capacidad portante, por esto se suele utilizar en las capas superiores materiales de una calidad mayor que en las inferiores como es en el caso de las capas de rodadura construidas con mezclas en caliente y agregados de excelente calidad, a medida que la vida del pavimento transcurre la capa superior sufre deterioros a causa del tránsito y las condiciones climáticas, por lo que llega un momento en el que hay que intervenir la vía para recuperar el nivel de serviciabilidad, en muchos casos se suele retirar la capa deteriorada y reemplazarla por una totalmente nueva lo que implica la utilización de nuevos agregados aún cuando el material retirado tiene la capacidad de reutilizarse o reciclarse. (Wirtgen Group, 2004).

El reciclaje del pavimento asfáltico (RAP) presenta grandes beneficios, entre los cuales se tiene la opción de disponer el material in situ haciendo uso de este en el momento de la obtención, lo que ayuda en gran manera a reducir el impacto ambiental que otra clase de procesos tienen tales como la explotación de canteras y el transporte. Estos procesos reducen costos produciendo un pavimento estructuralmente estable con los mismos materiales de la vía, haciendo que esta se

transforme en cantera y depósito logrando disminuir la sobreexplotación de canteras y la masificación de depósitos.

Otra opción es retirar el material y transportarlo a un lugar de acopio en el cual por procesos en plantas se pueden controlar mejor las características de este con el fin de hacerlo óptimo para su uso en nuevas mezclas en caliente y tibias. El RAP tiene la ventaja de que se puede utilizar a través de procesos en frío, tibio y caliente siendo este último en el que mayormente se aprovecha.

El método convencional para elaborar una mezcla asfáltica en caliente o HMA por sus siglas en inglés, requiere de una cantidad significativa de energía para la producción del asfalto, el secado de agregados y posteriormente la producción de la mezcla, se estima que 6 litros de combustible se requieren para secar y calentar una tonelada de agregado lo cual, llevándolo a la escala de un proyecto, se traduce en un enorme consumo.

Por otro lado, el calentamiento del asfalto, los agregados y la producción liberan una cantidad significativa de gases de efecto invernadero (GEI) y contaminantes nocivos, se estima que la cantidad de emisiones se duplica por cada 10°C de aumento en la temperatura de producción de la mezcla. Existe a su vez el problema de la escasez de agregados que implica el transporte de material desde mayores distancias. Por esto se deben adoptar nuevas tecnologías que garanticen un igual o mejor desempeño que las prácticas actuales reutilizando los materiales. (T.Anil Pradyumna, 2013)

Al traer la vista a las carreteras colombianas se observa que continuamente se presentan deterioros lo que conlleva a un periodo de vida corto, debido bien sea por una mala calidad en los materiales empleados, una estimación de tráfico inadecuada, por los procesos constructivos o insuficiencia en los drenajes. Por esto las vías colombianas son un aspirante perfecto para la aplicación de las tecnologías de reciclaje.

Los métodos de reciclaje reutilizan aquellos pavimentos defectuosos que con ayuda de ciertos elementos (asfaltos vírgenes, agentes rejuvenecedores, emulsiones...) pueden adquirir mejores características, por lo que se han desarrollado varias técnicas, entre ellas está el reciclado in situ en caliente, in situ en frío con cemento o con emulsiones bituminosas y el reciclado en planta.

El uso del RAP es un pequeño paso hacia una industria sostenible ya que se obtienen beneficios económicos, ambientales y sociales. Algunos beneficios de su uso son: la reducción en el costo del material virgen, las emisiones de carbono y el uso de recursos naturales no renovables. El uso de estos materiales en mezclas asfálticas debe asegurar propiedades de rendimiento o costo de ciclo de vida equivalentes o mejores. (TRANSPORTATION RESEARCH BOARD , 2014)

Si observamos las experiencias y tendencias internacionales nos encontramos con que el uso del RAP en Estados Unidos sigue creciendo desde que se empezó a utilizar en mezclas asfálticas en los años 80's, aún cuando originalmente las entidades estatales estaban preocupadas por las metodologías de diseño y el rendimiento a largo plazo, desde estas fechas los estudios han mejorado los conocimientos relacionados con el muestreo del RAP, las pruebas y la caracterización de los materiales, investigaciones recientes han sugerido que no es necesario realizar una inyección de asfalto cuando se utiliza menos del 25 % de RAP en una mezcla. (TRANSPORTATION RESEARCH BOARD , 2014)

A mediados del 2008 solo se usaba del 10 % al 20 % de RAP en mezclas asfálticas debido a la incertidumbre en su comportamiento a largo tiempo, pero con las experiencias e investigaciones recientes se ha encontrado que el uso del RAP ha resultado exitoso con las metodologías de diseño de mezcla Marshall y SuperPave, se considera además que si se usa RAP en mayores proporciones este puede aportar de manera beneficiosa en la cantidad de ligante a adicionar por lo cual influye en su desempeño a futuro, esto implica que el RAP tiene un porcentaje de ligante que se hace efectivo en las mezclas asfálticas con RAP. (TRANSPORTATION RESEARCH BOARD , 2014)

En el documento de la NCHPR "Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave Mix Design Method: Technician's Manual", se habla de algunas investigaciones que han mostrado que el comportamiento del RAP usado en mezclas asfálticas en caliente (HMA) depende de la cantidad; así, cuando el porcentaje presente en la mezcla es bajo (10%-20%), este se comporta más como "roca negra", lo que influye en la parte volumétrica y de rendimiento de la mezcla a través de su gradación y propiedades. Por el contrario, si la cantidad de RAP usado empieza a ser mayor (más de 20%), el material envejecido se mezcla con el virgen, afectando directamente sus propiedades de rendimiento, en este caso se le llama "partículas activas".

La llamada “roca negra”, actúa de manera similar al agregado puro, debido a la naturaleza de la película que lo envuelve (rígida) que hace más difícil la mezcla con el ligante nuevo, por el contrario, las partículas activas son más blandas y por tanto tienen tendencia a descomponerse.

Debido a que el ligante que puede aportar el RAP se encuentra envejecido en la mayoría de los casos, se debe considerar el uso de un asfalto más blando que permita llegar a la viscosidad esperada o el uso de rejuvenecedores, en la siguiente tabla se presenta una guía para la selección del ligante con base en el porcentaje de RAP a utilizar, se debe tener en cuenta que está basada en el método SuperPave en el cual se clasifica el asfalto por el grado de comportamiento (PG) por sus siglas en inglés. (TRANSPORTATION RESEARCH BOARD , 2014)

Tabla 1 Selección del asfalto según el contenido de RAP en la muestra-metodología Superpave

TABLE 3 Binder Selection Guidelines for RAP Mixtures According to AASHTO M 323

Recommended Virgin Asphalt Binder Grade	RAP Percent or Recycled Binder Content
No change in binder selection	<15
Select virgin binder one grade softer than normal (e.g., select a PG 58-28 if PG 64-22 would normally be used)	15–25
Follow recommendations from blending charts	>25

Aún cuando el uso del RAP se hizo más común a mediados de 1980 en Estados Unidos, fue hasta el 2007 que se estimó el contenido promedio de RAP en las nuevas mezclas asfálticas dando como resultado un 12%, el departamento de transporte de carolina del norte (DOT) encuestó a los (DOT) estatales sobre la cantidad de RAP que utilizaban y la cantidad permitida en lo cual se encontró que el máximo contenido de RAP en capas superficiales era del 25% pero siempre se usaba menos de este porcentaje, en las capas subyacentes si se permitían porcentaje mayor de RAP. En el 2009 se volvió a realizar la encuesta arrojando así que 27 de los 50 estados habrían aumentado los límites de RAP permitidos y en esos dos años el contenido nacional promedio del uso de RAP paso de 12% al 16.2% y la tendencia continuó en aumento como se evidencia en el 2012 con un contenido nacional promedio de RAP de casi 20%, aún cuando el uso de un alto porcentaje de RAP en los pavimentos puede aumentar el potencial de agrietamiento y daños por humedad en las capas de asfalto en servicio, esto da a entender que

es mayor el beneficio que el posible problema que se puede generar, además este problema se puede evitar. (TRANSPORTATION RESEARCH BOARD , 2014)

4.2. ESTADÍSTICAS INTERNACIONALES

4.3. ARGENTINA

En Argentina el uso del RAP ha ido en aumento al igual que en los países pioneros de este material, se permite el uso del 30% de RAP en mezclas asfálticas, su mayor aplicación es en estabilizaciones con emulsiones y se ha llegado a una producción en instalaciones modernas de unas 200 ton/hora de mezcla asfáltica con RAP mientras con sistemas convencionales la producción se reduce a una tasa de 50 ton/hora de mezcla asfáltica con RAP (Botasso, Cuattrocchio, Rebollo, & C.)

4.4. FRANCIA, USA Y EUROPA

En el siguiente grafico extraído de la Transportation Research Board, 2014 se presenta la producción total de HMA y WMA en Francia en comparación con las de Europa y los Estados Unidos, sobre la base de las cifras oficiales disponibles en 2013. La producción total de mezcla asfáltica en Europa fue de 276.4 millones de toneladas en 2012.

El RAP disponible en Europa fue de 49.6 millones de toneladas en 2012 (Alemania + Italia + Francia + Países Bajos \approx 75% del RAP disponible en Europa), lo que significa que un promedio de 17.9% del RAP fue suficiente para un total uso del RAP disponible.

El contexto francés es similar: hay 6,5 millones de toneladas de RAP disponibles, mientras que la producción total de mezcla asfáltica es de 35.3 millones de toneladas ($6.5 / 35.3 = 18.4\%$).

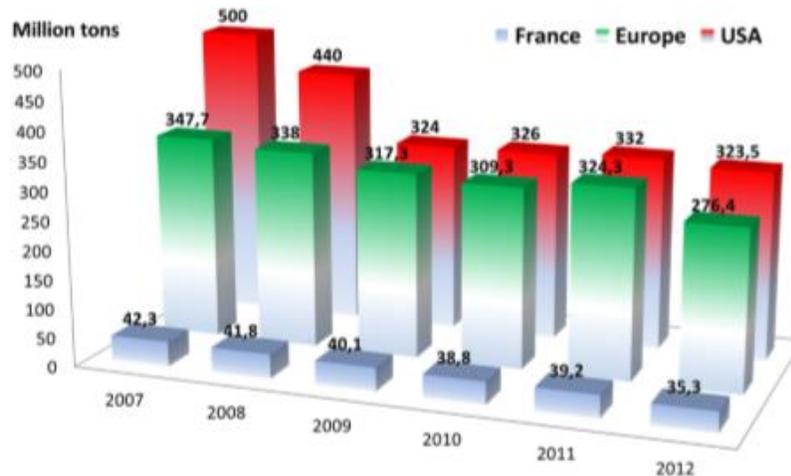


Figura 1 Producción de HMA y WMA entre el 2007-2012 en Francia, Europa y USA- Transportation Research Board, 2014

En Francia, casi el 40% del RAP se utiliza actualmente en capas no ligadas y para reciclaje en frío con emulsión, espuma o cemento hidráulico. (TRANSPORTATION RESEARCH BOARD , 2014)

En Estados Unidos según las estadísticas generadas por la NAPA y la FHWA en el documento Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage se expresa que a finales del 2017 se estima que se utilizaron 76,2 millones de toneladas de RAP en mezclas asfálticas lo que en comparación con el valor reportado a finales del 2016 implica una disminución del 0,91%, así mismo, comparando con el valor reportado en el 2009 cuando se llevó a cabo la primera encuesta se encontró un incremento del 36% en el uso del RAP en mezclas asfálticas y de 5,9% en la elaboración de mezclas asfálticas en el periodo 2009-2017.

El uso del RAP en el 2017 permitió ahorrar 3.8 millones de toneladas de ligante asfáltico (21,5 millones de barriles) y más de 72 millones de toneladas de agregado produciéndose así un ahorro total de 2,1 billones de dólares en el 2017 en la elaboración de mezclas asfálticas.

La cantidad de material acopiado a finales del 2017 fue de aproximadamente 102.1 millones de toneladas, la recuperación de 79,9 millones de toneladas de RAP para

su uso futuro ahorro aproximadamente 48,6 millones de yardas cubicas (37.2 millones de m³) de espacio en los botaderos.

Se puede observar en la siguiente figura extraida de Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage, 2017 que la cantidad de RAP que llega a los botaderos es casi nula en comparacion con la cantidad producida, en promedio se tiene que la cantidad que llega a los botaderos anualmente es inferior a 150 000 toneladas lo que equivale al 0.2% de la cantidad generada. (NAPA, 2017)

Figure 3: Comparison of Tons of RAP Accepted and Tons of RAP Used or Landfilled (Million Tons), 2009–2017

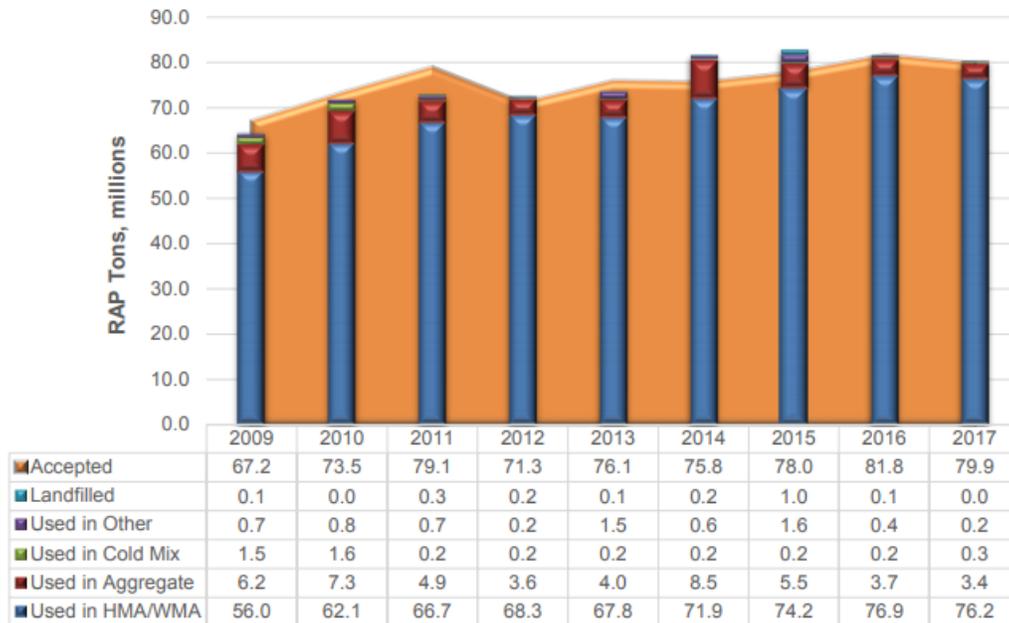


Figura 2 Comparación de toneladas de RAP aceptadas para su uso en mezclas asfálticas y toneladas de RAP usadas o dispuestas en botaderos (million Tons), 2009-2017-Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage 2017

4.5. PAÍSES BAJOS

Según el estudio de la Transportation Research Board, 2014, en el 2012 se contaba con 4 millones de toneladas de RAP que estaban disponibles en los países bajos, el 80% se utilizó en WMA y el 15% en reciclaje en frio. El 73% de las mezclas en caliente y tibias producidas utilizo RAP

La producción total de HMA y WMA en 2012 fue de 9.2 millones de toneladas. Cabe señalar que en 2012 solo se produjeron 70,000 toneladas de WMA.

En los Países Bajos hay 40 plantas de asfalto estacionarias y una planta móvil; 40 de ellos son aptos para el reciclaje parcial. El reciclado en caliente se realiza precalentando el RAP en un tambor paralelo a alrededor de 130 ° C.

4.6. HISTORIA

“El reciclaje de pavimentos asfálticos se remonta a 1915; sin embargo, a mediados del declive árabe de petróleo de la década de 1970, el dramático aumento en el costo del asfalto incitó a un renovado interés en el uso de RAP” (TRANSPORTATION RESEARCH BOARD , 2014)

Debido a que se buscaba una forma de reducir la demanda de asfalto lo cual llevo a tecnologías de reciclaje que permitían reducir los costos de las mezclas asfálticas, algunas de las practicas desarrolladas durante este periodo aún son utilizadas en la construcción y rehabilitación de pavimentos.

El reciclaje de pavimentos conlleva beneficios económicos y ambientales. El reciclaje reduce la demanda de material granular virgen y de asfalto los cuales no son renovables y por lo tanto se reduce la energía y las emisiones asociadas con la extracción y el transporte de esos materiales.

Desde la utilización del RAP en mezclas asfálticas se ha buscado que siempre se cumplan las siguientes condiciones para su aceptación

1. Las mezclas que contienen RAP deben cumplir los mismos requisitos que las mezclas elaboradas en su totalidad con materiales vírgenes.
2. Las mezclas que contienen RAP deben tener un rendimiento igual o mejor que las mezclas elaboradas en su totalidad con materiales vírgenes.

Algunos estudios en los cuales se comparan mezclas con RAP y mezclas con agregados vírgenes han demostrados que las mezclas que tienen hasta un 30% de RAP se comportan igual que una mezcla con agregados vírgenes (Randy C. West, 2015)

VIGILADA MINEDUCACIÓN

4.7. OBTENCIÓN

El RAP se puede obtener de varias formas, la más común es el fresado de la carpeta asfáltica, en este proceso la fresadora cuenta con un rodillo con dientes que van

triturando la carpeta asfáltica obteniéndose un material con una distribución granulométrica bastante homogénea, la calidad del RAP obtenido por este medio depende de parámetros como la dirección del corte, la velocidad, el tipo de diente usado, además de la temperatura del lugar y la viscosidad del asfalto. Otra forma de obtener el RAP es de la demolición en bloques de carpetas asfálticas, estos bloques se transportan a la planta en donde serán triturados a un tamaño máximo nominal (TMN) conveniente según el uso que se le dará. El material que proviene de residuos de plantas asfálticas o mezclas que fueron rechazadas porque no llegaron al lugar de instalación con la temperatura adecuada también son consideradas como RAP.

4.8. FRESADO

La máquina de fresado cuenta con un tambor que tiene varios dientes, los cuales trituran la carpeta asfáltica a la profundidad requerida, la velocidad a la que gira es de aproximadamente 200 RPM, se suele presentar que la granulometría del pavimento resulta afectada en el proceso debido a los impactos que van rompiendo el agregado mineral original de la capa lo que se refleja en una granulometría más fina después del proceso, esto depende la dureza y fragilidad (resistencia al impacto) del agregado y la rigidez del asfalto (temperatura del asfalto en el momento del fresado), la velocidad de fresado y la profundidad de corte.

En el proceso de fresado se debe verificar que el material no se contamine con tierra, material de base, geotextiles u otros materiales, si el material está contaminado se deberá acopiar en una pila diferente a la pila donde se acopia el



Figura 3 Tambor de micro Fresado-Randy C. West, 2015

material para usarse en mezclas asfálticas, el porcentaje máximo de contaminante del RAP es del 1%. (Randy C. West, 2015)

4.9. DEMOLICIÓN DE PAVIMENTO

El RAP se puede obtener de la demolición completa de la carpeta asfáltica, esto se puede hacer con retroexcavadoras que levanten las carpetas, el resultado de este procedimiento son bloques como se muestra a continuación.



Figura 4 Demolición de carpeta asfáltica-Randy C. West, 2015

Estos bloques muchas veces se ven contaminados un poco por residuos provenientes de la base granular, para reciclar este material se requiere de trituración de los bloques el cual se hace en el acopio generalmente. Una de las ventajas es que no se requiere maquinaria especializada en la demolición, pero tiene la desventaja de que no se puede utilizar en bloques y requiere de la trituración. Si el material presenta contaminación se recomienda no usarlo en mezclas asfálticas. (Randy C. West, 2015)

4.10. RESIDUOS DE PLANTAS

El material sobrante de las labores de operación de la planta puede aprovecharse al considerar este residuo como RAP, los residuos se generan en la transición entre mezcla y la limpieza, otro desperdicio es el material proveniente de mezclas rechazadas por su baja o alta temperatura o con un revestimiento incompleto del material, una de las principales características del RAP proveniente de desperdicios de plantas es que al no haber estado expuesto a las condiciones climáticas por muchos años como en los otros dos casos anteriores, el asfalto no presenta un grado de envejecimiento tan alto, también conservan su granulometría ya que no se les ejercen fuerzas de impacto que rompan el agregado. (Randy C. West, 2015)

4.11. APLICACIONES DEL RAP

El RAP puede utilizarse de varias formas unas óptimas que otras, empezaremos de la menos aconsejable a la mejor opción. Es posible usar el RAP como un material de relleno en el cual se trata el material como un agregado de baja calidad, no es óptimo este uso porque se están desperdiciando agregados que en su momento cumplían con los altos requerimientos de las especificaciones y no se está teniendo en cuenta el asfalto que recubre estas partículas. Lo mismo ocurre cuando se utiliza como sub-base y base simplemente.

Una mejor forma de utilizarlo es como una base estabilizada con asfalto o con cemento, en este caso se están aprovechando un poco mejor debido a la calidad de los agregados, pero de igual forma se está desperdiciando el asfalto que posee el RAP. En estos usos se han desarrollado tecnologías que son beneficiosas debido al ahorro en energía como lo son las estabilizaciones con asfalto espumado y RAP o el uso del RAP en mezclas tibias en las cuales ya una parte del asfalto se vuelve efectivo, es decir aporta a la mezcla y por ende debe tenerse en cuenta en el diseño aún cuando se tienen bastantes dudas acerca de qué porcentaje realmente interviene. El reciclaje de mezclas en frío puede resultar en pavimentos estables que generar un ahorro entre el 40% y 50 % del costo en comparación con métodos convencionales, (Federal Highway Administration, 1997)

Por último, se cree que el mejor uso que se le puede dar al RAP es en nuevas mezclas asfálticas en caliente debido a que todas las características del material entran en juego al aportar agregados de alta calidad y una cantidad de ligante generando ahorros en agregados y asfalto virgen según la cantidad de RAP utilizado

en la mezcla, en muchos casos se requiere de la ayuda de un aditivo rejuvenecedor que puede ser un asfalto más blando.

Para seleccionar el rejuvenecedor se han desarrollado métodos basados en la determinación de la penetración a 25°C del ligante recuperado y la viscosidad absoluta o dinámica a 60°C del ligante recuperado (Gabriele Tebaldi, 2012).

En la literatura internacional se encontró la siguiente tabla realizada por la European Asphalt Pavement Association (EAPA) quienes en el 2009 recogieron las estadísticas correspondientes al reciclaje que se muestran a continuación (ASEFMA;CEDEX;IECA, 2011)

Tabla 2 Tasas de reciclaje en diferentes países europeos- European Asphalt Pavement Association

País	(t) Material asfáltico reciclable disponible	% Material asfáltico reciclable disponible usado en				% De la producción de las nuevas mezclas en caliente y templadas que contengan material reciclado
		Reciclado en caliente y reciclado semicaliente	Reciclado templado	Reciclado en frío	Capas granulares	
Alemania	14.000.000	82			18	60
Austria	400.000	85		5	10	
Bélgica	1.300.000	57				44
Dinamarca	307.000	55	0	0	45	46
Eslovenia	15.360	30	20	50		
España	1.850.000	52	9	15	24	9
Finlandia	500.000					
Francia	7.053.000	41				6,8
Grecia	0	0	0	0	0	0
Hungría	3.000	66	0		33	5,0
Islandia	30.000				25	6,0
Irlanda	100.000	30				1
Italia	12.000.000	20				
Noruega	720.000	11	0	10	63	9
Países Bajos	4.500.000	74				72
Polonia	1.100.000	5				0,2
Reino Unido	4.000.000					
República Checa	1.500.000	20	0	30	30	10
Rumania	13.000	60	10	15	3	12
Suecia	1.000.000	75	10	10	5	50
Suiza	1.200.000	50		50		17
Turquía	1.069.000	9			97	1

En la tabla anterior se observa cómo algunos países han empezado a implementar el uso del RAP de diferentes formas, influyendo así en una práctica de conservación de recursos y ahorros energéticos.

4.12. LIMPIEZA

Al hacer el retiro de la carpeta asfáltica debe retirarse “materia extraña” comúnmente presente (TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2012):

- Alquitrán: Los efectos nocivos para la salud y para el medio ambiente de esta sustancia son comúnmente conocidos, y se agudizan al calentar el asfalto contaminado, por lo cual es necesario realizar pruebas que detecten esta sustancia y posibiliten el manejo adecuado por parte de los expertos.
- Asbesto: Debe darse un tratamiento similar al dado al alquitrán; detectar la presencia de la sustancia y darle un manejo adecuado, minimizando los efectos negativos.
- Marcas Viales: La señalización termoplástica gruesa puede afectar el comportamiento del asfalto reciclado, por lo que es necesario retirar antes del fresado.

4.13. ACOPIO

Los acopios de RAP no suelen tener reglamentos específicos de cómo se deben preparar y controlar, pero a medida que pasa el tiempo y con la experiencia han surgido recomendaciones de buenas prácticas para evitar muchos de los problemas que afectan al material.

Los acopios de RAP requieren de un área bastante grande ya que las pilas deben separarse por fuentes, como la mayoría de las veces no se cuenta con un espacio tan grande se suele acopiar el material en pilas multifuente lo cual reduce el área utilizada, pero aumenta la variabilidad del material en general, más adelante se darán las recomendaciones correspondientes a la forma de acopiar el RAP para reducir al mínimo la variabilidad.

El material puede que llegue ya triturado a las zonas de acopio en el caso de que se haga fresado, pueden llegar los viajes de las obras intervenidas con los bloques producto de la demolición o pueden disponerse los residuos de las plantas que en muchos casos están en la misma zona del acopio, es por esto que además de separar el material por fuente, es necesario, de igual manera, separarlo por forma de obtención debido a que cada forma de obtención requiere un tratamiento y cuenta con características diferentes.

Los acopios de RAP deben mantenerse en adecuadas condiciones, esto incluye mantener las pilas libres de contaminación como suciedad, desperdicios o vegetación. Los acopios deben estar lo suficientemente coordinados con los transportistas del RAP para que este material se disponga en el lugar adecuado y no cometer errores que contaminen las pilas con desechos de construcción no deseados, los conductores también deben tener las camas de los camiones limpias si transportaran material que pueda aprovecharse. (Randy C. West, 2015)



Figura 5 Pila contaminada con tierra-Randy C. West, 2015

Una de las formas de acopiar es en capas horizontales como se muestra en la siguiente imagen en la cual la volqueta dispone el material, un cargador pequeño que no llegue a compactar el terreno lo extiende en capas, en caso de requerir

trituración una excavadora debe retirar el material logrando mezclar el material de todas las capas. (Randy C. West, 2015)

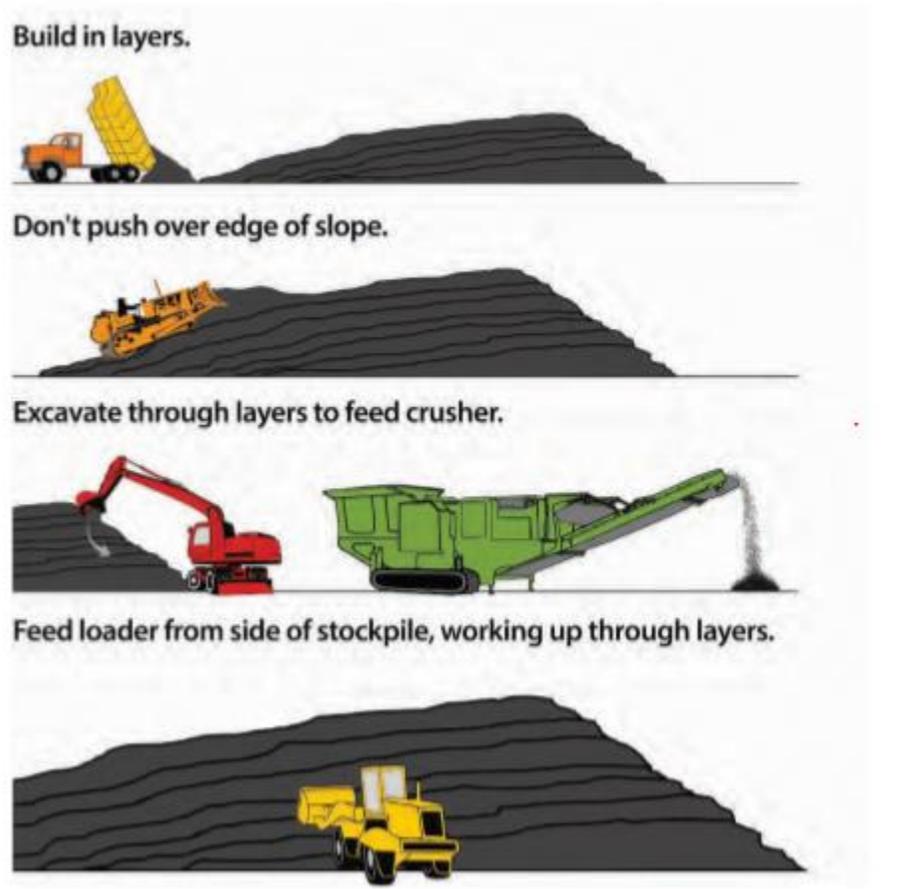


Figura 6 Acopio horizontal en capas-Randy C. West, 2015

También es posible disponer el material en pilas cónicas teniendo cuidado de no generar mucha segregación y con procesos continuos de mezcla de la pila, la segregación se debe evitar debido a que las partículas más grandes poseen mayor energía cinética y tenderán a irse a las partes más bajas de la pila donde se generarán concentraciones de tamaños grandes con bajos contenidos de asfalto mientras que en la parte superior se quedarán las partículas más pequeñas con altos contenidos de asfalto generando así variabilidad en la pila. Estas pilas se prefieren cuando se quiere reducir la humedad. (Randy C. West, 2015)

Otra forma de reducir la humedad es cubriendo la pila para evitar que la lluvia llegue a ella y ubicar la pila sobre una superficie inclinada pavimentada de preferencia.



Figura 7 Pila cónica cubierta adecuadamente-Randy C. West

En la siguiente tabla obtenida de (Randy C. West, 2015) se nombran algunas ventajas y desventajas del pretratamiento que se le da al RAP previo a su utilización en nuevas mezclas asfálticas.

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO

VIGILADA MINEDUCACIÓN

Tabla 3 Ventajas y desventajas del pretratamiento del RAP-Randy C. West, 2015

Process	Possible Advantages	Possible Disadvantages
Use of Millings Without Further Processing	<ul style="list-style-type: none"> • Avoids further crushing of aggregate particles in RAP, which may allow for higher RAP contents in mixes. • Lowest cost RAP processing option. • Millings from large projects are likely to have a consistent gradation and asphalt content. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requires multiple RAP stockpiles at the plant. • Millings from individual projects are different; therefore, when a particular millings stockpile is depleted, new mix designs must be developed with other RAP.
Screening RAP Before Crushing	<ul style="list-style-type: none"> • Limits crushing of aggregate particles in RAP, which reduces dust generation. 	<ul style="list-style-type: none"> • Few RAP crushing and screening units are set up to pre-screen RAP.
Crushing all RAP to a Single Size	<ul style="list-style-type: none"> • Allows the processed RAP to be used in many different mix types. • Generally provides good uniformity from RAP materials obtained from multiple sources. 	<ul style="list-style-type: none"> • Increases the dust content of RAP stockpiles, which will tend to limit how much RAP can be used in mix designs.
Fractionating RAP	<ul style="list-style-type: none"> • Using different sized RAP stockpiles provides much greater flexibility in developing mix designs. Fine RAP fraction is ideal for Thinlay mixes. • Heat transfer to fine RAP may be more efficient during plant mixing. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requires the most space for multiple smaller stockpiles. • Most expensive processing option (cost of fractionation unit plus additional RAP feed bins). • Due to higher AC contents, fine fractionated RAP stockpiles tend to have agglomerations, which may not feed well through the plant.

4.14. CARACTERIZACIÓN

La caracterización del RAP ofrece datos que cuando se reúnen en cantidad pueden aportar para realizar estadísticas acerca de las características de un acopio, es importante conocer las propiedades del RAP para comprender en qué forma es conveniente su uso, la caracterización se realiza a su vez para observar la variabilidad presente entre una misma fuente o diferentes fuentes, entre mezclas de fuentes y entre mezclas de fuentes con diferentes formas de obtención.

Con estos datos se puede saber que tan envejecido está el asfalto para comprender si se requieren rejuvenecedores o si se debe usar como una roca negra, también sirve para determinar la distribución de tamaños para poder hacer correcciones en su granulometría que se ajusten a las especificaciones según su uso. A veces se hacen ensayos adicionales con el fin de determinar el contenido de ligante que

aportarían el RAP en caso de usarse en una nueva mezcla y ensayos para verificar que los agregados que se utilizaron realmente cumplen las especificaciones.

Con el objetivo de determinar el aporte del RAP en una mezcla asfáltica, es necesario caracterizar el asfalto, previa extracción y recuperación, sin embargo, la necesidad de hacer este procedimiento radica directamente en la cantidad a usar, si el porcentaje de uso está entre 10% y 20%, el aporte al rendimiento de la mezcla no es significativo (como se vio anteriormente), por lo tanto este procedimiento no es necesario; por el contrario, si se usan cantidades mayores, el procedimiento es indispensable. (NCHRP (National Cooperative Highway Research Program), 2001)

Especificaciones internacionales como la EN 13108-8 “Bituminous mixtures – Material specifications – Part 8: Reclaimed asphalt” (2005) recomiendan que, por cada 500 toneladas acopiadas en una pila, se debe hacer un análisis con mínimo 5 muestras.

La especificación del estado de Illinois “Standard Specifications, Section 1031: RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT AND RECLAIMED ASPHALT SHINGLES”, establece, siguiendo lo anterior, que, durante el proceso de acopio, para las primeras 2000 Toneladas en una pila, es necesario tomar una muestra cada 500 Toneladas, y en adelante, una muestra cada 2000 Toneladas. Así, se requiere un mínimo de 5 muestras para pilas de 4000 Toneladas.

Mientras que, para el material entrante, la misma especificación consigna que debe tomarse una muestra cada 2000 Toneladas o cada semana, lo que ocurra primero. (Standard Specifications Illinois, 2014)

Por otro lado, en “Best Practices for RAP and RAS Management” se recomienda el muestreo de al menos un conjunto de muestras por cada 1000 toneladas, se deben tener 10 muestras para obtener buenas estadísticas, aunque después de demostrar la consistencia del acopio esta cantidad se puede reducir. (Randy C. West, 2015)

4.15. MUESTREO

A continuación, se presentan 8 pasos para un adecuado muestreo según el documento Best Practices for RAP and RAS Management

1. Usar un cargador frontal para excavar en la pila de RAP que se usará.
2. Vaciar el contenido de la pala en una superficie limpia para poder extraer las muestras de esta fracción de la pila.
3. Usar el cargador para extender el material con ayuda de la cuchilla de la pala para obtener una superficie plana.
4. Se tiene una versión más pequeña de la reserva de RAP.
5. Usar una pala de punta cuadrada para obtener la muestra de la superficie de la pequeña reserva.
6. Extraer material de tres partes diferentes de la mini reserva.
7. Combinar el material extraído de la misma mini reserva para generar una muestra, esta muestra se dividirá posteriormente en porciones de prueba.
8. Repetir estos pasos para obtener muestras de otras ubicaciones de la pila de RAP.

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO

VIGILADA MINEDUCACIÓN



Figura 8 Pasos del correcto muestreo (1-2-3-4)-Randy C. West



Figura 9 Pasos del correcto muestreo (5-6-7-8)- Randy C. West

Nota: No se deben combinar las muestras de diferentes lugares ya que se afecta los cálculos de la variabilidad.

El método que se prefiere para obtener muestras representativas es utilizar una fresadora para fresar una pequeña área en una ubicación representativa, este método requiere prever varias cosas como el cierre del carril y la reparación de la zona, pero genera una muestra más representativa para el diseño de mezclas. Se ha encontrado que el uso de un minicargador con un cabezal de fresado produce una gradación diferente a una fresadora de tamaño normal y también se ha establecido que tomar un núcleo y demolerlo en laboratorio no produce material representativo para diseños de mezclas. (Randy C. West, 2015)

4.16. ENSAYOS

Se encontró que los ensayos que se usaron en diferentes artículos tales como “Characterization of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) for Use in Bituminous Road Construction” o en las buenas prácticas citadas anteriormente son los siguientes:

- Granulometrías
- Ensayos de extracción de asfalto (centrifuga)
- Ensayos de recuperación de asfalto (destilación)
- Ensayo de penetración al asfalto recuperado
- Punto de ablandamiento
- Viscosidad a 60°C

4.17. MANEJO DE INVENTARIO

El manejo del inventario de RAP es una cuestión importante para tener en cuenta, en esta gestión se empieza por saber con cuanto RAP se cuenta y cuál se usa en mezclas asfálticas, esto con el fin de establecer metas claras en cuanto al uso de cada planta en particular.

En el documento “Best Practices for RAP and RAS Management” se plantean 4 pasos para realizar el análisis del inventario:

1. Un inventario de RAP en mano y RAP generado por año.
2. Un resumen de las mezclas producidas por año por tipos de mezcla y clientes.
3. Determinar la cantidad máxima de RAP que se puede utilizar.

4. Una comparación de la cantidad de RAP disponible con la cantidad de RAP necesaria.

En la gestión de inventario del RAP se debe decidir si el acopio en las pilas será en pilas clasificadas por fuentes o si serán pilas multifuente, esta decisión depende de si el RAP tiene otros aditivos como escorias, caucho o clases especiales de agregados, de si la reglamentación permite el uso de RAP multifuente para los diferentes usos, si se cuenta o no con el espacio disponible para el procesamiento y almacenamiento. (Randy C. West, 2015)

4.18. RECOMENDACIONES

- **Se recomienda acopiar el material en diferentes pilas, clasificadas por su procedencia**, esto reduce en cierto grado la variabilidad natural del RAP, en algunos casos no es posible por la falta de espacio.

Se muestran dos pilas del departamento de Texas en estados unidos donde se observa que las pilas están lo suficientemente separadas ya que el espacio no es problema. (Fujie Zhou, Gautam Das, Tom Scullion, & Sheng Hu, 2010)



Figura 10 Pilas debidamente separadas-Fujie Zhou, Gautam Das, Tom Scullion & Sheng Hu, 2010

- En caso de tener que acopiar material de distintas fuentes o procedencias en una misma pila, es necesario **poner una interfaz que logre separarlos**.

- Cada pila debe poder ser **plenamente identificada** de acuerdo con sus características y procedencia, por medio de alguna marca o ficha técnica que así lo permita.
- **Si el RAP presenta contaminantes se deberán eliminar** en caso de no hacerlo, se recomienda no utilizar este material en mezclas asfálticas, se puede usar como un agregado más para base o subbase (Randy C. West, 2015)
- **Si se transportara RAP en una volqueta, la cama de esta deberá ser limpiada adecuadamente antes de cargarla** para evitar contaminar el material con otros materiales no deseados. (Randy C. West, 2015)
- Se recomienda **evitar triturar o fresar el material varias veces** ya que esto tiende a generar mayor contenido de finos debido al proceso de molienda y mayor contenido de caras sin recubrimiento. (Randy C. West, 2015)
- Almacenar el material de tal manera que se **evite la segregación del material**, tener en cuenta un **buen sistema de drenaje** de las lluvias y **evitar la contaminación con el material subyacente** (pilas en capas). (Randy C. West, 2015)



Figura 11 Acopio horizontal-Fujie Zhou, Gautam Das, Tom Scullion & Sheng Hu, 2010

Se observa una pila acopiada horizontalmente debido a las grandes cantidades, esta distribución trae la preocupación de la compactación y la acumulación de humedad (Fujie Zhou, Gautam Das, Tom Scullion, & Sheng Hu, 2010)

- Muestrear y hacer pruebas a algunas ubicaciones de las pilas para **verificar su gradación y el tamaño máximo del agregado**. (Randy C. West, 2015)
- En caso de necesitar evitar el aumento de la humedad en las pilas es aconsejable **acopiar el material sobre una superficie inclinada de preferencia pavimentada que favorezca el drenaje, y a su vez cubrir la pila**, también se aconseja que las **pilas sean cónicas**. (Randy C. West, 2015)

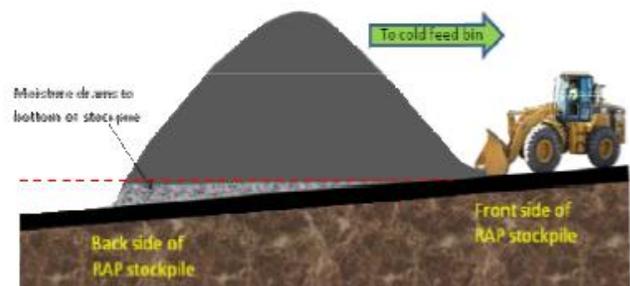
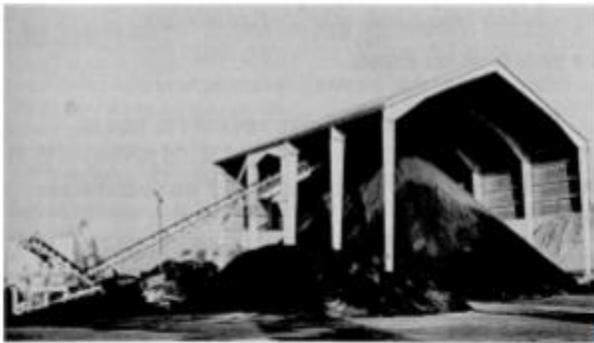


Figura 12 Superficie pavimentada que favorece el drenaje y pila cubierta Randy C. West

- Se debe **evitar el uso de maquinaria pesada en la superficie** de las pilas debe minimizarse ya que estas pueden compactar el material. Así mismo la altura de las **pilas debe limitarse a 30 pies (9 metros)** según (Randy C. West, 2015) para evitar el efecto de auto consolidación.
- Se recomienda **obtener un conjunto de entre 5 a 10 muestras cada 500 a 1000 toneladas** para generar datos que puedan establecer estadísticas acerca de un acopio.

- Se recomienda **mezclar las pilas multifuente a fondo** antes de procesarlas o fraccionarlas. (Fujie Zhou, Gautam Das, Tom Scullion, & Sheng Hu, 2010)
- Antes de utilizar el RAP en una mezcla este debe ser procesado, el preprocesamiento más común es la trituración para obtener diferentes tamaños, se recomienda **separar por pilas según el tamaño** para disminuir la variabilidad en las gradaciones, el uso del RAP se hará entonces tomando las fracciones necesarias de cada pila para cumplir las granulometrías. esto mejora el control sobre la granulometría, el contenido de asfalto y las propiedades volumétricas. (Fujie Zhou, Gautam Das, Tom Scullion, & Sheng Hu, 2010)
- Cribar el material antes para no pasar por la trituradora el material que ya cumple con el tamaño.

Se muestra a continuación dos pilas separadas en fracción gruesa y fracción fina debidamente marcadas.



Figura 13 Pilas debidamente separadas por fracciones y marcadas- Fujie Zhou, Gautam Das, Tom Scullion & Sheng Hu, 2010

5. PRIMERA PARTE: COMPARACIÓN ENTRE ESPECIFICACIONES INVIAS E IDU RELACIONADAS CON PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO

En vista de que la documentación acerca del RAP trata en mayor medida acerca de recomendaciones técnicas para el proceso de obtención, tratamiento según el uso que se le dará y acopio, y no acerca de normativas específicas sobre qué características debe tener o cumplir exactamente este material, se establece esta comparación entre las normativas vigentes para Colombia en lo que respecta al uso del RAP para tener un punto de referencia en cuanto a qué debe tenerse en cuenta para su correcto uso y adicionalmente resaltar las diferencias que se encuentran entre estas especificaciones. En Colombia se cuenta con las especificaciones INVIAS (Instituto Nacional de Vías) las cuales deben cumplirse a nivel nacional a menos que el proyecto tenga especificaciones particulares y en el caso de Bogotá, más concretamente, se cuenta con las especificaciones del IDU (Instituto de Desarrollo Urbano) en las cuales se establecen los criterios mínimos que deben cumplir las estructuras en cuanto a trabajos a nivel Bogotá.

5.1. ASPECTOS GENERALES

Se dispone en las especificaciones generales del INVIAS herramientas estadísticas para la aceptación de los trabajos las cuales se pueden usar para ver la variabilidad entre las muestras de RAP de los diferentes acopios con el fin de ayudar a determinar qué tan homogéneo es un acopio, estas herramientas estadísticas están pensadas para todo el control de calidad pero pueden utilizarse para el análisis del RAP, las especificaciones del IDU no contienen específicamente una sección en la que se expongan métodos o herramientas estadísticas, las especificaciones en general poseen un apartado de control de calidad y criterios de aceptación los cuales deben cumplirse para asegurar el buen desempeño de los materiales.

En la ESPECIFICACIÓN 101-18 CONCEPTOS Y DEFINICIONES TÉCNICAS del IDU se observó que no se encuentran todas las definiciones técnicas como lo serían la de MBR (Material Bituminoso Reciclado) que es como llaman al material que en la literatura internacional se conoce como RAP (Reclaimed Asphalt Pavement), en esta sección se esperaba encontrar todas las definiciones pertinentes que serán necesarias para el manejo de los siguientes capítulos de las especificaciones; con las especificaciones INVIAS ocurre lo mismo. Sin embargo, estas definiciones

técnicas si se encuentran en los capítulos más específicos donde se trata el tema al que hace referencia.

En ambas especificaciones se delega la responsabilidad de los correctos documentos informativos a los constructores.

En el artículo 201-13 del INVIAS se trata la demolición de pavimentos rígidos, pisos y andenes de concreto y bordillos y su utilización en construcción de rellenos, no hablan del RAP en esta Sección aún cuando este material también puede ser utilizado como relleno, aunque no es lo ideal considerando los demás usos (optimización) que se le pueden dar al RAP.

Se expresa que el tamaño máximo (TM) de los fragmentos que provienen de la demolición de estas estructuras no debe superar dos tercios ($2/3$) del espesor de la capa en la cual se vaya a colocar y el volumen de los fragmentos no debe ser mayor en ningún caso a veintiocho decímetros cúbicos (28 dm^3) por cuestiones de compactación, este material debe ser acopiado en los lugares indicados en los planos si es en obra o en donde designen las especificaciones particulares a menos que el interventor autorice otro lugar.

5.2. SUBBASES Y BASES

En la ESPECIFICACIÓN 500-18-18 GENERALIDADES PARA BASES Y SUBBASES del IDU y en la especificación del INVIAS CAPÍTULO 3 - ARTÍCULO 300. DISPOSICIONES GENERALES PARA LA EJECUCION DE AFIRMADOS, SUB-BASES Y BASES GRANULARES Y ESTABILIZADAS EN EL ARTICULO 300-13

El INVIAS define los siguientes niveles de tránsito basado en los ejes equivalentes que se esperan así:

Tabla 4 Niveles de Tránsito INVIAS-Especificaciones INVIAS

NIVEL DE TRÁNSITO	NÚMERO DE EJES EQUIVALENTES DE 80 kN EN EL CARRIL DE DISEÑO, N_{80kN} , MILLONES
NT1	$N_{80kN} \leq 0.5$
NT2	$0.5 < N_{80kN} \leq 5.0$
NT3	$N_{80kN} > 5.0$

En general las especificaciones del INVIAS definen 3 clases de sub-base granular en función de la calidad de los agregados y franjas granulométricas que debe cumplir según el tamaño máximo nominal de las partículas (TMN), en la siguiente tabla se muestra las clases de Sub-bases y Bases que deben utilizarse para diferentes niveles de tránsito.

Tabla 5 Uso Típico de las diferentes clases de Base granular- Especificaciones

CLASE DE BASE GRANULAR	NIVEL DE TRÁNSITO
Clase C	NT1
Clase B	NT2
Clase A	NT3

Tabla 6 Uso Típico de las diferentes clases de sub-base granular- Especificaciones INVIAS

CLASE DE SUB-BASE GRANULAR	NIVEL DE TRÁNSITO
Clase C	NT1
Clase B	NT2
Clase A	NT3

Los Requisitos de calidad de los agregados que deben cumplir los agregados según INVIAS se muestran en la siguiente tabla, estos requisitos los debe cumplir el RAP en caso de que el uso que se le vaya a dar sea de sub-base o de base.

Tabla 7 Requisitos de los agregados para bases granulares INVIAS- Especificaciones INVIAS

CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV	BASE GRANULAR		
		CLASE C	CLASE B	CLASE A
Dureza (O)				
Desgaste en la máquina de los Ángeles (Gradación A), máximo (%)	E-218	40	40	35
- 500 revoluciones		8	8	7
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%)	E-238	-	30	25
Evaluación de la resistencia mecánica por el método del 10 % de finos	E-224	-	70	90
- Valor en seco, mínimo (kN)		-	75	75
- Relación húmedo/seco, mínimo (%)				
Durabilidad (O)				
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%)	E-220	12	12	12
- Sulfato de sodio		18	18	18
- Sulfato de magnesio				
Limpieza (F)				
Límite líquido, máximo (%)	E-125	25	-	-
Índice de plasticidad, máximo (%)	E-125 y E-126	3	0	0
Equivalente de arena, mínimo (%)	E-133	30	30	30
Valor de azul de metileno, máximo (Nota 1)	E-235	10	10	10
Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznales, máximo (%)	E-211	2	2	2
Geometría de las Partículas (F)				
Índices de alargamiento y aplanamiento, máximo (%)	E-230	35	35	35
Caras fracturadas, mínimo (%)	E-227	50	70	100
- Una cara		-	50	70
- Dos caras				
Angularidad de la fracción fina, mínimo (%)	E-239	-	35	35
Resistencia del material (F)				
CBR (%): porcentaje asociado al grado de compactación mínimo especificado (numeral 330.5.2.2.2); el CBR se medirá sobre muestras sometidas previamente a cuatro días de inmersión.	E-148	≥ 80	≥ 80	≥ 95

Tabla 9 Requisitos de los agregados para sub-bases granulares INVIAS- Especificaciones INVIAS

CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV	SUB-BASE GRANULAR		
		CLASE C	CLASE B	CLASE A
Dureza (O)				
Desgaste en la máquina de los Ángeles (Gradación A), máximo (%) - 500 revoluciones (%)	E-218	50	50	50
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%)	E-238	-	35	30
Durabilidad (O)				
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%) - Sulfato de sodio - Sulfato de magnesio	E-220	12 18	12 18	12 18
Limpieza (F)				
Límite líquido, máximo (%)	E-125	25	25	25
Índice de plasticidad, máximo (%)	E-125 y E-126	6	6	6
Equivalente de arena, mínimo (%)	E-133	25	25	25
Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznable, máximo (%)	E-211	2	2	2
Resistencia del material (F)				
CBR (%): porcentaje asociado al valor mínimo especificado de la densidad seca, medido en una muestra sometida a cuatro días de inmersión, mínimo.	E-148	30	30	40

También se muestran a continuación las franjas granulométricas que deben cumplir según el tamaño máximo nominal (TMN)

Tabla 8 Franjas granulométricas del material de base granular INVIAS- Especificaciones INVIAS

TIPO DE GRADACIÓN	TAMIZ (mm / U.S. Standard)							
	37.5	25.0	19.0	9.5	4.75	2.00	0.425	0.075
	1 ½"	1"	¾"	3/8"	No. 4	No. 10	No. 40	No. 200
	% PASA							
BASES GRANULARES DE GRACACIÓN GRUESA								
BG-40	100	75-100	65-90	45-68	30-50	15-32	7-20	0-9
BG-27	-	100	75-100	52-78	35-59	20-40	8-22	0-9
BASES GRANULARES DE GRADACIÓN FINA								
BG-38	100	70-100	60-90	45-75	30-60	20-45	10-30	5-15
BG-25	-	100	70-100	50-80	35-65	20-45	10-30	5-15
Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo (±)	0 %	7 %			6 %		3 %	

Tabla 10 Franjas granulométricas del material de sub-base granular INVIAS- Especificaciones INVIAS

TIPO DE GRADACIÓN	TAMIZ (mm / U.S. Standard)								
	50.0	37.5	25.0	12.5	9.5	4.75	2.00	0.425	0.075
	2"	1 1/2"	1"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 10	No. 40	No. 200
% PASA									
SBG-50	100	70-95	60-90	45-75	40-70	25-55	15-40	6-25	2-15
SBG-38	-	100	75-95	55-85	45-75	30-60	20-45	8-30	2-15
Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo (±)	0 %	7 %				6 %			3 %

Para prevenir segregación y garantizar los niveles de compactación y resistencia exigidos por la especificación INVIAS para sub-base, el material que produzca el constructor deberá dar lugar a una curva granulométrica uniforme y sensiblemente paralela a los límites de la franja, sin saltos bruscos de la parte superior de un tamiz a la inferior de un tamiz adyacente y viceversa.

La relación entre el porcentaje que pasa el tamiz de 75 µm (No. 200) y el porcentaje que el tamiz de 425 µm (No. 40), no deberá exceder de 2/3 y el tamaño máximo nominal no deberá exceder de 1/3 del espesor de la capa compactada.

En las especificaciones IDU no es claro si se designa por tamaño máximo nominal o tamaño máximo, en la Tabla 500.1 "Denominación de los materiales para capas granulares-(nomenclaturas)" se encuentran las nomenclaturas de los materiales como por ejemplo:

MBR = Material de Pavimento Bituminoso Reciclado (Def 500.2.5)

AR = Agregado Reciclado

En esta parte las especificaciones IDU tienen diferencias con las INVIAS en la forma en la que se refieren a las mismas cosas, se debería conservar la nomenclatura, llaman a los residuos provenientes de la demolición de una carpeta asfáltica como parte de RAP; llaman "mejoramiento" a las estabilizaciones con: cemento hidráulico, emulsión asfáltica, asfalto espumado y cemento asfáltico.

En cuanto al Agregados pétreos el IDU establece que:

- Para Bases Granulares se requiere que una fracción del agregado provenga de trituración mecánica.
- Los materiales pétreos no deben ser susceptibles de ningún tipo de meteorización o alteración fisicoquímica apreciable bajo las condiciones más desfavorables, no deben dar origen a disoluciones dañinas para la estructura o contaminantes (corrientes de agua).
- Partículas duras, resistentes y durables, sin exceso de partículas planas, alargadas, blandas, deleznable y sin material orgánico (se dice cuanto se requiere en las especificaciones más puntuales).
- El uso total o parcial de escoria u otros productos inertes de desechos industriales, debe ser objeto de una especificación particular.

El IDU no considera al RAP o MBR dentro de las especificaciones referentes a Residuos de Construcción y Demolición (RCD)

En la sección 500.2.4 “Material granular producto de la valorización de residuos de construcción y demolición (RCD)” se establece la definición de RCD como:

RCD = Residuos de Construcción y Demolición

Y se enfoca en su uso como un material granular, se aclara que este no proviene de los pavimentos flexibles

Si el RCD es usado como material granular, se le llama AR (Agregado Reciclado), y debe cumplir:

- No debe mostrar signos de meteorización.
- El AR se debe tomar de sitios autorizados para su tratamiento contar con documentación (origen, tratamiento y características técnicas) y garantizar que no ha estado en contacto con materiales contaminantes.

En el siguiente artículo de la especificación IDU se trata el MBR:

500.2.5 *Materiales de Pavimento Bituminoso Reciclado (MBR)*

Se define según IDU como una disgregación de una mezcla asfáltica de un pavimento existente y expresa que solo debe ser obtenido de los centros de acopio y los patios de fresado del IDU que es a donde llegan todo el MBR o RAP proveniente de las obras a cargo de los contratistas del IDU y el cual llega con ciertas características como que los contratistas deben llevar el material ya triturado y no en bloques y con un tamaño específico (19 mm) , esto último no se encuentra en las especificaciones.

Una de las diferencias grandes entre el INVIAS y el IDU es la manera de clasificar el tránsito, a continuación, se muestra la clasificación dada por IDU e INVIAS

Tabla 11 Categorías de Tránsito IDU- Especificaciones IDU

Categoría de Tránsito	Nivel de Tránsito	
	VPDo	NAEE_80 (millones)
T1	VPDo < 200	NAEE_80 < 2.0
T2	200 ≤ VPDo < 800	2.0 ≤ NAEE_80 < 8.0
T3	VPDo ≥ 800	NAEE_80 ≥ 8.0

VPDo: número de vehículos pesados por día en el carril de diseño, durante el primer año de servicio de las obras, donde vehículos pesados son buses y camiones con peso de 3.5 toneladas o más.
NAEE_80: número acumulado de ejes equivalentes de 80 kN en el periodo de diseño, en el carril de diseño.

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

Tabla 12 Categorías de Tránsito INVIAS- Especificaciones INVIAS

NIVEL DE TRÁNSITO	NÚMERO DE EJES EQUIVALENTES DE 80 kN EN EL CARRIL DE DISEÑO, N_{80kN} , MILLONES
NT1	$N_{80kN} \leq 0.5$
NT2	$0.5 < N_{80kN} \leq 5.0$
NT3	$N_{80kN} > 5.0$

El IDU y el INVIAS maneja 3 categorías de tránsito, el IDU maneja rangos más amplios entre niveles de tránsito a los del INVIAS, las clasificaciones pueden ser diferentes debido a que el INVIAS maneja las carreteras nacionales mientras que el IDU maneja las vías de la ciudad de Bogotá.

El IDU cuenta con la ESPECIFICACION 514-18 BASE Y SUBBASE GRANULAR PARA VIAS VEHICULARES, PEATONALES Y CICLORUTAS CON MBR, con la cual el INVIAS no cuenta debido a las jerarquías de las vías que las entidades tienen a cargo, en la especificación del IDU se establece que el MBR o RAP será un material granular de base o sub-base adicionada con material de pavimento bituminoso reciclado (RAP), uso como material de aporte es decir como un agregado más, la mezcla del material granular y MBR (RAP) se debe producir en sitio.

Se hace énfasis en que debe cumplir con la especificación 510-18 en donde se establecen los requisitos para agregados de base y subbase, deben cumplir con las granulometrías específicas y los Ensayos mínimos de verificación sobre la mezcla de granulares adicionados con MBR (RAP) es granulometría únicamente.

También en las especificaciones IDU se cuenta con la ESPECIFICACION 530-18 MEJORAMIENTO DE BASE Y SUBBASE CON MBR Y CEMENTO ASFÁLTICO.

La mezcla de MBR (RAP), granular, cemento asfáltico y eventualmente aditivos, se debe producir en planta. Y debe cumplir con:

- Agregados pétreos y llenante mineral
 - Recuperado de capas asfálticas
 - Excedentes de una mezcla asfáltica no utilizada
- Agregados recuperados (RAP)
 - El RAP no debe mostrar signos de meteorización y su calidad debe ser similar a la exigencia para los agregados de adición.
 - No se pueden emplear materiales disgregados provenientes de mezclas abiertas en caliente, de mezclas discontinuas en caliente para capa de rodadura, o de mezclas drenantes.
 - Se pueden emplear los excedentes de una mezcla asfáltica en caliente de las descritas en la especificación 620-18 "Mezclas

Asfálticas en Caliente Densas, Semidensas y Gruesas” se aceptan los residuos si son sobrantes de la mezcla fabricada o por haber sido rechazados por estar con una temperatura inferior a la de compactación, pero nunca por la baja calidad de sus componentes o de la mezcla misma

- No se permite el uso de RAP que provenga de pavimentos donde la capa asfáltica hubiera presentado deterioros de los tipos afloramiento de asfalto (exudación) o deformaciones plásticas.
 - Si se va a utilizar materiales provenientes de capas asfálticas con geosintéticos, o en cuya elaboración se hubiera utilizado adiciones para modificar la reología del ligante asfáltico o el comportamiento mecánico de la mezcla, tales como caucho, fibras etc. se debe solicitar un estudio ambiental específico (posibles emisiones de contaminantes durante la elaboración de la nueva mezcla).
 - RAP homogéneo, eliminación de contaminantes, trituración.
 - Se recomienda que el agregado de adición tenga características mineralógicas similares a las del agregado que se recicla, con el fin de evitar que el ligante tenga diferentes adhesividades, realizar el análisis de acuerdo con la norma ASTM C-295
- Diseño de mezcla: el diseño del material mejorado en caliente con MBR y cemento asfáltico se debe efectuar siguiendo el método Marshall.
 - El material por reciclar no debe constituir más del 40% de la masa total de la mezcla. La determinación del tipo y de la proporción del agente rejuvenecedor para reciclado por incorporar debe definirse con base en la norma INV E-812-13

Acopio del Material Reciclado:

- El material puede provenir de la misma obra o encontrarse almacenado:
 - El acopio debe estar cubierto.
 - El tiempo de almacenamiento debe ser el mínimo para que no absorba agua de la atmosfera en exceso.
 - Descartar el material que presente contaminantes.
 - Registro de procedencia.
 - Separar por tipo (denso, semidenso y grueso).

- Tratamiento del material por reciclar
 - o El material disgregado se debe tratar y mezclar para su homogeneización y descontaminación.
 - o Triturar los bloques hasta que pase tamiz de 25 mm (1").
 - o Eliminar cualquier contaminante y usar un procedimiento adecuado para la detección y retiro de elementos metálicos.
 - o Mezclar el material hasta obtener un material homogéneo y sin segregación.
 - o Caracterización y acopio del material por reciclar, después de tratado.
 - o Acopio homogéneo: para que sea homogéneo los valores de los ensayos de caracterización deben estar dentro de los rangos de la tabla 530.3 "Tolerancia en el material por reciclar para considerarlo homogéneo (composición, caracterización asfalto reciclado)"
 - o Los diferentes materiales tratados que cumplan los requisitos de homogeneidad se pueden acopiar juntos.

- Se extraen muestras y se realizan los ensayos de:
 - o Extracción de asfalto
 - o Granulometría del agregado
 - o Penetración
 - o Punto de ablandamiento (ligante recuperado)

- Acopio situado en zona bien drenada.
- Si la superficie no es pavimentada, los últimos 15 cm no se pueden usar (en nuevas mezclas).
- Previa a la colocación de una capa de material granular mejorado en caliente con MBR (RAP) y cemento asfáltico, se requiere un riego de liga o de imprimación.

Por último, el INVIAS en cuanto a nuevas mezclas con uso del RAP define que el uso de RAP para nuevas mezclas en caliente densas, semidensas y gruesas debe ser parte de una especificación particular.

6. SEGUNDA PARTE: ESTADÍSTICAS ACERCA DE LA GENERACIÓN, MANEJO Y USO DEL RAP

6.1. ENTIDAD 1

Esta entidad se enfoca en la verificación de la calidad de mezclas asfálticas, cuentan con la planta para mezclas asfálticas más avanzada en Latinoamérica la cual permite la adición de grano de caucho y RAP en las mezclas con un porcentaje de RAP entre el 30%-40%, la empresa cuenta con un acopio pequeño de RAP proveniente de trabajos privados, este no es clasificado ni descontaminado, se acopio de manera sencilla, sin tener en cuenta las recomendaciones generales debido a que no manejan un gran volumen aún, este proviene de varias fuentes y es mezclado y triturado, han vendido RAP pero a concesiones el cual provenía de estas mismas concesiones, han hecho tramos de prueba pequeños y actualmente apoyan en gran manera a los investigadores de este material. El tramo prueba contiene el 30% de RAP en una mezcla MDC-19 y se utilizó un asfalto 80-100 sin aditivos, llevan seguimiento a las obras en las que han usado RAP. Se está buscando una certificación para poder ser proveedores del IDU.

La compañía ha venido trabajando en un documento que adapta las especificaciones INVIAS, que además incluye un protocolo de experiencias, con el fin de lograr que IDU saque especificaciones como tal acerca del manejo del RAP un poco más claras, pues parte de que no se manejen grandes volúmenes de este material en el acopio ni se tenga un protocolo de disposición, es que el cliente no tiene disposición de usarlo al no haber una especificación concisa como tal que les proporcione seguridad.

6.2. ENTIDAD 2

Es una entidad del Estado que se encarga de la malla vial bogotana. Desde hace más o menos 3 años vienen acopiando RAP, pero solo hace un año que lo estudian gracias al equipo de "*Adopción y Adaptación de Nuevas Tecnologías*". El RAP que acopian proviene de las vías públicas que tienen a cargo, dado que, como se mencionó, se trata de una entidad Estado, por lo cual no se obtiene RAP de vías de privados.

La entidad cuenta con dos plantas, además de tener los laboratorios necesarios para toda la caracterización. También se tiene un espacio para el acopio del RAP,

en el cual se acopian los bloques que provienen directamente de la demolición de carpetas asfálticas con retro, y un espacio diferente se acopia el material resultante de la trituración de los bloques con la granulometría necesaria. El acopio es multifuente, todo lo que llega de la malla vial se dispone en un mismo sitio y no se tiene una preparación o adecuación del terreno, además de que no se hace descontaminación al material ni hay un límite de tiempo para el acopio.

Hasta el día en el que se realizó la visita a la planta, se tenían acopiados unos 90000 m³ de RAP, que se reciben todos los días, producto del arreglo de la malla de vial de Bogotá. La demanda de RAP ha sido de aproximadamente 30000 m³ desde que se empezó a acopiar.

La entidad ha usado RAP en capas de base y de carpeta asfáltica, en carpeta asfáltica se han trabajado mezclas en frío, a las cuales debe añadirse algún aditivo como cemento que mejore, por ejemplo, la adherencia, el cemento se ha usado en porcentajes de 1%, 2% y 3%, también deben usarse rejuvenecedores en porcentajes de 0.5%, 1% y 1.5%; con respecto a este último, se estima que se necesitan 8 litros por cada metro cúbico, lo que encarece el procesamiento del RAP.

Los únicos que pueden adquirir el RAP de esta entidad son entidades públicas, en general la mayor adquisición ha sido por parte de las alcaldías locales, a las cuales se les aprueba por petición 2000 m³; la adquisición del RAP no tiene ningún costo, sin embargo, sí se realiza seguimiento al modo en que está siendo usado.

Dentro de los ensayos que se realizan al RAP están: Granulometría, contenido de asfalto, desgaste, extracción, y al asfalto extraído se le realiza caracterización, al agregado recuperado no se le realiza ningún tipo de ensayo.

La entidad ha hecho tramos de prueba, usando mezclas en frío con contenido de RAP entre el 50% y el 75%, además, se han utilizado 100% de RAP en bases granulares reforzadas con geocelda. Hasta el momento no se ha hecho producción industrial.

Por último, dado el carácter público de la entidad, esta es completamente autónoma, por lo cual no tiene ningún tipo de interventoría.

6.3. ENTIDAD 3

Al patio de fresado de esta entidad llega el material proveniente de fresado de las vías en arreglo que tienen a cargo los contratistas de la entidad. Para disponer el material, este no debe estar contaminado, no debe tener sobre tamaños (es decir, no debe tener bloques), además de no contener tierra ni recebo, por lo tanto, el material llega ya triturado al patio.

Para la disposición no se cuenta con criterios de almacenaje como tal, pues es un acopio multifuente; solo se tienen en cuenta temas de drenaje, para lo cual el perímetro del patio está rodeado de cunetas, así mismo, se almacena en terrazas que no deben superar los 4 metros de altura, esto por cuestiones de comodidad para los vecinos del sector en el que se halla ubicado el patio de fresado. Además, deben tener al día todos los temas de contaminación, pues constantemente hay interventoría de la Secretaría del Medioambiente.

La entidad solo se encarga de recibir y enviar RAP de los contratos que tiene a cargo, por lo que no se hacen ensayos para caracterizarlo, si no que este es un tema que le compete como tal al que lo vaya a usar.

Actualmente el patio de fresado tiene acopiados 40000 m³, recibiendo y enviando material todos los días, para la entidad no tiene costo alguno el tratamiento del RAP, así como no tiene ningún costo adquirirlo.

6.4. ENTIDAD 4

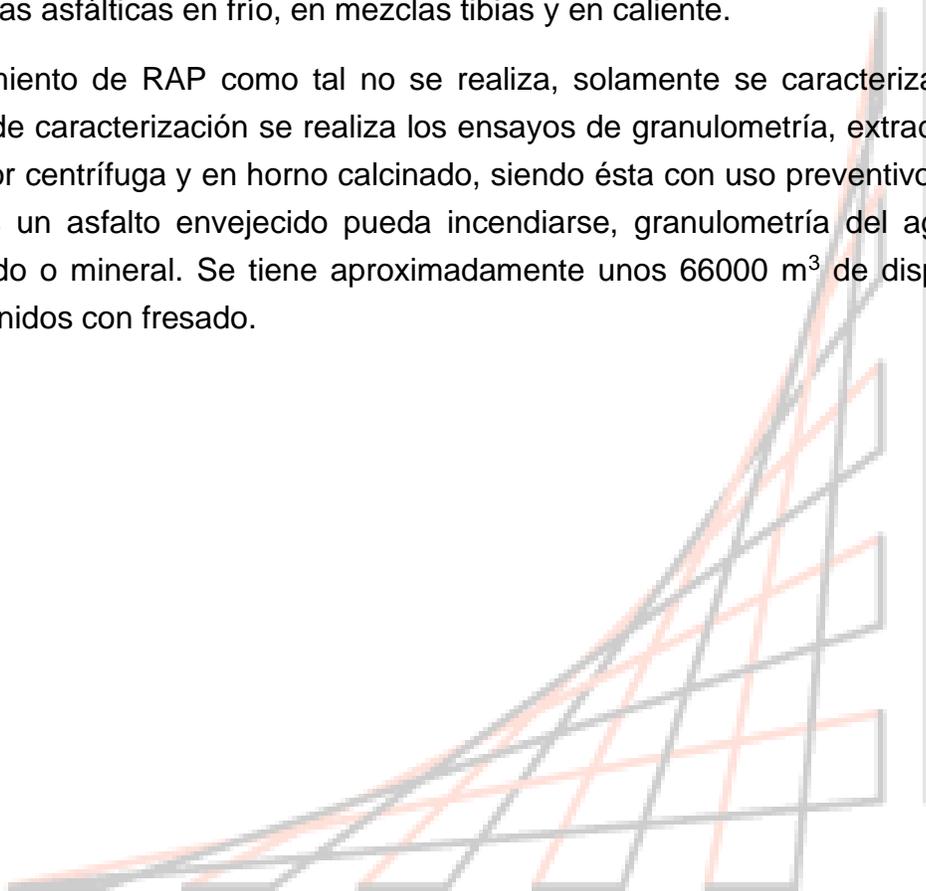
Dependiendo del diseño estructural del pavimento a ejecutar el mantenimiento, se fresa la capa asfáltica, en donde se encuentra oxidado y envejecido, se reemplaza con una capa asfáltica nueva. El material RAP se recupera mediante el fresado, por trituradora es menos conveniente obtener el material debido a que contiene asfalto se pueda pegar las aspas de la máquina y producir un daño y no se pueda obtener material homogéneo que en la fresadora. Se debe tener en cuenta la velocidad de fresado para que el material conseguido tenga el tamaño máximo nominal que se requiere para disposición del siguiente proyecto, por lo general se llega entre 1" o menores, usando una velocidad de fresado entre 5 m/min y 6 m/min.

Para la disposición y colocación de acopio se requiere una licencia ambiental en donde se exige qué altura máxima debe tener, ancho, si está cubierto o no como protección si se presenta precipitaciones, a cuánta distancia debe tener como

mínimo a fuentes hídricas, desagües, aguas lluvias, si existen empresas aledañas y si se ubica en la zona rural o urbana.

El RAP según la entidad, tiene como aplicación en bases estabilizadas con cemento asfáltico caliente, para mejoramiento de vías terciarias, disfunción para material particulado como tratamiento superficial, se puede utilizar también como parte de las mezclas asfálticas en frío, en mezclas tibias y en caliente.

Procesamiento de RAP como tal no se realiza, solamente se caracteriza. En el proceso de caracterización se realiza los ensayos de granulometría, extracción de asfalto por centrífuga y en horno calcinado, siendo ésta con uso preventivo debido a que es un asfalto envejecido pueda incendiarse, granulometría del agregado recuperado o mineral. Se tiene aproximadamente unos 66000 m³ de disposición total obtenidos con fresado.



ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO

VIGILADA MINEDUCACIÓN

7. TERCERA PARTE: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

7.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS APLICADOS AL RAP

En general se extrajo una muestra por cada acopio de RAP tomándola de puntos diferentes de la pila y mezclándolas para generar la muestra total, la cual consistió en tres lonas llenas hasta la mitad lo que viene siendo aproximadamente 40 kg en cada lona, 120 kg muestra total. A continuación, se describen las condiciones del material de cada muestra:

- MUESTRA 1

RAP para uso de investigación el cual se tomó de una pila multifuente que había sido previamente triturada para obtener un tamaño de 19 mm, en la pila se encontraron otros materiales en pequeñas cantidades como agregado mineral virgen, partículas de concreto y en menor medida de ladrillo y algunos contaminantes plásticos mínimos, en esta pila se encontraba material de entre 6



Figura 14 Acopio Muestra 1

meses a 1 mes de acopio, puesto a la intemperie lo que implica que su humedad puede variar, la superficie sobre la que está depositado no se encuentra pavimentada por lo que no es posible el uso de los 15 cm inferiores para nuevas mezclas, no cuenta con sistema de drenaje. La pila cumple con la recomendación para altura al ser menor a 9 m y la forma de acopio en pilas cónicas es correcta evitando así la acumulación de humedad en exceso, se recomienda para una mejor homogenización de la pila separar los futuros acopios por fuentes si es posible, o por tamaños si tienen características similares las obras de donde provienen. Si ninguna de las anteriores recomendaciones se puede ejecutar como mínimo se debe estar mezclando el material continuamente para no generar zonas de alta variabilidad en la misma pila.



Figura 15 Planta Asfáltica Entidad 1

- MUESTRA 2

RAP para uso de investigación el cual se tomó de una pila que había sido previamente triturada para obtener un tamaño de 19 mm, en la pila se encontraron otros materiales en pequeñas cantidades como agregado mineral virgen, partículas de concreto y en menor medida de ladrillo y algunos contaminantes plásticos mínimos, las condiciones del acopio presentan en el terreno una pendiente que favorece el drenaje aún cuando la superficie sobre la cual se acopia no está pavimentada, la altura de las pilas sobrepasa a la recomendación de 9 m lo cual puede causar problemas de consolidación y aglomeración del material que se encuentra en la parte central de la pila y segregación hacia los costados, también dificultad para mezclar la totalidad del material, esto para la pila de material ya triturado. Las pilas no se encuentran cubiertas debido a su gran tamaño y cantidad, tampoco están clasificadas por fuente ya que para la cantidad que manejan necesitarían un espacio aún más grande, se arman pilas clasificadas por el tamaño, pero no por la fuente lo cual las hace pilas multifuente un poco más homogéneas, también presenta en algunas partes crecimiento de vegetación por el largo tiempo de acopio. Al ser un acopio tan grande se intentó apilar en forma cónica pero debido a su gran tamaño se esperaba que se comportara como una pila horizontal lo que implica retención de humedad. Es difícil llegar al material central de la pila por lo cual las muestras obtenidas son de la superficie y los resultados son únicamente representativos del pico del acopio.

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO

VIGILADA MINEDUCACIÓN



Figura 16 Acopio Muestra 2



Figura 17 Vista de la Planta Entidad 2

- MUESTRA 3

RAP para uso de investigación el cual se tomó de una terraza horizontal que había sido previamente triturada para obtener un tamaño de 19 mm, en la pila se encontraron otros materiales en mínimas cantidades como material orgánico y partículas de ladrillo. Se evidencian crecimiento de pasto por las condiciones de acopio, el acopio cuenta con sistema de drenaje, cumple con la altura recomendada de máximo 9 m, pero la forma de acopio es en terrazas horizontales lo que influye en la conservación de la humedad, cuenta con una sola terraza que reúne todo el material que llega por lo que clasifica como multifuente y heterogénea. La característica más homogénea es el tamaño de las partículas, el acopio no está cubierto por su gran extensión, pero si se encuentra delimitado a su alrededor por poli sombras para no afectar a la comunidad. La superficie sobre la que se encuentra no tiene pendiente ni está pavimentada y se puede presentar compactación ya que la maquinaria se desplaza sobre el acopio. La muestra extraída es representativa de la zona central izquierda del acopio tomando como referencia la entrada. La extracción de material en el acopio de la entidad 3 se realiza por zonas, intentando disminuir la afectación a la comunidad por efecto del ruido y polvo que se puede generar.



Figura 18 Acopio Muestra 3

- MUESTRA 4

RAP para uso de investigación el cual se tomó de 3 capas distintas alrededor de la zona cónica, cada una de las capas de obtuvo la muestra en otras 3 partes diferentes horizontalmente dependiendo de la capa, en la pila no se encontraron otros materiales en mínimas cantidades como material orgánico y partículas de ladrillo. El acopio cuenta con sistema de drenaje con una forma de acopio cónica adecuada, pero no cumple con la altura recomendada de máxima de 9 m, los cuales puede presentar consolidación del material debido a su propio peso. La característica más homogénea es el tamaño de las partículas, el acopio no está cubierto y no se encuentra debidamente delimitado con otras pilas que hay de la planta de la entidad 4.



Figura 19 Vista de la planta de la Entidad 4 con el acopio de RAP

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO

VIGILADA MINEDUCACIÓN



Figura 20 Acopio Muestra 4

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO

VIGILADA MINEDUCACIÓN

7.1.1. GRANULOMETRÍA (INV E-213-13)

7.1.1.1. CONDICIONES DEL ENSAYO

De acuerdo con la Norma INV E-213-13, para realizar la granulometría, fue necesario poner en horno previamente las muestras hasta alcanzar masa constante, la temperatura a la cual se puso fue de 70°C para no crear el efecto de aglomeración del RAP. En el procedimiento fueron utilizados todos los tamices descritos en la Norma, como se puede observar en la gráfica adjunta.

Se muestran algunas imágenes tomadas durante el desarrollo de las granulometrías.



Figura 21 Granulometría RAP Muestra 1

La Imagen 17 muestra algunas fracciones producto de la granulometría realizada a la muestra 1, las fracciones de color marrón pueden corresponder a finos no recubiertos, como también a contaminación.

En la Imagen 7 se observa cómo las fracciones más gruesas del RAP se encuentran algo más descubiertas que las fracciones finas, esto puede deberse al desgaste como tal del pavimento, como también al proceso de triturado que pudo generar la fractura y el desprendimiento del recubrimiento de las partículas.

Así mismo en las fracciones finas se encontrará un mayor contenido de asfalto que en las gruesas debido al principio de la superficie específica, se observan que las partículas finas tienden a verse más oscuras que las gruesas.



Figura 22 Granulometría RAP Muestra 2

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO

VIGILADA MINEDUCACIÓN

7.1.1.2. RESULTADOS DEL ENSAYO

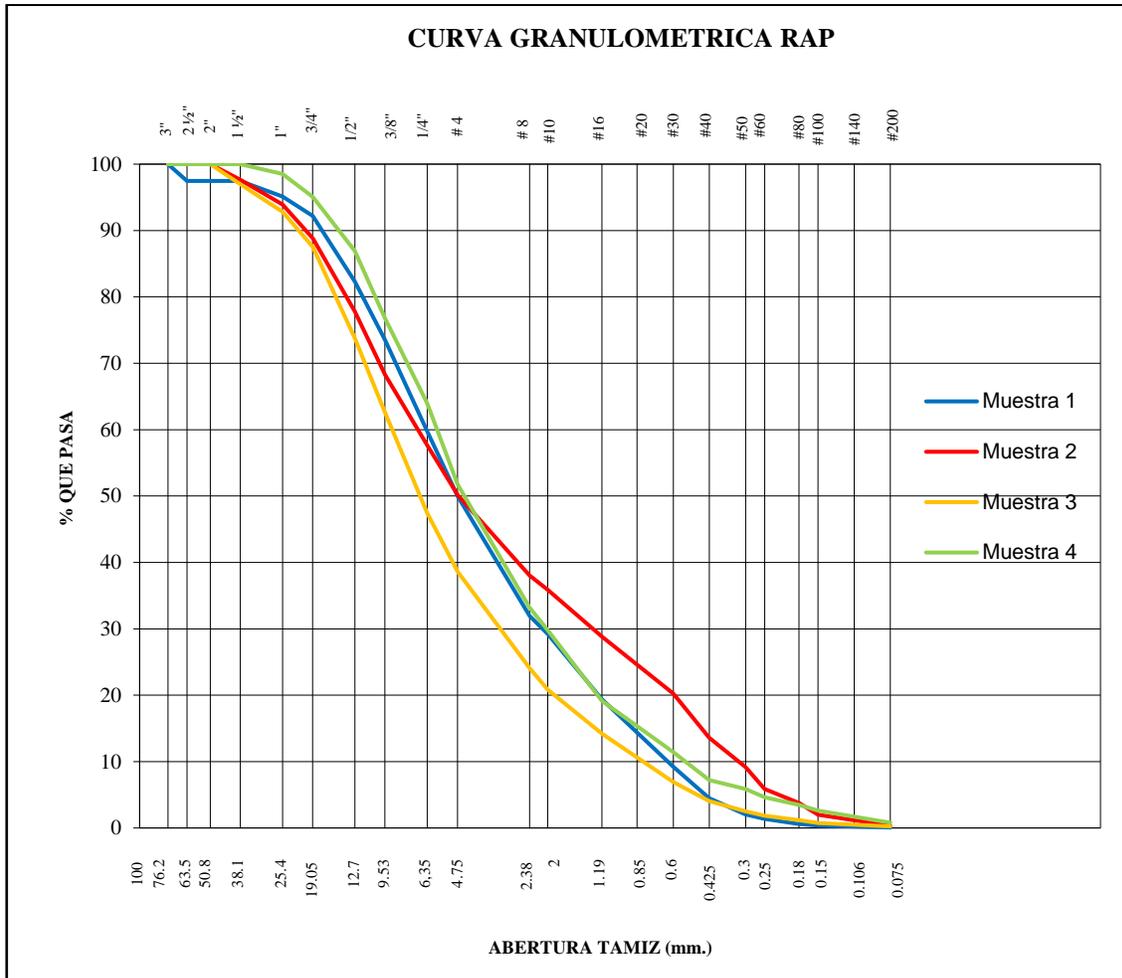


Figura 23 Curva Granulométrica RAP

A continuación, se muestran las curvas granulométricas obtenidas para el RAP:

El Tamaño Máximo Nominal (TMN) de las cuatro muestras es $\frac{3}{4}$ ", puede observarse que la Muestra 2 presenta mayor cantidad de finos que las otras cuatro muestras, esto puede deberse a partículas contaminantes provenientes de la base que se mezclaron el proceso de demolición de la carpeta, como también a las condiciones del acopio, pues se evidenció que alrededor de la entidad se encuentran vías destapadas por las cuales transitan los vehículos que transportan el RAP y

posteriormente se ubican sobre las pilas. También se puede deber a un proceso de re-trituración que produce más finos.

Se observa en las gráficas que las cuatro muestras aún cuando son de acopios diferentes son muy similares en su distribución de tamaños, se obtuvo la desviación estándar para estas cuatro muestras y se encontró que la máxima desviación estándar ocurre en los tamices ¼" y N°4 donde llega a un valor de 6,6.

Para entender un poco más el comportamiento del asfalto junto con el agregado mineral, se traen a continuación las granulometrías del agregado mineral de cada muestra:

- **COMPARACIÓN AGREGADO MINERAL CON RAP**

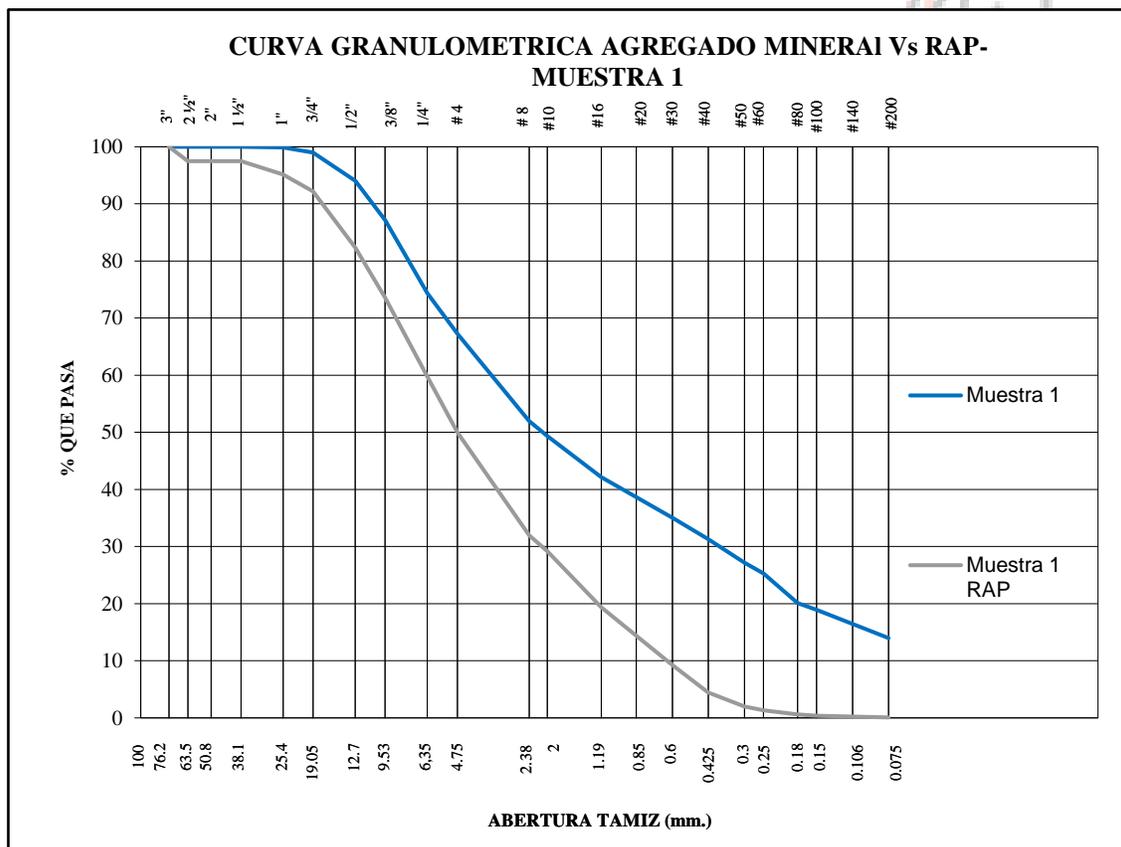


Figura 24 Curva Granulométrica Agregado Mineral Vs. RAP Muestra 1

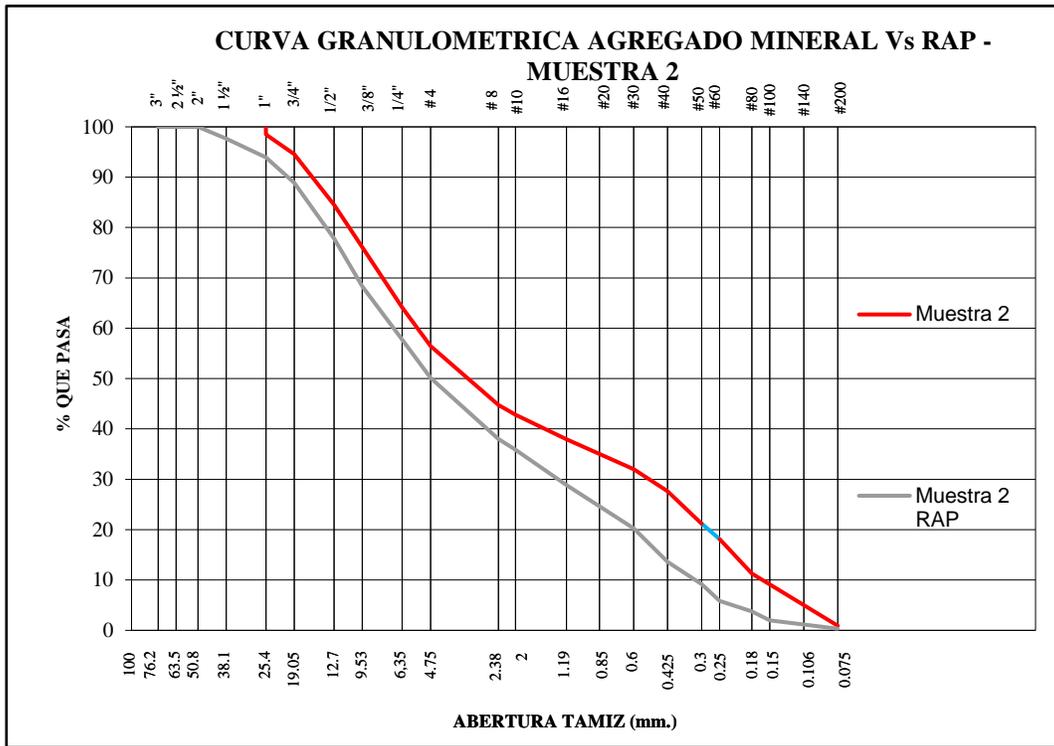


Figura 26 Curva Granulométrica Agregado Mineral Vs. RAP Muestra 2

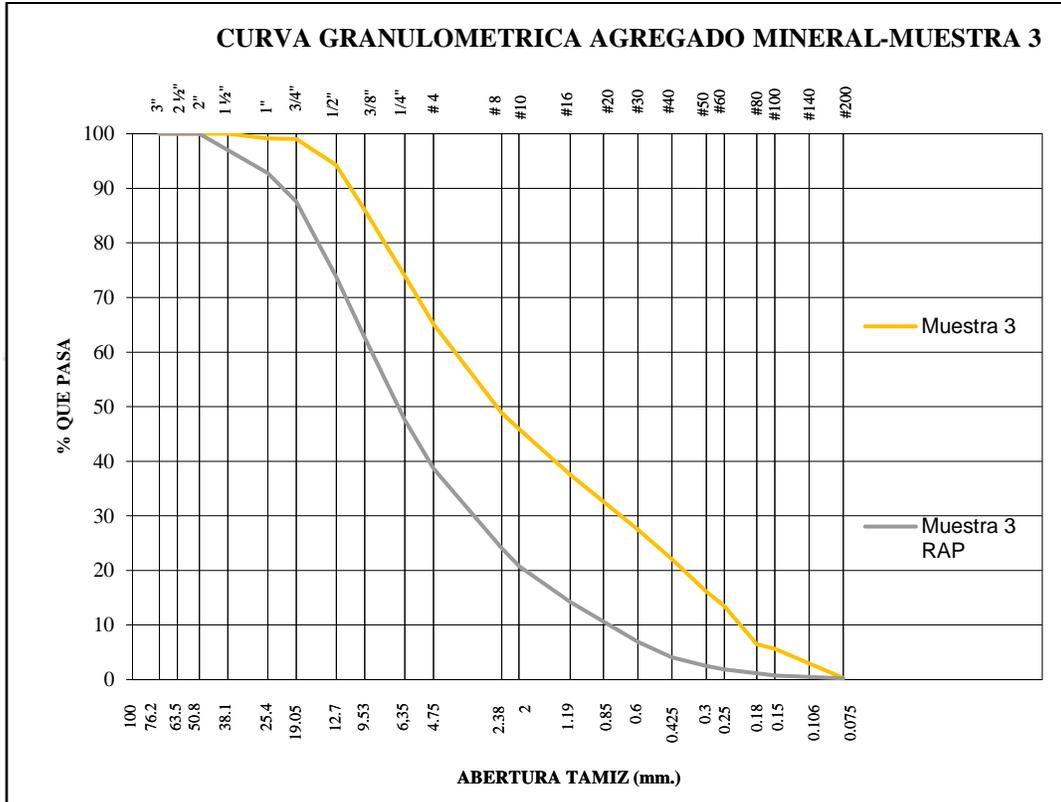


Figura 25 Curva Granulométrica Agregado Mineral Muestra 3

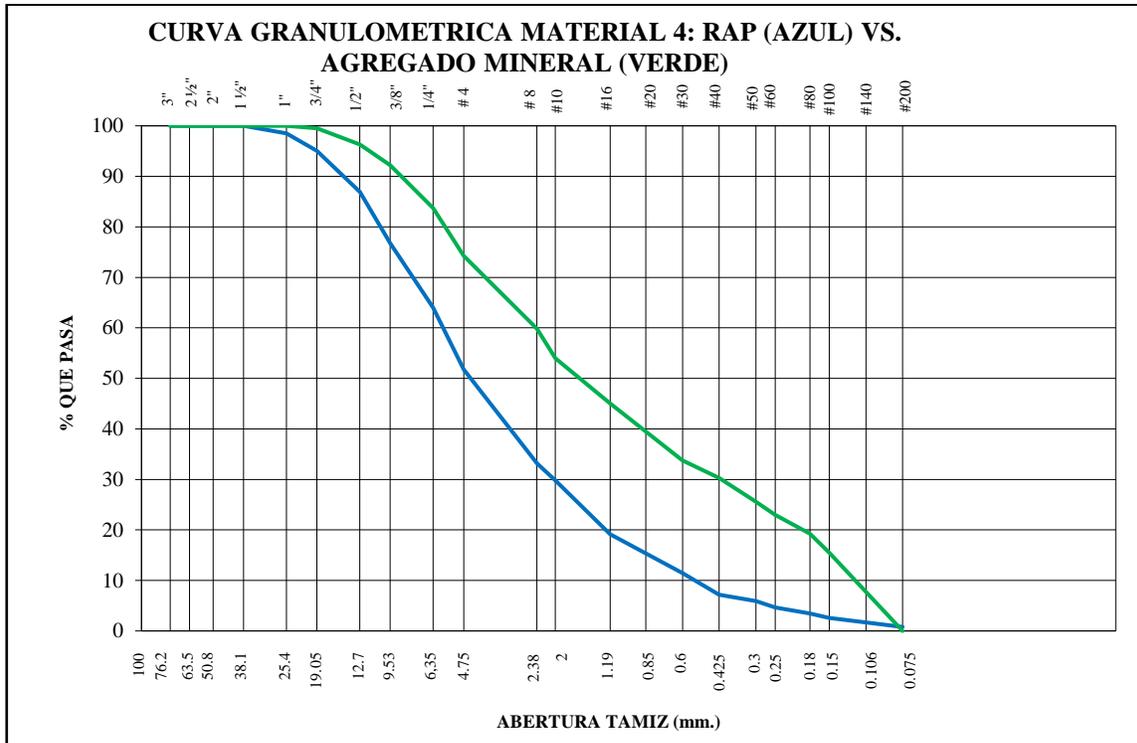


Figura 27 Curva Granulométrica Agregado Mineral Muestra 4

Las gráficas anteriores dan una idea de cómo se encontraban aglomeradas las partículas de RAP con el agregado mineral, se observa que en la muestra 2 las aglomeraciones eran pocas, se presentaban las partículas recubiertas, pero con aglomeraciones pequeñas, mientras que en la muestra 1 en la parte fina y en la muestra 3 en la parte fina y gruesa, se observa que las partículas del RAP eran en su mayoría conglomeraciones de partículas más pequeñas recubiertas de asfalto. Para la muestra 4, se observó que hubo aglomeraciones especialmente en los tamaños medios y finos.

Se hará el análisis de las granulometrías del RAP teniendo en cuenta las franjas granulométricas dadas para bases y sub-bases en las Especificaciones INVIAS, así como para las franjas dadas por las Especificaciones IDU para las mismas:

- **ESPECIFICACIONES INVIAS**

- BASES

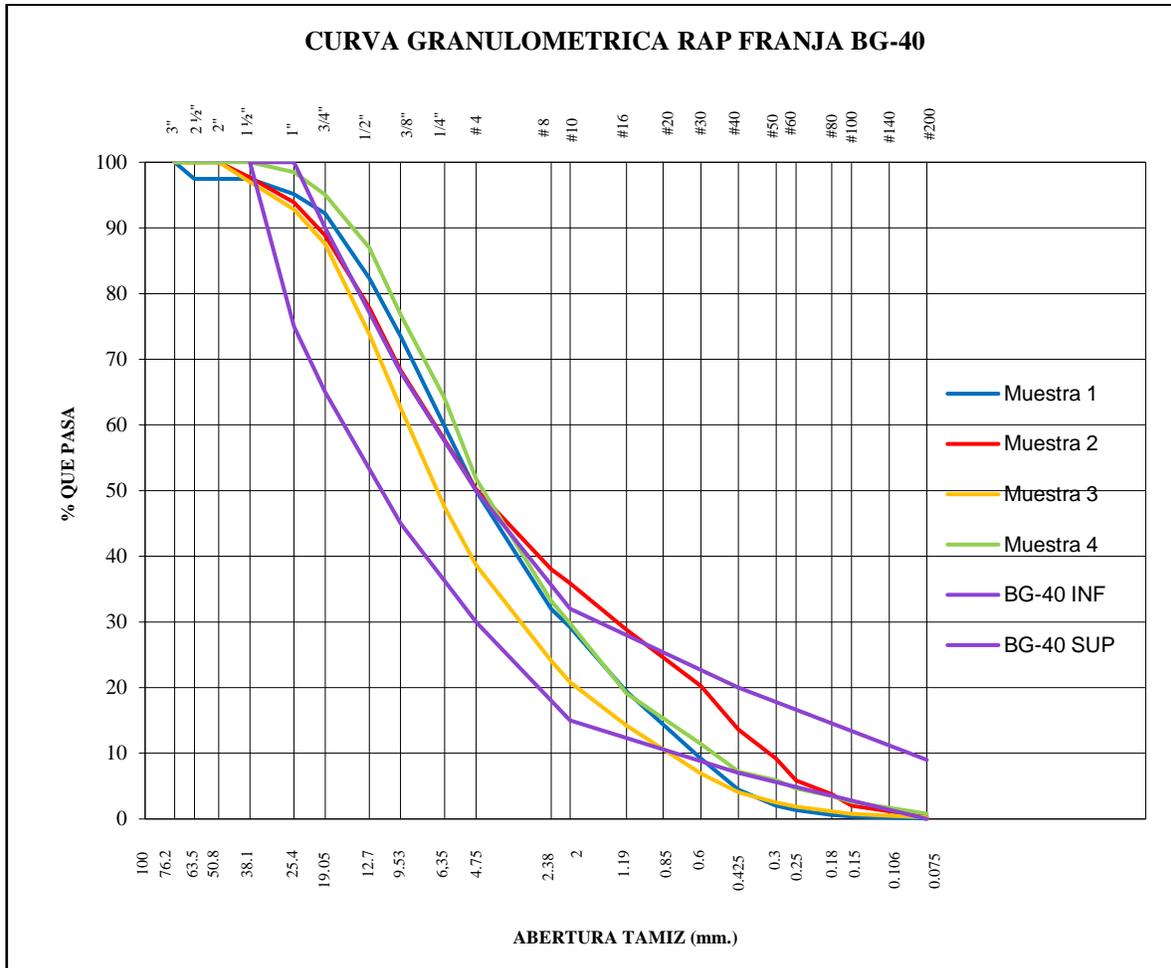


Figura 28 Curva Granulométrica BG-40 INVIAS

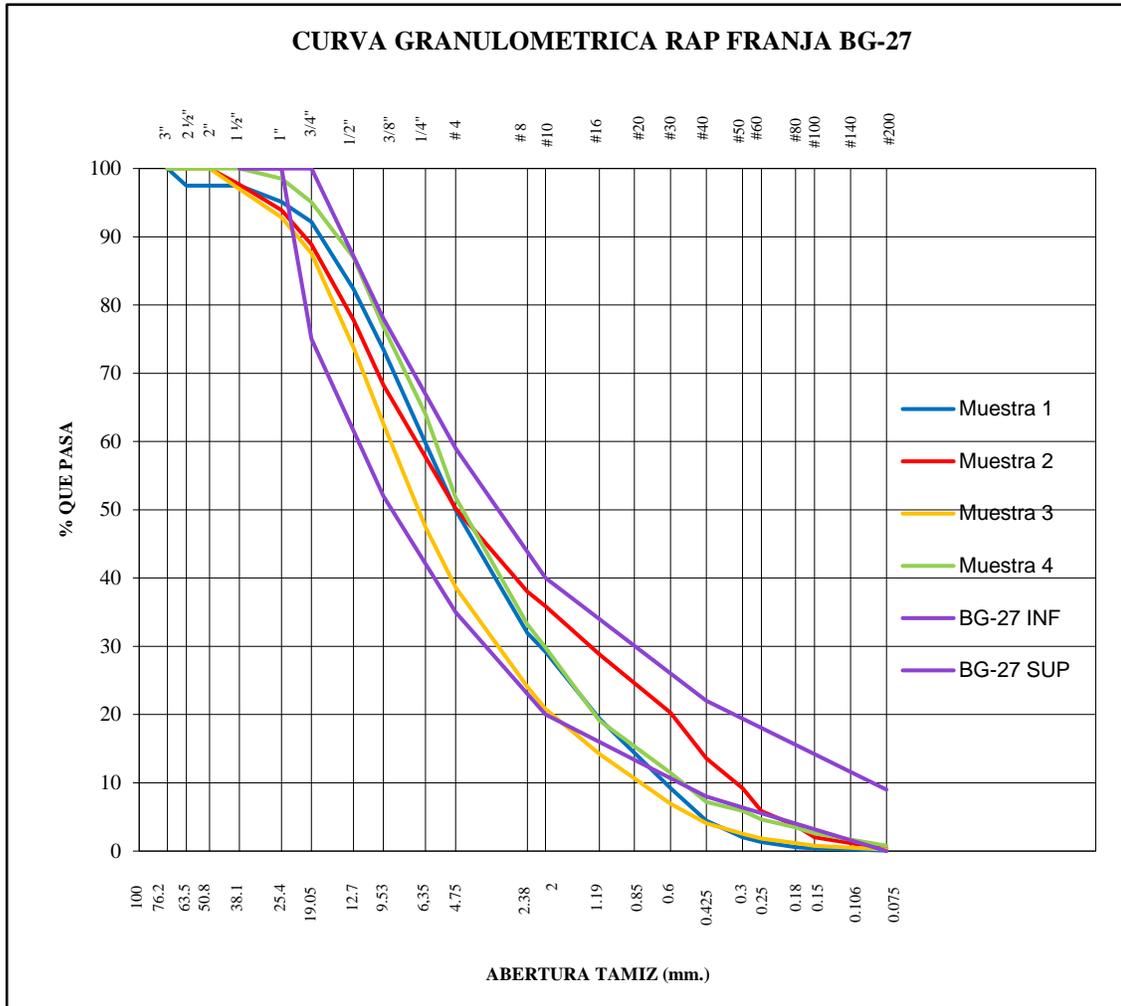


Figura 29 Curva Granulométrica BG-27 INVIAS

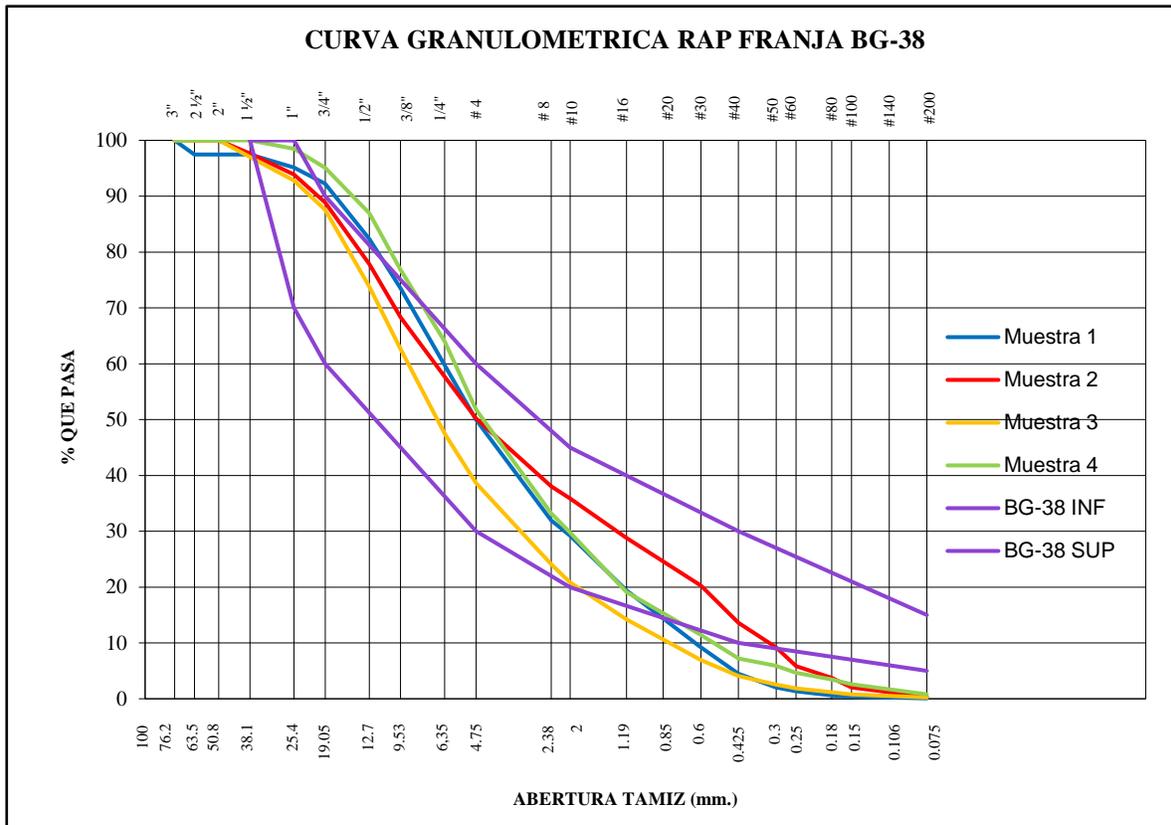


Figura 30 Curva Granulométrica BG-38 INVIAS

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO

VIGILADA MINEDUCACIÓN

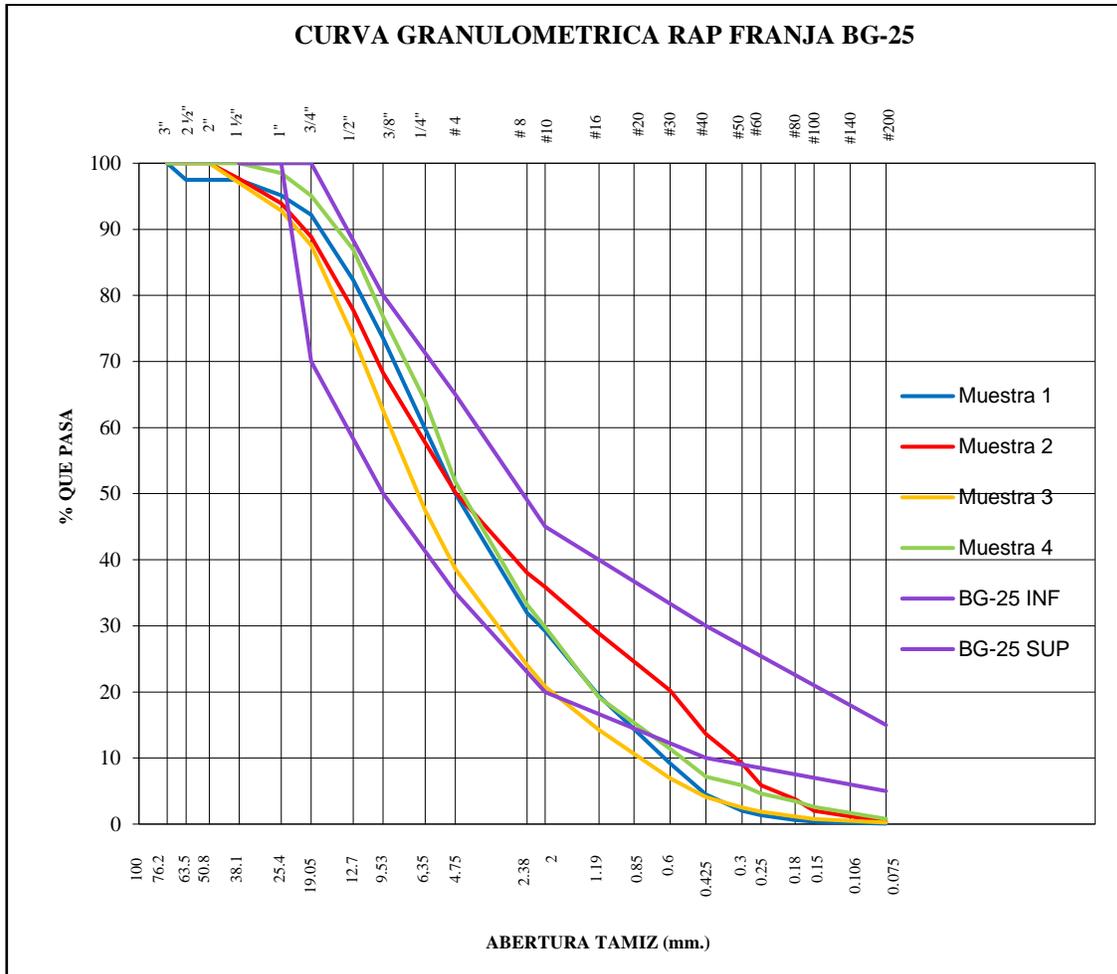


Figura 31 Curva Granulométrica BG-25 INVIAS

Al sobreponer las curvas granulométricas del RAP de las 4 muestras analizadas sobre las franjas granulométricas de la Especificación INVIAS en lo que respecta a Bases Granulares, se observa que a la que mejor se ajusta es a la BG-27 aún cuando en los extremos se sale de estas franjas, la muestra que más se ajusta dentro de la franja mejor escogida es la muestra 4, ya que solo visualmente no cumple sobre el tamiz de 1", y para la fracción fina de esta muestra, se encuentra sobre el límite inferior o mínimamente bajo de lo requerido.

Con base en lo anterior las muestras 2 y 4 de RAP se puede usar como base granular BG-27, con algunas correcciones en la granulometría de las fracciones superiores a 3/4" y las inferiores a No. 40.

En el caso de requerir el uso de las Muestras 1 y 3 para la franja BG-27, se deberá hacer un ajuste en la granulometría de las fracciones inferiores a No. 20 y No. 10 respectivamente, y en las superiores a $\frac{3}{4}$ ".

○ SUB- BASES

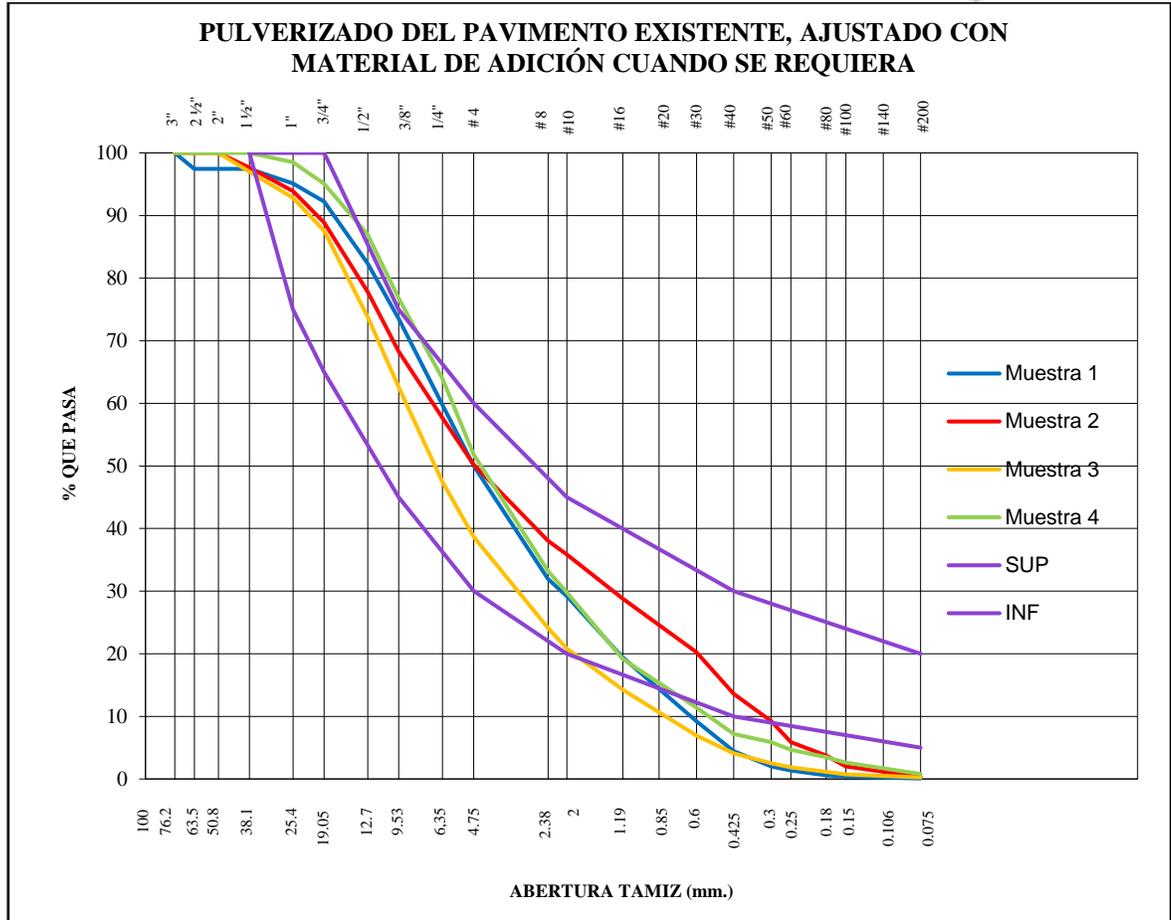


Figura 32 Pulverizado del Pavimento Existente

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO

VIGILADA MINEDUCACIÓN

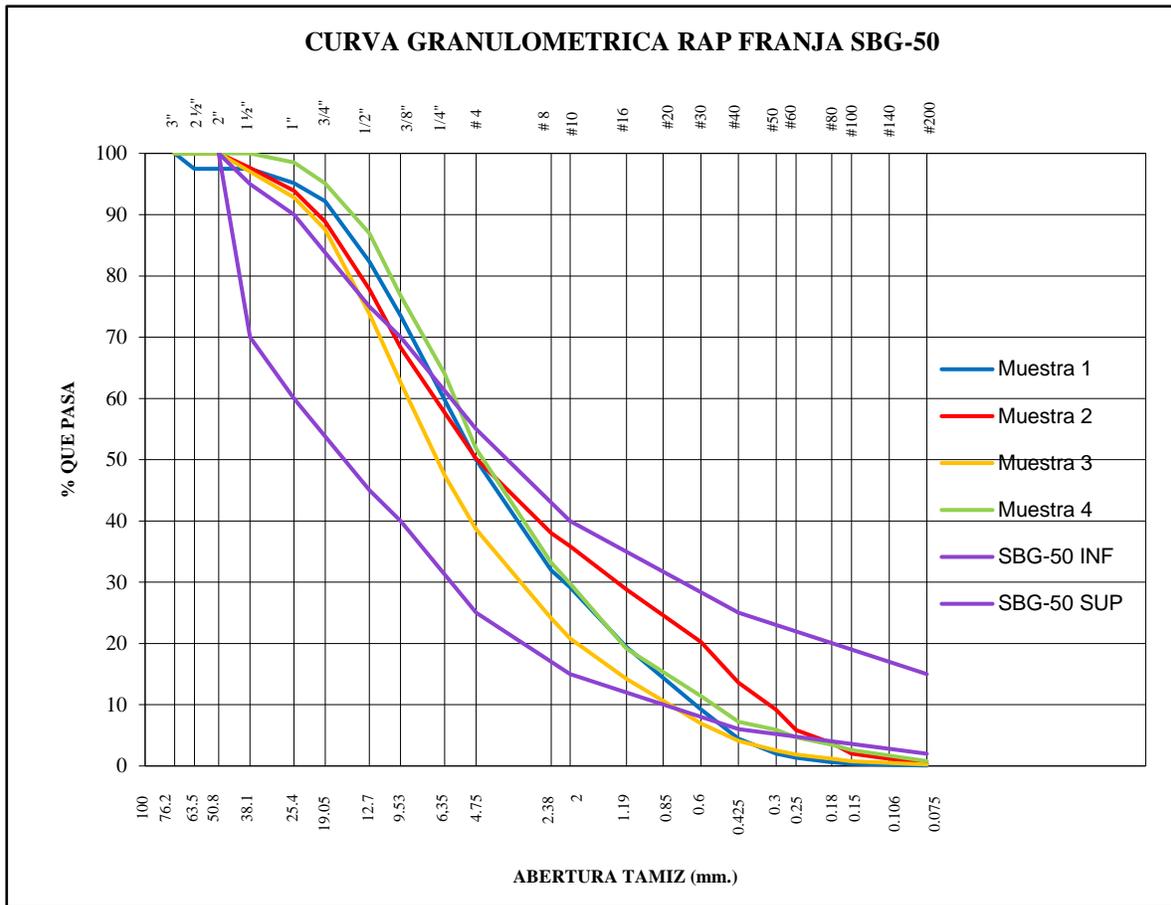


Figura 33 Curva Granulométrica SBG-50 INVIAS

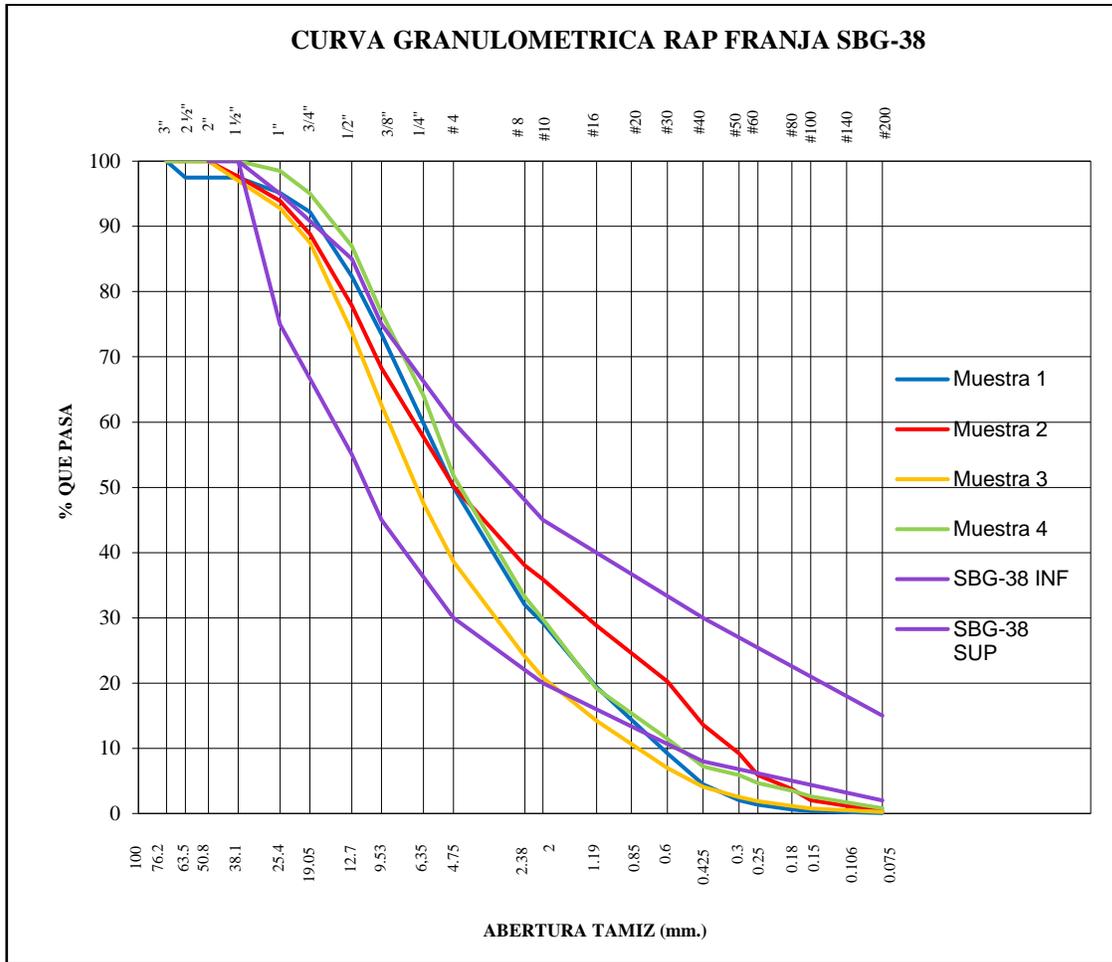


Figura 34 Curva Granulométrica SBG-38 INVIAS

Se observa que para la franja granulométrica SBG-50 las granulometrías de las cuatro muestras no se ajustan de manera adecuada, en tanto que todas salen de ella en las primeras fracciones gruesas, así como en las fracciones finas, y dentro de la franja su distribución no permanece uniforme o paralela a los límites, ya que las curvas pasan del límite superior al límite inferior.

En cuanto a la franja SBG-38 se nota un mejor ajuste aun cuando persisten los problemas nombrados anteriormente en menor medida.

No se excluye el uso en sub-bases, sin embargo el trabajo que se requiere para ajustarlas a la especificación es mayor.

- **ESPECIFICACIONES IDU**
 - *BASE Y SUBBASE GRANULAR PARA VÍAS VEHICULARES*

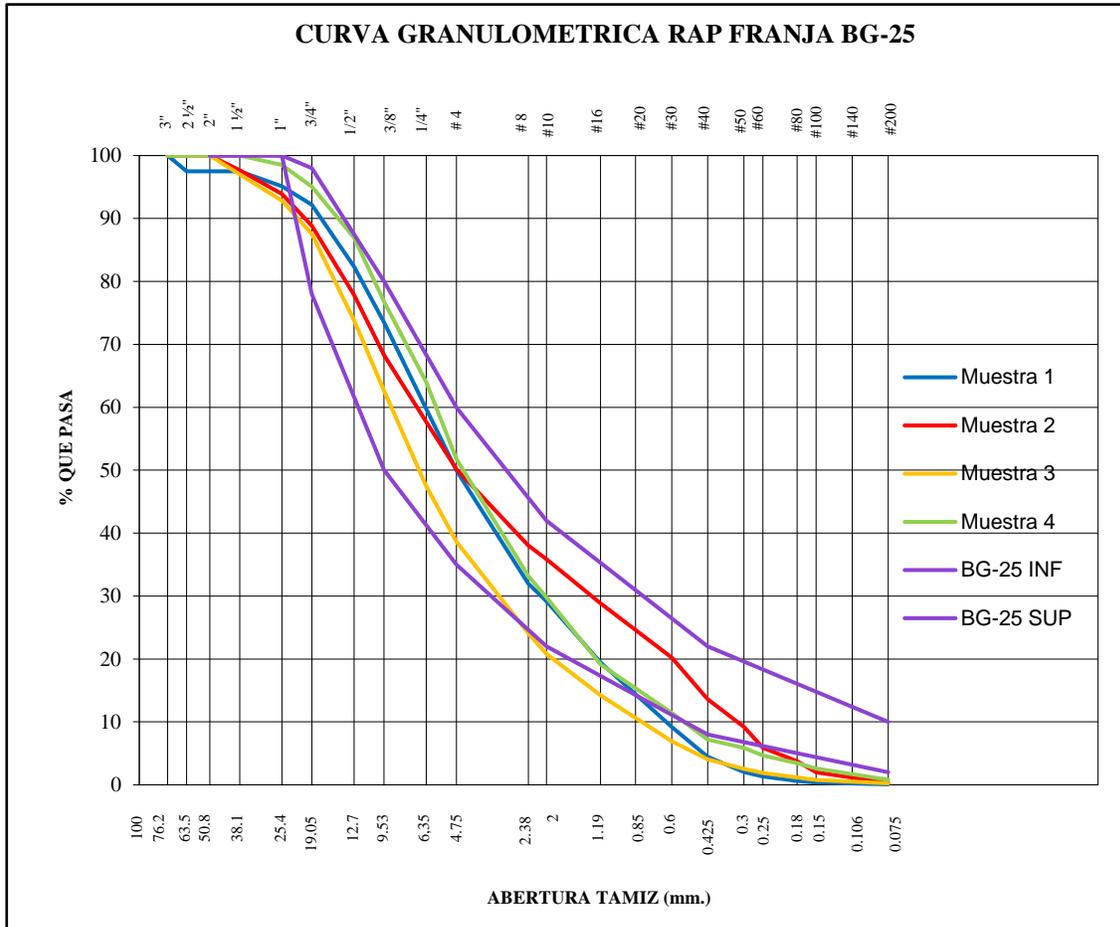


Figura 35 Curva Granulométrica BG-25 IDU

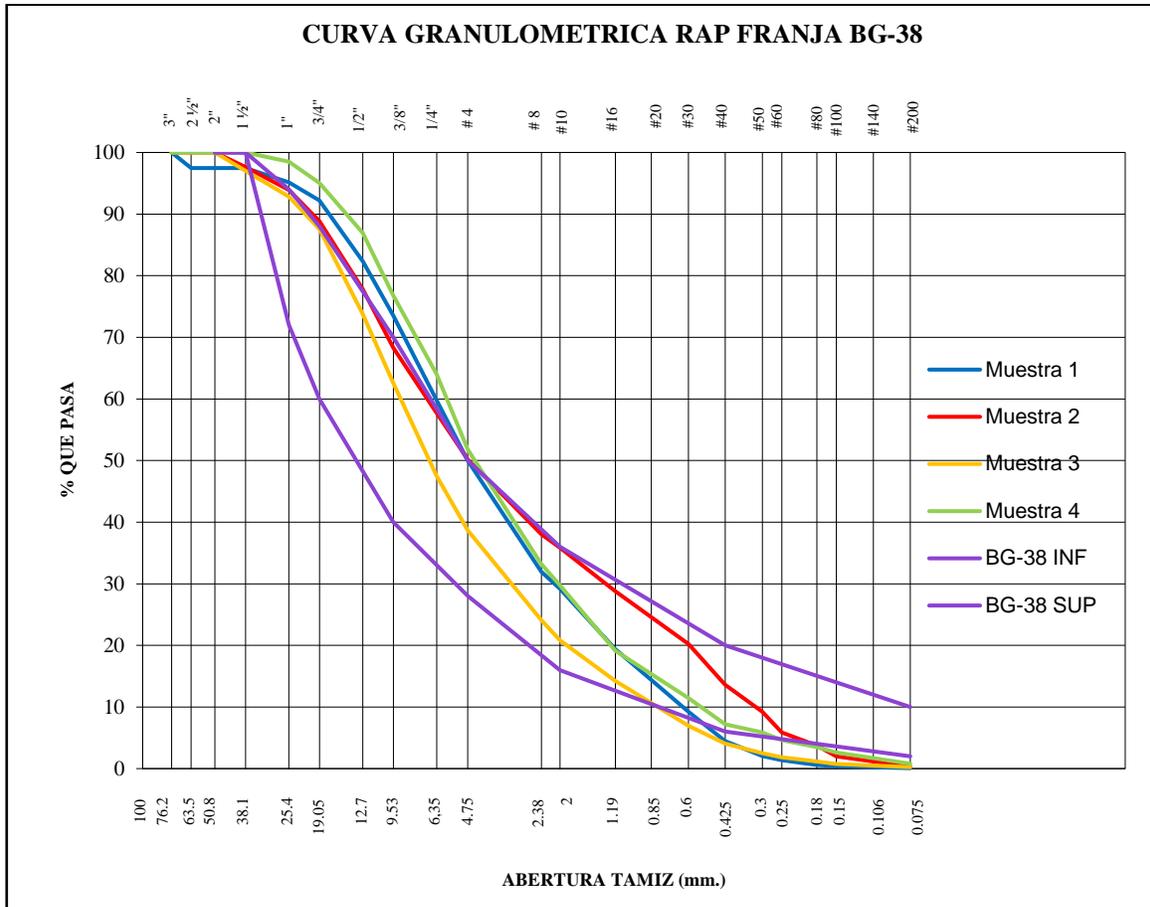
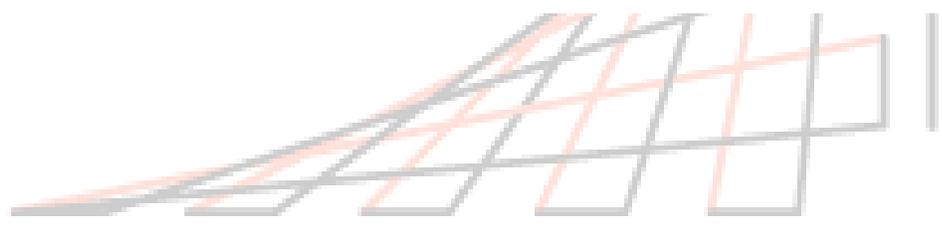


Figura 36 Curva Granulométrica BG-38 IDU



ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO

VIGILADA MINEDUCACIÓN

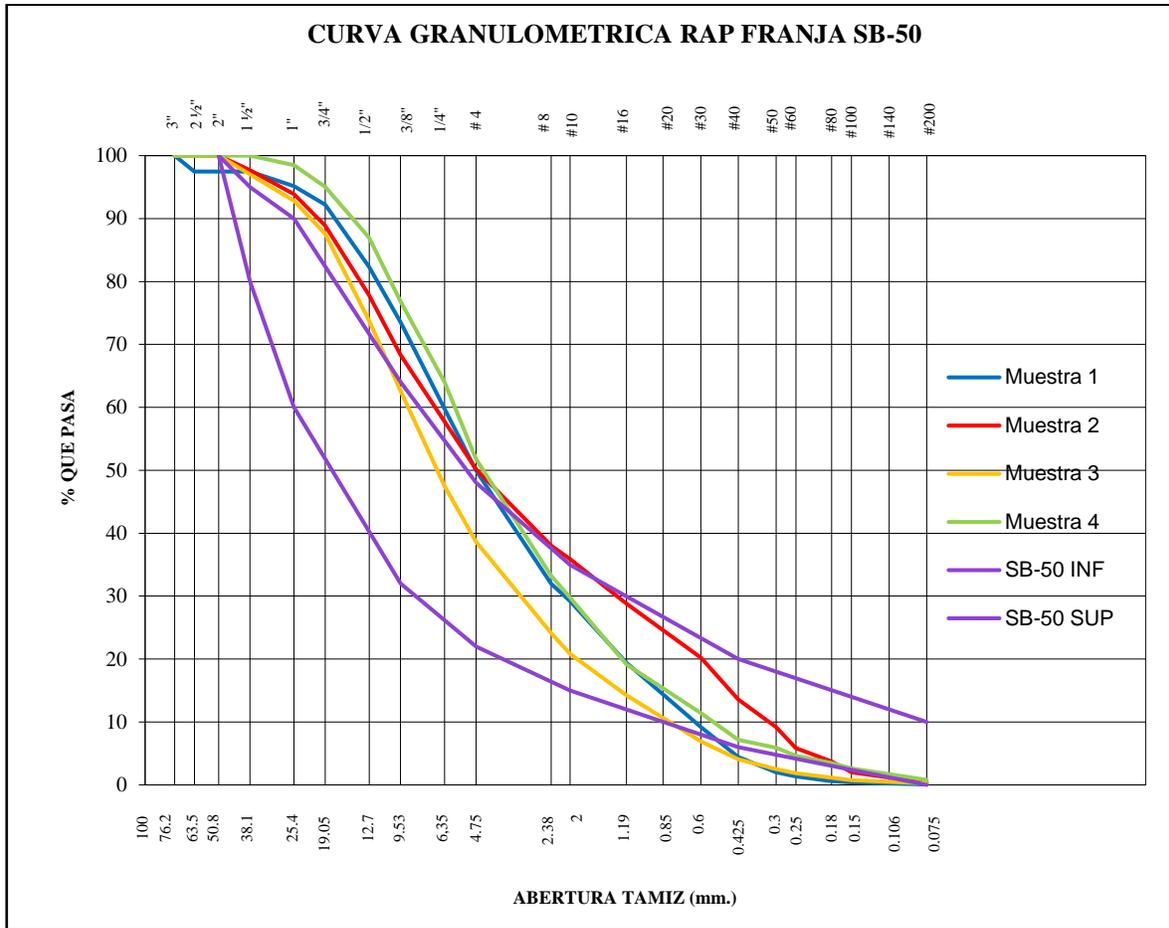


Figura 37 Curva Granulométrica SB-50 IDU

Se puede observar en la gráfica de la franja BG-38 que las curvas se ajustan en su mayor parte, pero tendiendo al límite superior hasta llegar a la abertura del tamiz No.30 en el caso de la muestra 1 y 3 y No. 80 para la muestra 2 en donde se salen del límite inferior, para su uso se debería ajustar la fracción fina después de estos tamices. Para la muestra 4, la fracción gruesa se debe reducir debido a que presenta mayor cantidad que lo requerido en la norma IDU.

Para la franja BG-25 se nota que las curvas tienen mejor ajuste, sobre todo la Muestra 2.

Para la franja SB-50, las curvas no se ajustan adecuadamente debido a que el TMN de las cuatro muestras de RAP es de 3/4" y en esta franja el TMN es de 2", lo cual implica que para hacer el ajuste se debería tener una mayor cantidad de partículas gruesas con tamaño mayor a 4.75 mm (No.8).

- SUBBASE GRANULAR PARA VÍAS PEATONALES Y CICLORUTAS CON AGREGADOS NATURALES

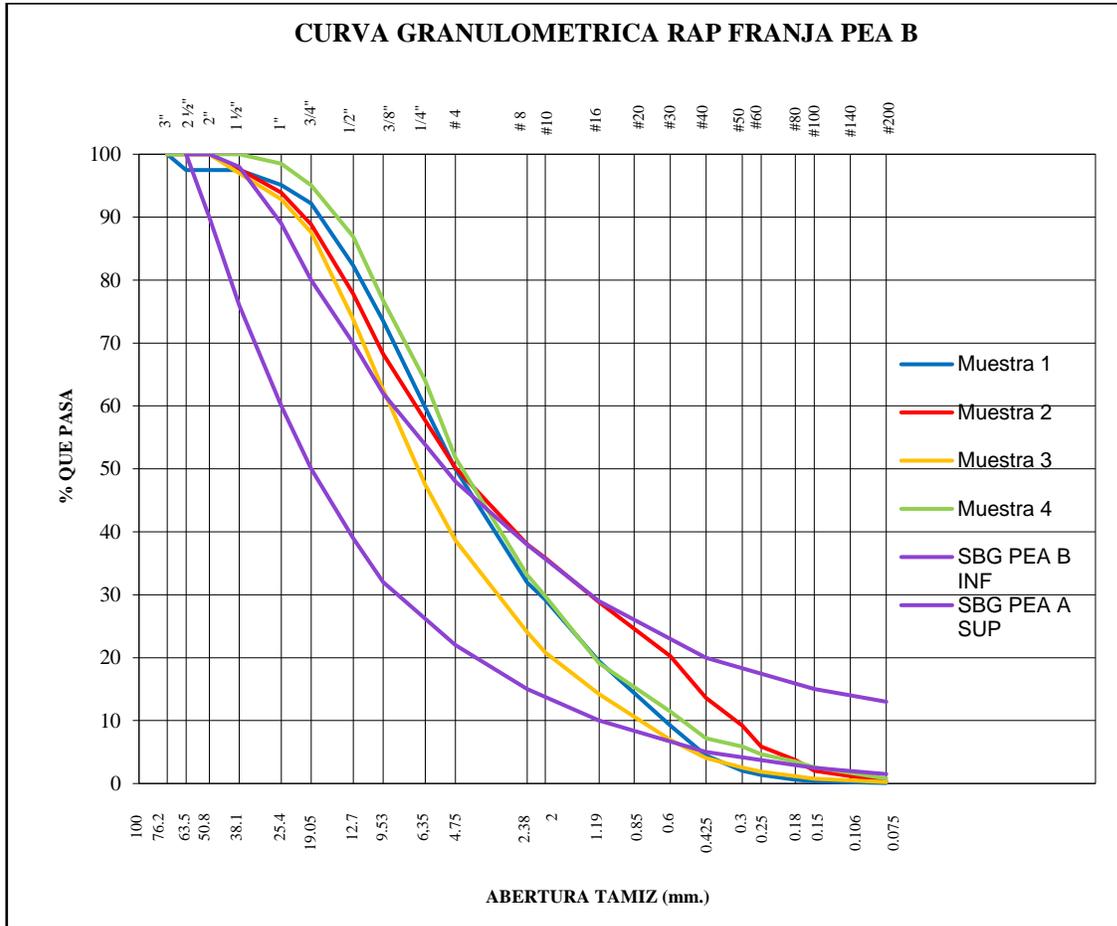


Figura 38 Curva Granulométrica PEA B - IDU

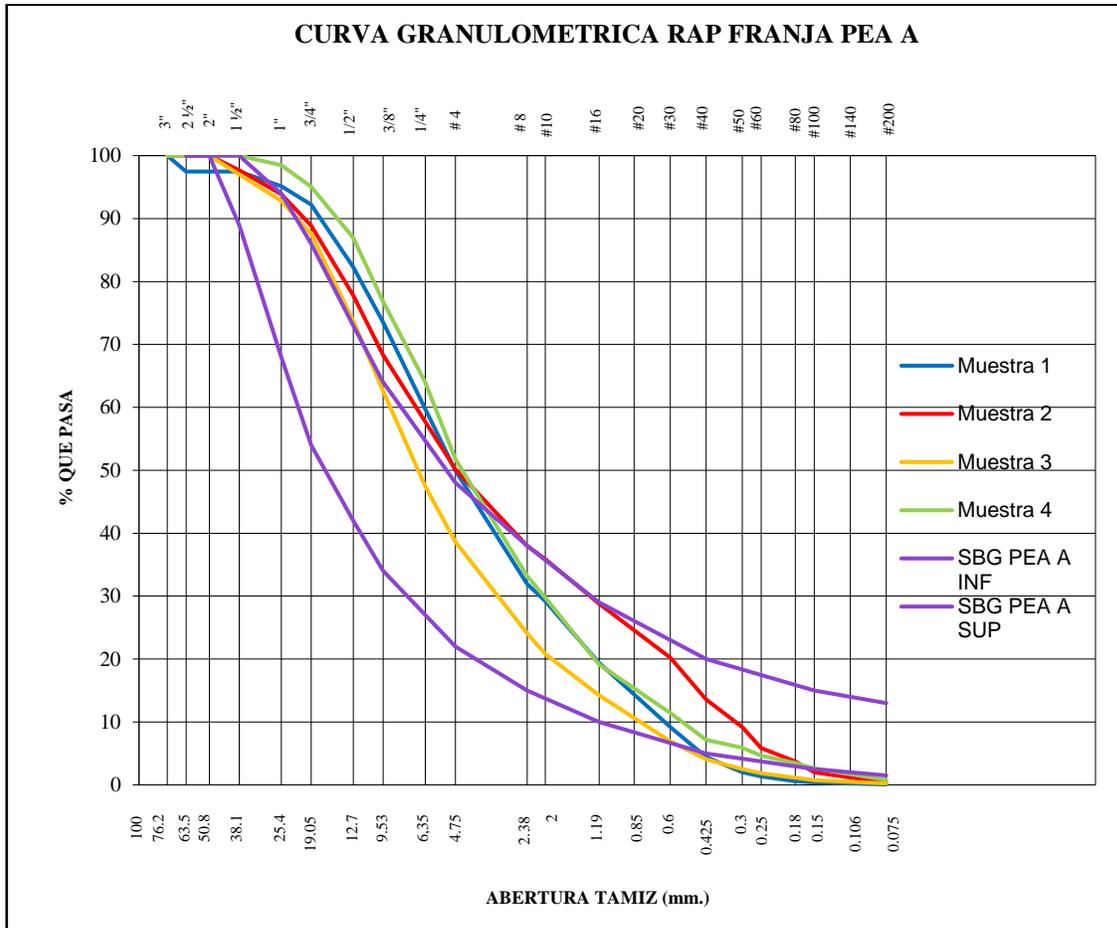


Figura 39 Curva Granulométrica PEA A - IDU

Se observa que las curvas granulométricas no tienen ajuste a las franjas para sub-base peatonal y ciclorutas, en caso de realizar el ajuste, se requerirá añadir material con fracciones de mayor tamaño.

7.1.2. MÁQUINA DE LOS ÁNGELES (INV E-218-13)

7.1.2.1. CONDICIONES DEL ENSAYO

Para las muestras 1, 2, 3 y 4, se realizaron los ensayos siguiendo los lineamientos de la Norma INVIAS INV E-218-13 para agregado de tamaño menor a 1 1/2" que se tiene, se utilizó una carga abrasiva (12 esferas) de 5000 ± 25 g según las condiciones para el método A, el número de revoluciones especificado por la norma es 500 revoluciones las cuales se cumplen en aproximadamente 16 min, estas revoluciones fueron divididas primero en una etapa de 100 revoluciones y en otra de 400 para completar las 500 revoluciones.

7.1.2.2. RESULTADOS DEL ENSAYO

Tabla 133 Resultados del ensayo de Máquina de los Ángeles para las muestras de RAP

		Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
MÁQUINA DE LOS ÁNGELES (INV E-218- 13)	100 REVOLUCIONES	26,42%	8,97%	8,98%	5,94%
	500 REVOLUCIONES	39,70%	31,88%	33,22%	32,31%
	Gradación	A	A	A	C

A continuación, se hará la comparación con las especificaciones INVIAS e IDU en caso de usar el RAP como agregado en bases y subbases.

- **ESPECIFICACIONES INVIAS**

Tabla 14 Comparación con Especificaciones INVIAS Máquina de Los Ángeles RAP

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	INVIAS					
					BASE GRANULAR (%MÁX)			SUB-BASE GRANULAR (%MÁX)		
					CLASE C	CLASE B	CLASE A	CLASE C	CLASE B	CLASE A
100 REVOLUCIONES	26,42%	8,97%	8,98%	5,94%	8%	8%	7%	-	-	-
500 REVOLUCIONES	39,70%	31,88%	33,22%	32,31%	40%	40%	35%	50%	50%	50%

Puede verse que para bases granulares, según las especificaciones INVIAS, en el caso de 100 revoluciones solo la muestra 4 cumple, y para el caso de 500 revoluciones todas cumplen para cualquier clase de base, con excepción de la muestra 1 que no cumple para 500 revoluciones en la clase A, lo que significa que no puede usarse como agregado en bases de estructuras de pavimento con niveles de tránsito mayores a 5.000.000 de ejes equivalentes.

Por su parte, para sub-bases, todas las muestras cumplen con la especificación.

- **ESPECIFICACIONES IDU**

Tabla 15 Comparación con Especificaciones IDU Máquina de Los Ángeles RAP

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	IDU					
					VÍAS VEHICULARES (%MÁX)				VÍAS PEATONALES Y CICLORRUTAS (%MÁX)	
					BG-B	BG-A	SBG-B	SBG-A	SBG PEA-A	SBG PEA-B
100 REVOLUCIONES	26,42%	8,97%	8,98%	5,94%	-	-	-	-	-	-
500 REVOLUCIONES	39,70%	31,88%	33,22%	32,31%	40%	35%	50%	40%	50%	50%

Para las especificaciones IDU todas las muestras cumplen tanto para bases como para sub-bases, se presenta de nuevo el caso anterior en el que la muestra 1 no cumple con la especificación de bases granular tipo A, que corresponde, para IDU, a tránsito mayor a 8.000.000 de ejes equivalentes.

7.1.3. MICRO DEVAL (INV E-238-13)

7.1.3.1. CONDICIONES DEL ENSAYO

Para las muestras 1, 2, 3 y 4, se realizaron los ensayos siguiendo los lineamientos de la Norma INVIAS INV E-238-13 para el TMN (3/4 ") que se tiene se utilizó una carga abrasiva (esferas) de 5000 ± 5 g, se realizó inmersión del material en 2L de agua durante 1h a una temperatura de 21°C siendo la especificada en la norma de $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$, el número de revoluciones dado por la norma es de 12000 ± 100 revoluciones las cuales se cumplen en $2\text{h} \pm 1$ minuto.

7.1.3.2. RESULTADOS DEL ENSAYO

Tabla 16 Resultados del ensayo de Micro Deval para las muestras de RAP

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
Resultados	20,04%	16,68%	18,41%	19,29%

- **ESPECIFICACIONES INVIAS**

Tabla 17 Comparación con Especificaciones INVIAS Micro Deval RAP

				INVIAS					
				BASE GRANULAR (%MÁX)			SUB-BASE GRANULAR (%MÁX)		
Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	CLASE C	CLASE B	CLASE A	CLASE C	CLASE B	CLASE A
20,04%	16,68%	18,41%	19,29%	-	30%	25%	-	35%	30%

Puede verse que, según el criterio de Micro Deval, todas las muestras están cumpliendo con la especificación, con una holgura amplia. Con esto se afirma la suposición de que los materiales granulares que se usaron para la elaboración de la mezcla cumplían en su momento y aún después de haber estado en servicio siguen cumpliendo.

- **ESPECIFICACIONES IDU**

Tabla 18 Comparación con Especificaciones IDU Micro Deval RAP

				IDU					
				BASE GRANULAR (%MÁX)				VÍAS PEATONALES Y CICLORRUTAS	
Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	BG-B	BG-A	SBG-B	SBG-A	SBG PEA-A	SBG PEA-B
20,04%	16,68%	18,41%	19,29%	30%	25%	35%	30%	40%	40%

Para el caso de las especificaciones IDU, de nuevo las cuatro muestras están cumpliendo con los valores máximos establecidos.

7.1.4. PORCENTAJE DE ASFALTO (INV E-732-13)

7.1.4.1. CONDICIONES DEL ENSAYO

Para las cuatro muestras, se prepararon platonos con 1200 gr cada uno, a los cuales se le añadió la cantidad necesaria del solvente Tricloroetileno para que la muestra quedara cubierta; la función de este reactivo es la de separar el asfalto del agregado mineral. El tiempo de inmersión fue de aproximadamente 1 hora.

Pasado este tiempo se pasa la muestra con el solvente al aparato de centrifugación, poniendo la muestra en la taza del aparato con un filtro previamente secado. Se inicia la centrifugación aumentando gradualmente hasta un máximo de 3600 rpm, se detiene la máquina y se agregan 400 ml de Tricloroetileno y se repite el procedimiento, haciendo un total de tres adiciones.

Terminado este procedimiento se pone en el horno cada una de las muestras con sus respectivos filtros, hasta que la muestra y el filtro al ser pesados tengan masa constante. De esta manera, y con el peso inicial, se determina el porcentaje de asfalto.

7.1.4.2. RESULTADOS DEL ENSAYO

	CTU	UMV	IDU	PAVIMENTOS COLOMBIA
% Asfalto	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
	5,9	5,4	5,9	8,0

Tabla 19 Resultados Porcentaje de Asfalto

Estos resultados corresponden a las muestras tomadas en el periodo 2018-2 a 2019-2, sin embargo, en el periodo 2016-2 el Semillero de Investigación en Pavimentos tomó muestras de las cuatro entidades e igualmente se determinó el porcentaje de asfalto, los cuales sirven como punto de comparación con los obtenidos recientemente:

Tabla 20 Porcentajes de Asfalto 2018-II y 2016-II

	CTU	UMV	IDU	PAVIMENTOS COLOMBIA					
	Muestras Tomadas en 2018-II				Muestras Tomadas en 2016-II				
% Asfalto	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 1	Muestra 2-I	Muestra 2-II	Muestra 2-III	Muestra 3
	5,9	5,4	5,9	8,0	5,0	5,1	5,3	5,4	5,3

Los porcentajes de asfalto aquí presentados muestran mayor contenido de finos en el agregado mineral de las muestras 1 y 3 para el periodo 2018-II, hecho que se puede corroborar en las curvas granulométricas obtenidas. Mientras que para el periodo 2016-II se nota mayor contenido de finos en el agregado mineral de las muestras 2 y 3. En el caso de la muestra 4, se obtuvo un porcentaje de asfalto mucho mayor por orden del 8%, debido a la cantidad que se había utilizado al momento de realizar el fresado de la antigua estructura.

7.1.5. RECUPERACIÓN DEL ASFALTO (INV E-759-13)

Luego de separar el agregado mineral del asfalto en la máquina de centrifugación, es necesario hacer el proceso de recuperación, haciendo uso del evaporador rotatorio. Este procedimiento consiste en destilar el solvente y el asfalto, sumergiendo el matraz rotatorio de destilación del rotovapor en un baño de aceite caliente, mientras la solución se somete a vacío parcial y a un flujo de gas nitrógeno.

El asfalto recuperado es el que se puede someter a los ensayos posteriores de caracterización que se requieran.

7.1.6. CARACTERIZACIÓN DEL ASFALTO

7.1.6.1. PENETRACIÓN (INV E 706-13)

7.1.6.1.1. CONDICIONES DEL ENSAYO

En este ensayo, siguiendo los lineamientos de los Norma INV E 706-13, se hizo uso de un penetrómetro constituido por un mecanismo que permite el movimiento vertical sin rozamiento apreciable de un vástago móvil al cual se puede fijar firmemente por su parte inferior la aguja de penetración. La masa del vástago es de 47.5 ± 0.05 g, y la masa total del conjunto móvil formado por el vástago con la aguja es de 50.0 ± 0.05 g.

Para la preparación de las muestras es necesario calentar el asfalto y verterlo en probetas de tamaño medio (55 x 35 mm), dejándolas un tiempo suficiente para que endurezcan. A continuación, se colocan en el baño de agua por un espacio de una hora, a las temperaturas necesarias.

El ensayo fue realizado a cuatro diferentes temperaturas: 4°C, 15 °C, 25°C y 38°C, durante un tiempo de 5 segundos y con una carga móvil total, incluida la aguja, de 100 g.

7.1.6.1.2. RESULTADOS DEL ENSAYO

Tabla 21 Resultados Penetración

	CTU	UMV	IDU	PAVIMENTOS COLOMBIA
	DISTANCIA DE PENETRACIÓN (X10⁻¹ mm)			
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
TEMPERATURA °C	PROMEDIO	PROMEDIO	PROMEDIO	PROMEDIO
4	5	4	6	13
15	9	9	13	15
25	26	17	21	24
38	37	44	44	35

Se tienen resultados del periodo 2016-II para penetración a 25 °C:

Tabla 22 Resultados Penetración 2016-II

TEMPERATURA °C	DISTANCIA DE PENETRACIÓN (X10 ⁻¹ mm) 2016-II				
	Muestra 1	Muestra 2-I	Muestra 2-II	Muestra 2-III	Muestra 3
	PROMEDIO	PROMEDIO	PROMEDIO	PROMEDIO	PROMEDIO
25	21	21	22	19	45

Los resultados de penetración muestran asfaltos altamente envejecidos, y valores distantes en los periodos analizados.

7.1.6.2. PUNTO DE ABLANDAMIENTO (APARATO DE ANILLO Y BOLA) (INV E 712-13)

7.1.6.2.1. CONDICIONES DEL ENSAYO

El ensayo consta de dos anillos horizontales en los cuales se pone la muestra y se enrasa cada una cuando está lo suficientemente rígido, estos se calientan a una velocidad controlada en un baño líquido, mientras cada uno de ellos soporta una bola de acero de 9.5 mm de diámetro, con masa de 3.5 ± 0.05 gr. Los anillos se disponen en una placa de base hecha de material no absorbente. El baño es un vaso de vidrio que se puede calentar, con un diámetro interno no menor de 85 mm y una altura no inferior a 120 mm.

Para todas las muestras, se determinó un punto de ablandamiento esperado de 80 °C, por lo cual el líquido usado es agua.

7.1.6.2.2. RESULTADOS DEL ENSAYO

Tabla 23 Resultados Punto de Ablandamiento

	CTU	UMV	IDU	PAVIMENTOS COLOMBIA
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
ANILLO Y BOLA	TEMPERATURA °C	TEMPERATURA °C	TEMPERATURA °C	TEMPERATURA °C
PROMEDIO	62,75	70,1	72,4	66,4

Al igual que para otros ensayos, se tienen resultados para punto de ablandamiento de muestras tomadas en el periodo 2016, las cuales serán mostradas a continuación:

Tabla 24 Punto de Ablandamiento 2018-II y 2016-II

	CTU	UMV	IDU	PAVIMENTOS COLOMBIA
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
ANILLO Y BOLA	TEMPERATURA °C	TEMPERATURA °C	TEMPERATURA °C	TEMPERATURA °C
PROMEDIO	62,75	70,1	72,4	66,4

Muestra 1	Muestra 2-I	Muestra 2-II	Muestra 2-III	
TEMPERATURA °C				
80,1	70,2	71,3	76,3	63,5

Es posible observar la no homogeneidad de los acopios dada la diferencia de los valores obtenidos para una misma muestra en diferentes periodos. Esto debido a que al provenir las muestras de acopios multi-fuentes, se encuentran aglomeraciones de RAP que tienen diferentes grados de envejecimiento dado que estuvieron en servicio durante tiempos diferentes, es posible que en el proceso de fabricación algunos se envejecieran más que otros y como último factor la fuente de obtención interviene también, haciéndose más énfasis en el RAP proveniente de residuos de plantas.

El punto de ablandamiento se reducirá en la medida que se utilicen agentes rejuvenecedores. Se nota un asfalto con alto grado de envejecimiento dado que por lo general el punto de ablandamiento de un asfalto virgen está alrededor de 40°C.

7.1.6.3. ÍNDICE DE PENETRACIÓN DE LOS CEMENTOS ASFÁLTICOS (INVE 724-13)

Se hará el cálculo del índice de penetración (IP) siguiendo los lineamientos de la norma citada, este índice permite evaluar la susceptibilidad térmica de los materiales, a partir de los resultados obtenidos para penetración a 25 °C y punto de ablandamiento con anillo y bola.

El cálculo del índice de penetración se hace de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$IP = \frac{20 - 10f}{1 + f}$$

Donde:

$$f = \frac{50 \times \log \left[\frac{800}{P} \right]}{T_{AB} - 25}$$

T_{AB} : Punto de ablandamiento, °C.

P: Penetración en 0.1 mm a 25°C.

Dada la expresión se procede a calcular el índice de penetración para cada muestra, teniendo en cuenta los resultados del periodo 2018-2:

- MUESTRA 1:

T_{AB} : 62.75 °C

P: 26 X 10⁻¹ mm

$$f = \frac{50 \times \log \left[\frac{800}{26 \times 10^{-1}} \right]}{62.75 - 25} = 3.29$$

$$IP = \frac{20 - 10 \times 3.29}{1 + 3.29} = -3.0$$

- MUESTRA 2:

T_{AB} : 70.1 °C

P: 17 X 10⁻¹ mm

$$f = \frac{50 \times \log \left[\frac{800}{17 \times 10^{-1}} \right]}{70.1 - 25} = 2.96$$

$$IP = \frac{20 - 10 \times 2.96}{1 + 2.96} = -2.4$$

▪ MUESTRA 3:

T_{AB} : 72.4 °C

P: 21 X 10⁻¹ mm

$$f = \frac{50 \times \log \left[\frac{800}{21 \times 10^{-1}} \right]}{72.4 - 25} = 2.72$$

$$IP = \frac{20 - 10 \times 2.72}{1 + 2.72} = -1.9$$

▪ MUESTRA 4:

T_{AB} : 66.4 °C

P: 24 X 10⁻¹ mm

$$f = \frac{50 \times \log \left[\frac{800}{24 \times 10^{-1}} \right]}{66.4 - 25} \cong 3.05$$

$$IP = \frac{20 - 10 \times 3.05}{1 + 3.05} = -2.6$$

Tabla 25 Resultados Índice de Penetración (IP)

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
ÍNDICE DE PENETRACIÓN (INV E 724-13)	-3,0	-2,4	-1,9	-2,6

Dado que los resultados de IP son menores a -1 para las cuatro muestras, se trata de asfaltos con mayor susceptibilidad térmica, entre ellos, el de la muestra 1 es el más susceptible a los cambios de temperatura.

Habría que hacer uso de agentes rejuvenecedores que permitan ablandar el asfalto y así poder entrar entre los rangos de índices de penetración para las especificaciones los cuales deben estar entre -1.2 y +0.6.

7.1.6.4. VISCOSIDAD DEL ASFALTO EMPLEANDO UN VISCOSÍMETRO ROTACIONAL (INVE 717-13)

7.1.6.4.1. CONDICIONES DEL ENSAYO

Según los lineamientos de la Norma citada, para la realización de la curva de viscosidad, se trabajó cada una de las muestras a temperaturas de 90, 110, 130, 150 y 180 °C. El par de torsión requerido para mantener rotando a velocidad constante un vástago cilíndrico sumergido en la muestra, se utiliza para determinar la resistencia relativa a la rotación. La viscosidad del ligante en Pa.s, se calcula a partir de los valores de torque y rotación.

7.1.6.4.2. RESULTADOS DEL ENSAYO

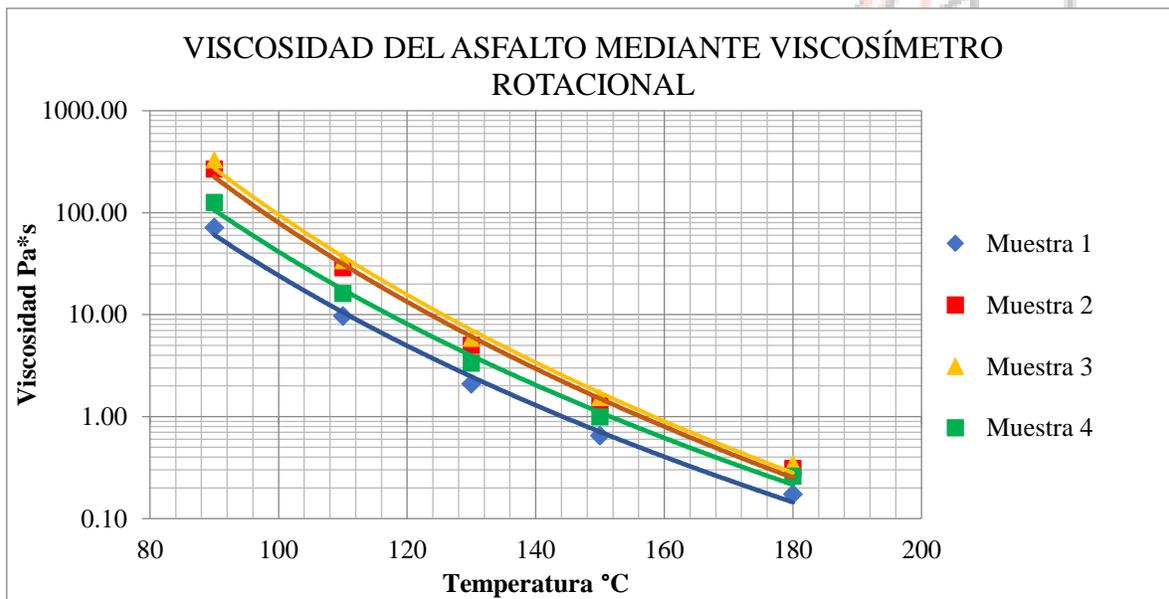


Figura 40 Resultados Viscosidades

Se observa en el gráfico que el asfalto que contenía el RAP de la muestra 1 es menos viscoso que las otras dos muestras, esto debido a que el acopio de la entidad 1 es más pequeño y el material proviene en su mayor medida de un proyecto de concesión, el cual hace reparaciones rutinariamente sin dejar desgastar mucho la vía, por lo tanto este asfalto requerirá una menor cantidad de rejuvenecedor para

llegar al requerido en nuevas mezclas asfálticas, se observa que las muestras 2 y 3 son muy similares con viscosidades más altas.

Se mostrarán ahora los resultados obtenidos en el periodo 2016-2 para cada muestra.

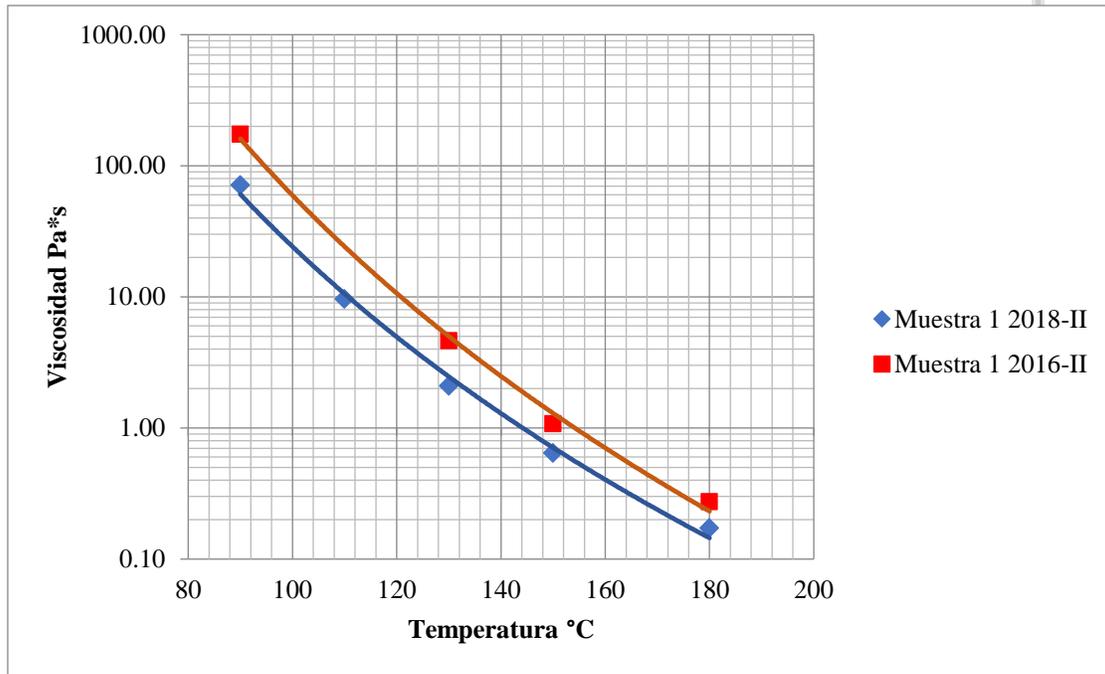


Figura 41 Viscosidades Muestra 1 2018-II y 2016-II

En la gráfica anterior se compara dos muestras de la misma entidad tomadas en periodos diferentes, se observa que no se conserva la misma viscosidad lo que indica que el acopio es susceptible a variaciones con el tiempo de almacenamiento, se debe a que al ser un acopio pequeño el material se utiliza con mayor rapidez y se recarga el acopio con material nuevo o a que los agentes climáticos afectan de forma abrupta al acopio.

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO

VIGILADA MINEDUCACIÓN

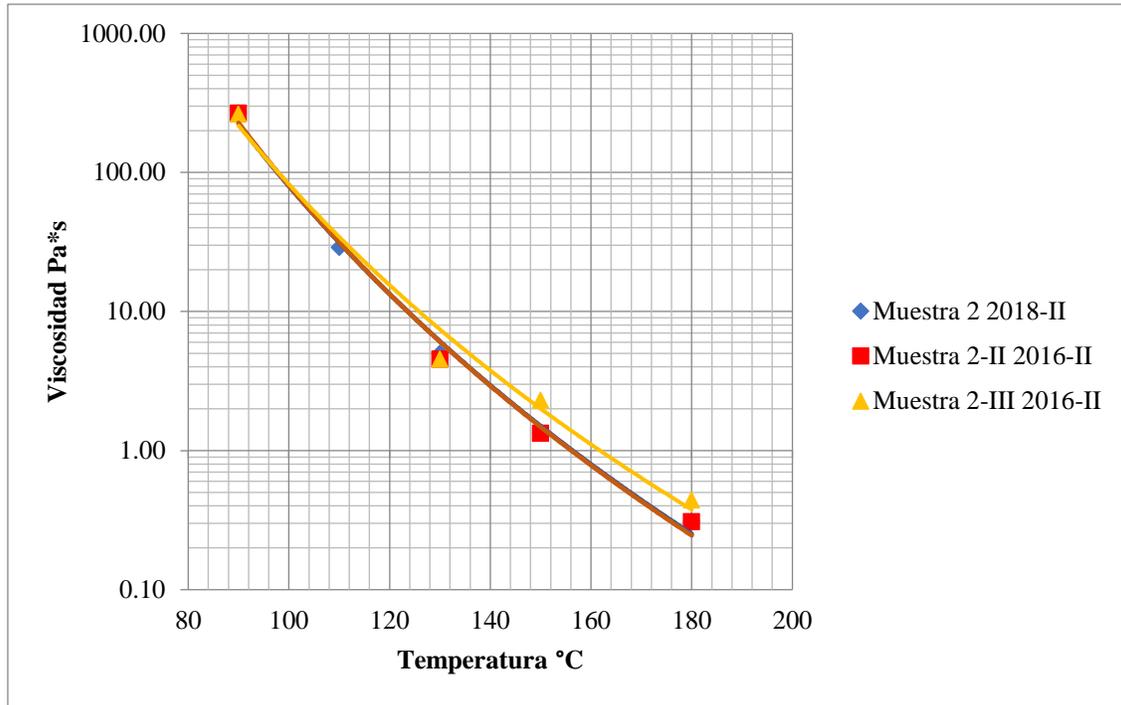


Figura 42 Viscosidades Muestra 2 2018-II y 2016-II

Los resultados vistos para la muestra 2 evidencian viscosidades muy parecidas para los diferentes periodos, de hecho, se nota que las curvas de la Muestra 2 2018-II y la Muestra 2-II 2016-II casi están superpuestas. Se ha visto en ensayos anteriores que la muestra que más conserva proximidad en los resultados para los periodos analizados es la muestra 2, lo que puede deberse a que se tomaran las muestras de una misma fuente, esto producto de la extensión tan grande del acopio.

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO

VIGILADA MINEDUCACIÓN

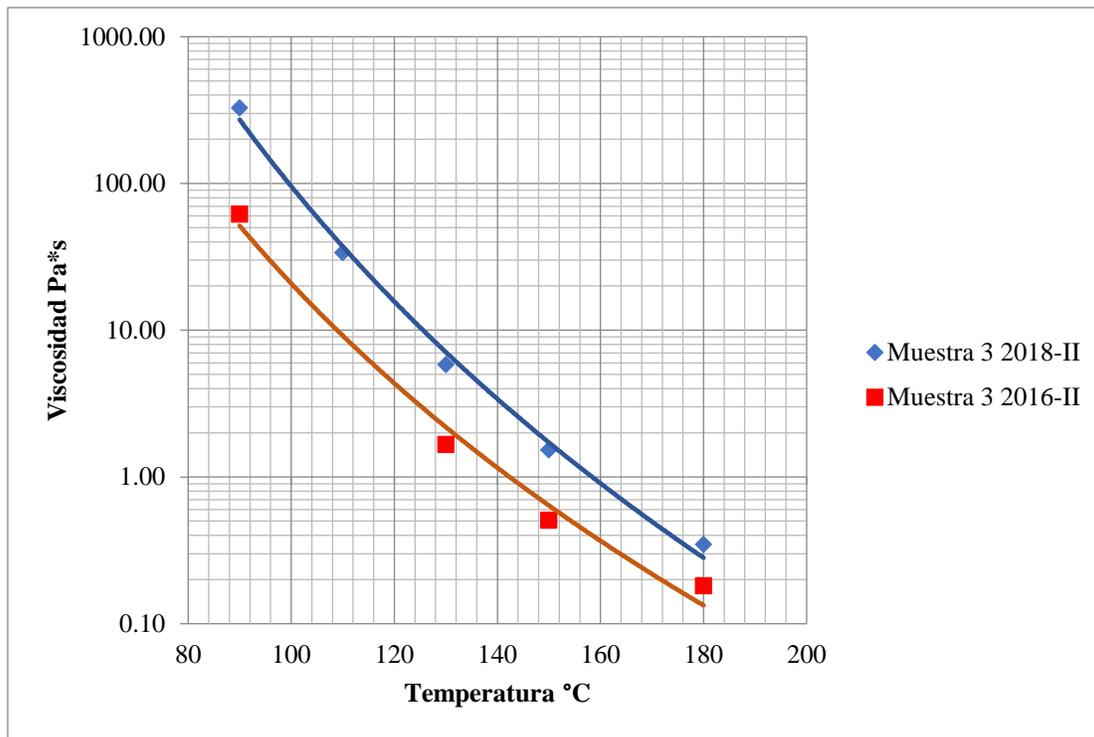


Figura 43 Viscosidades Muestra 3 2018-II y 2016-II

La muestra 3 presenta variaciones notables en los resultados de viscosidad, siendo menos viscosa la muestra tomada en el periodo 2016-2, lo que indica que esta pudo estar menos envejecida en el momento del ensayo.

7.1.6.5. EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD TÉRMICA DEL CEMENTO ASFÁLTICO (MANUAL DE DISEÑO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS EN VÍAS CON MEDIOS Y ALTOS VOLÚMENES DE TRÁNSITO)

- Evaluación de la Susceptibilidad Térmica del Cemento Asfáltico a través de la variación de la Viscosidad con la Temperatura

Este es un procedimiento descrito en el Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos en Vías con Medios y Altos Volúmenes de Tránsito; la viscosidad de los cementos asfálticos varía en márgenes muy amplios, por ejemplo, a temperaturas próximas a 0 °C la viscosidad es del orden de 10¹⁰ mPa.s (mili pascal por segundo), mientras que a las temperaturas de mezcla (150 °C) su valor es de solo 200 mPa.s. A esta

propiedad se le denomina susceptibilidad térmica y es la que permite su empleo como ligante en la elaboración de mezclas asfálticas a elevadas temperaturas, se deben tener viscosidades tan bajas que permita la envuelta de las partículas de agregado y la posterior extensión y compactación de las mezclas asfálticas al enfriarse, el ligante aumenta considerablemente su viscosidad y actúa como un aglomerante de las partículas, dando cohesión a la mezcla asfáltica. (*Instituto Nacional de Vías (INVIAS), 2015*)

El procedimiento consiste en la representación lineal de la variación de la viscosidad con la temperatura, a través de la fórmula de Walter, utilizada en la norma ASTM D-2493, en la que se representa en ordenadas el logaritmo del logaritmo de la viscosidad y en abscisas el logaritmo de la temperatura absoluta.

Así, la ecuación definida por regresión lineal es la siguiente:

$$\log \log \eta = A + VTS \times \log TR$$

Ecuación 1

En donde:

η : Viscosidad, centiPoise

TR: Temperatura, °Rankine

A: Intercepto de la regresión resultante al relacionar la viscosidad y temperatura, en las escalas correspondientes.

VTS: (Susceptibilidad Viscosidad-Temperatura): Pendiente de la curva de regresión.

Mediante esta regresión lineal es posible determinar la viscosidad del ligante a la temperatura de trabajo que se requiera en el diseño con el fin de determinar el módulo dinámico de la mezcla asfáltica.

- *Relación entre la viscosidad y la penetración de un cemento asfáltico sin modificar*

Utilizando la siguiente ecuación, desarrollada en el modelo de Mizar and Witczak en el año 1995 en la universidad de Maryland, se puede determinar la viscosidad del cemento asfáltico sin modificar a una determinada temperatura:

$$\log \eta = 10.5012 - 2.2601 \times \log Pen + 0.00389 \log Pen^2$$

Ecuación 2

Donde:

η : Viscosidad, Poises

Pen: Penetración en 1/10 mm para una carga de 100 g, en un tiempo de 5 seg de carga y a la temperatura a la que se quiere determinar la viscosidad.

- *Relación entre la viscosidad y el punto de ablandamiento (ensayo de anillo y bola)*

Conocido el punto de ablandamiento del cemento asfáltico seleccionado, se puede estimar con una buena aproximación, que su viscosidad a esa temperatura es de 13000 Poises.

La siguiente tabla resume los valores de viscosidad a usar según el ensayo:

Tabla 26 Relación entre viscosidad y los diferentes ensayos.

ENSAYO	Conversión a viscosidad, Poise
Penetración (INV E - 706)	Ecuación 2
Punto de Ablandamiento (INV E - 712)	13000
Viscosidad (INV E - 717)	Medición Directa

Con el procedimiento anterior, se construye la gráfica de susceptibilidad térmica del asfalto recuperado de las cuatro entidades.

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO

VIGILADA MINEDUCACIÓN

• **Muestra 1:**

Tabla 27 Tabla de Susceptibilidad Térmica Muestra 1

ASFALTO RECUPERADO MUESTRA 1							
Ensayo	Temperatura (°C)	Penetración (mm/10)	Viscosidad (P)	Viscosidad (cP)	Temperatura TR (°R)	log.TR	log.log.η
Penetración	4	5	730745627.0	73074562701	499	2.698	1.036
Penetración	15	9	224874655.6	22487465556	519	2.715	1.015
Penetración	25	26	20617083.5	2061708346	537	2.730	0.969
Penetración	38	37	9313392.2	931339222	560	2.748	0.953
Punto de Ablandamiento	62.75		13000.0	1300000	605	2.781	0.786
Viscosidad "Rotacional"	90		713.6	71361	654	2.815	0.686
Viscosidad "Rotacional"	110		96.4	9644	690	2.839	0.600
Viscosidad "Rotacional"	130		21.0	2100	726	2.861	0.521
Viscosidad "Rotacional"	150		6.5	648	762	2.882	0.449
Viscosidad "Rotacional"	180		1.7	173	816	2.912	0.350

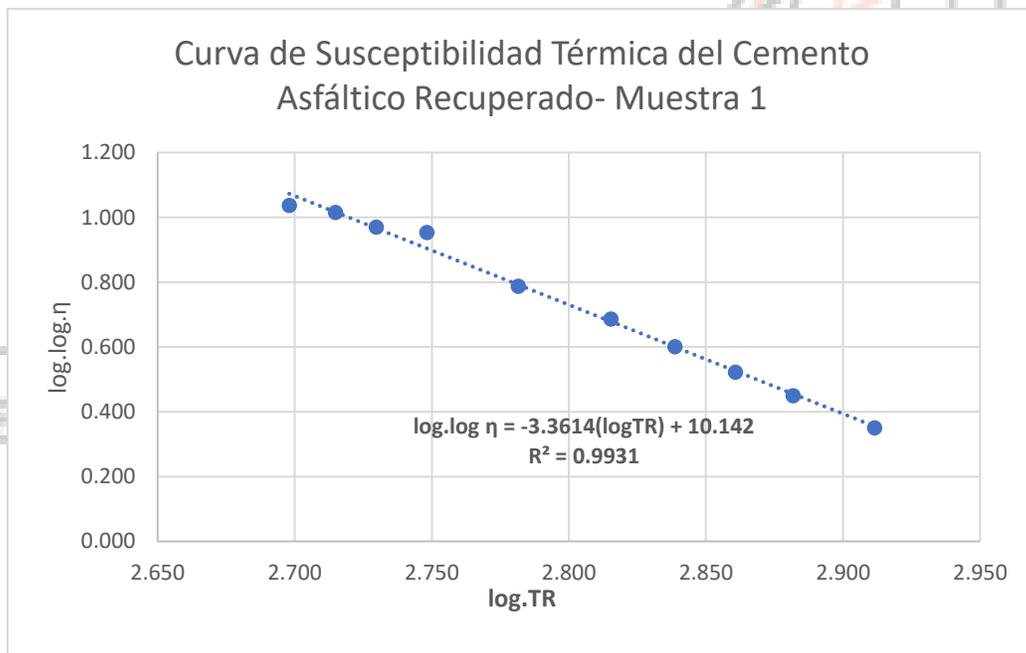


Figura 44 Curva de Susceptibilidad Térmica del Cemento Asfáltico Recuperado - Muestra 1

Tabla 28 Susceptibilidad Térmica Muestra 1

Intercepto A =	10.142
Susceptibilidad Viscosidad – Temperatura VTS =	-3.3614
Coefficiente R ² =	99.31%

- **Muestra 2:**

Tabla 29 Tabla de Susceptibilidad Térmica Muestra 2

ASFALTO RECUPERADO MUESTRA 2							
Ensayo	Temperatura (°C)	Penetración (mm/10)	Viscosidad (P)	Viscosidad (cP)	Temperatura TR (°R)	log.TR	log.log.η
Penetración	4	4	1166468064.4	116646806440	499	2.698	1.044
Penetración	15	9	244825682.2	24482568220	519	2.715	1.017
Penetración	25	17	56131367.7	5613136768	537	2.730	0.989
Penetración	38	44	6412941.2	641294123	560	2.748	0.945
Punto de Ablandamiento	70.1		13000.0	1300000	618	2.791	0.786
Viscosidad "Rotacional"	90		2683.3	268333	654	2.815	0.735
Viscosidad "Rotacional"	110		288.3	28833	690	2.839	0.649
Viscosidad "Rotacional"	130		49.9	4989	726	2.861	0.568
Viscosidad "Rotacional"	150		13.5	1353	762	2.882	0.496
Viscosidad "Rotacional"	180		3.1	309	816	2.912	0.396

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO

VIGILADA MINEDUCACIÓN

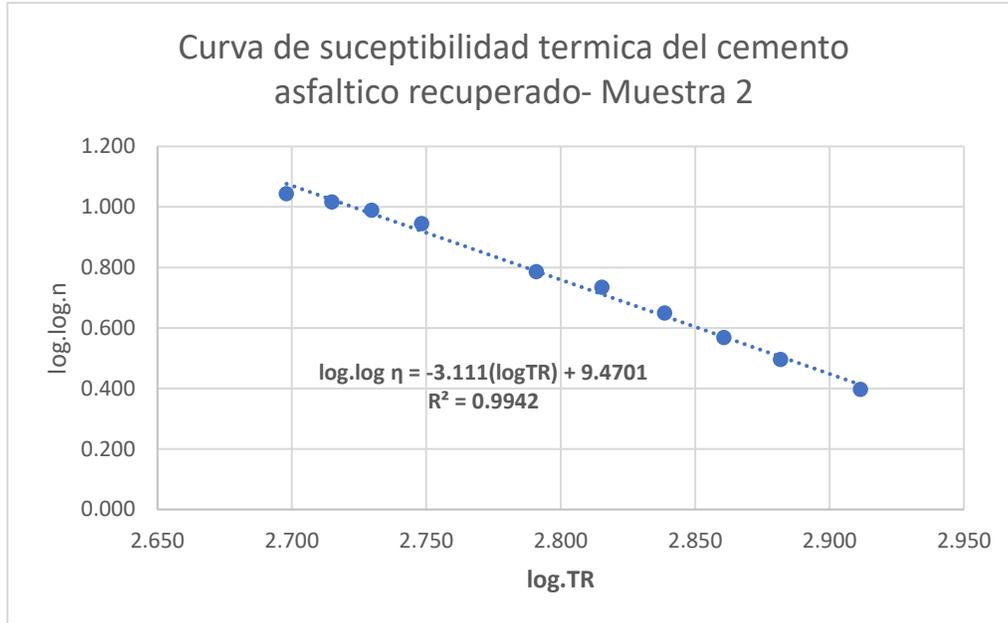


Figura 45 Curva de Susceptibilidad Térmica del Cemento Asfáltico Recuperado - Muestra 2

Tabla 30 Susceptibilidad Térmica Muestra 2

Intercepto A =	9.4701
Susceptibilidad Viscosidad – Temperatura VTS =	-3.111
Coficiente R² =	99.42%

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO

VIGILADA MINEDUCACIÓN

• **Muestra 3:**

Tabla 31 Tabla de Susceptibilidad Térmica Muestra 3

ASFALTO RECUPERADO MUESTRA 3							
Ensayo	Temperatura (°C)	Penetración (mm/10)	Viscosidad (P)	Viscosidad (cP)	Temperatura TR (°R)	log.TR	log.log.η
Penetración	4	6	560472586.8	56047258681	499	2.698	1.031
Penetración	15	13	98229765.8	9822976583	519	2.715	1.000
Penetración	25	21	33353317.5	3335331753	537	2.730	0.979
Penetración	38	44	6304035.8	630403575	560	2.748	0.944
Punto de Ablandamiento	72.4		13000.0	1300000	622	2.794	0.786
Viscosidad "Rotacional"	90		3283.3	328333	654	2.815	0.742
Viscosidad "Rotacional"	110		338.1	33805	690	2.839	0.656
Viscosidad "Rotacional"	130		58.4	5841	726	2.861	0.576
Viscosidad "Rotacional"	150		15.3	1535	762	2.882	0.503
Viscosidad "Rotacional"	180		3.5	348	816	2.912	0.405

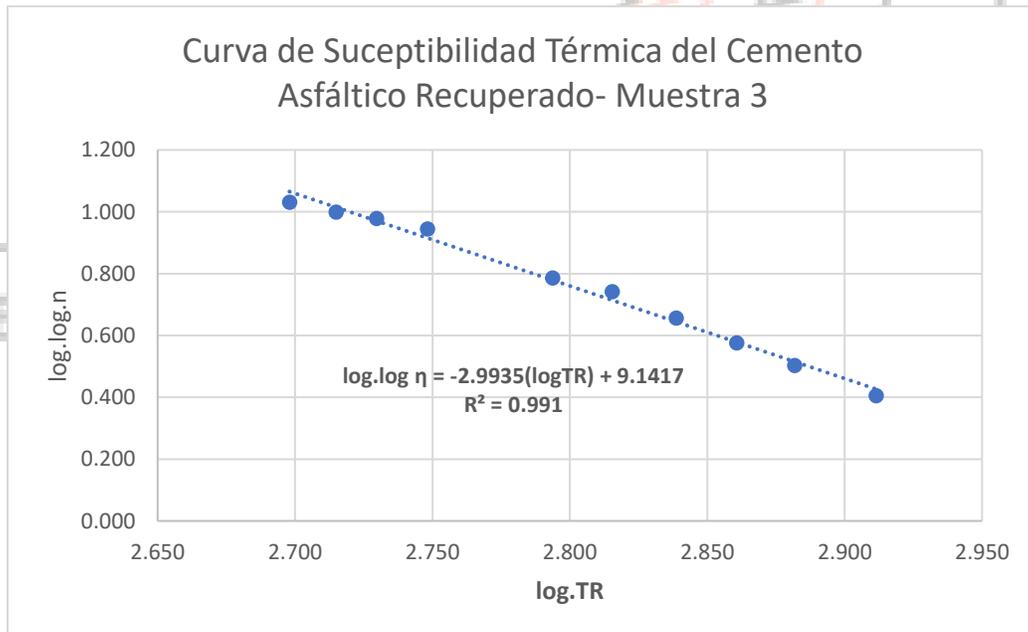


Figura 46 Curva de Susceptibilidad Térmica del Cemento Asfáltico Recuperado - Muestra 3

Tabla 32 Susceptibilidad Térmica Muestra 3

Intercepto A =	9.1417
Susceptibilidad Viscosidad – Temperatura VTS =	-2.9935
Coefficiente R ² =	99.1%

• **Muestra 4:**

ASFALTO RECUPERADO MUESTRA 4							
Ensayo	Temperatura (°C)	Penetración (mm/10)	Viscosidad (P)	Viscosidad (cP)	Temperatura TR (°R)	log.TR	log.log.η
Penetración	4	13	98229765,8	9822976583	499	2,698	1,000
Penetración	15	15	71164947,8	7116494784	519	2,715	0,994
Penetración	25	24	24690086,8	2469008676	537	2,730	0,973
Penetración	38	35	10555156,1	1055515615	560	2,748	0,955
Punto de Ablandamiento	66,4		13000,0	1300000	611	2,786	0,786
Viscosidad "Rotacional"	90		1261,8	126176	654	2,815	0,708
Viscosidad "Rotacional"	110		161,3	16130	690	2,839	0,624
Viscosidad "Rotacional"	130		33,3	3331	726	2,861	0,547
Viscosidad "Rotacional"	150		10,0	995	762	2,882	0,477
Viscosidad "Rotacional"	180		2,6	261	816	2,912	0,383

Tabla 33 Tabla de Susceptibilidad Térmica Muestra 4

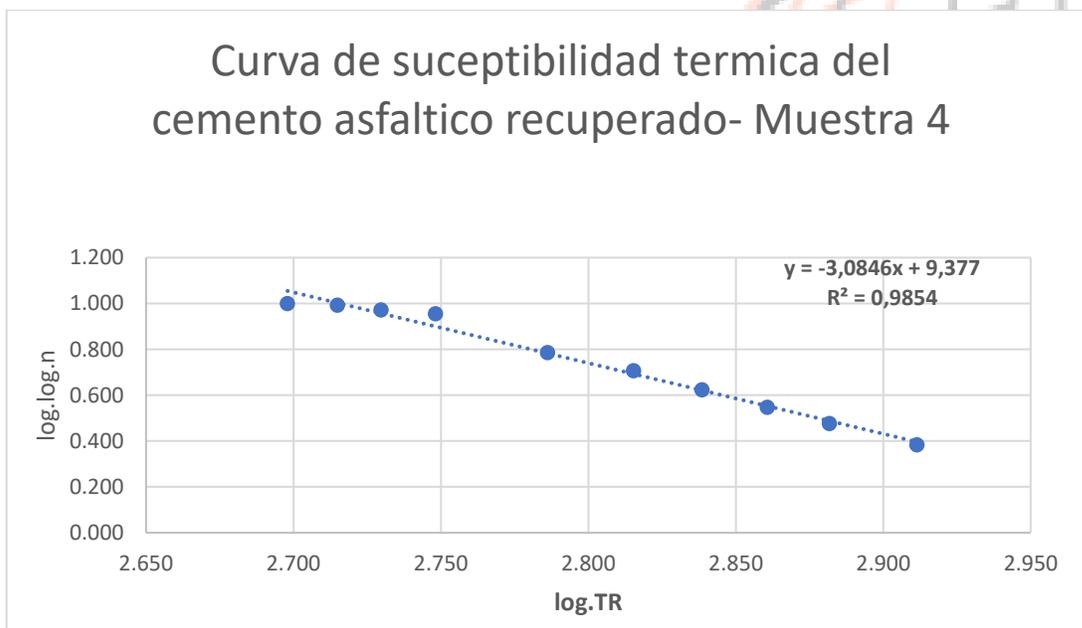
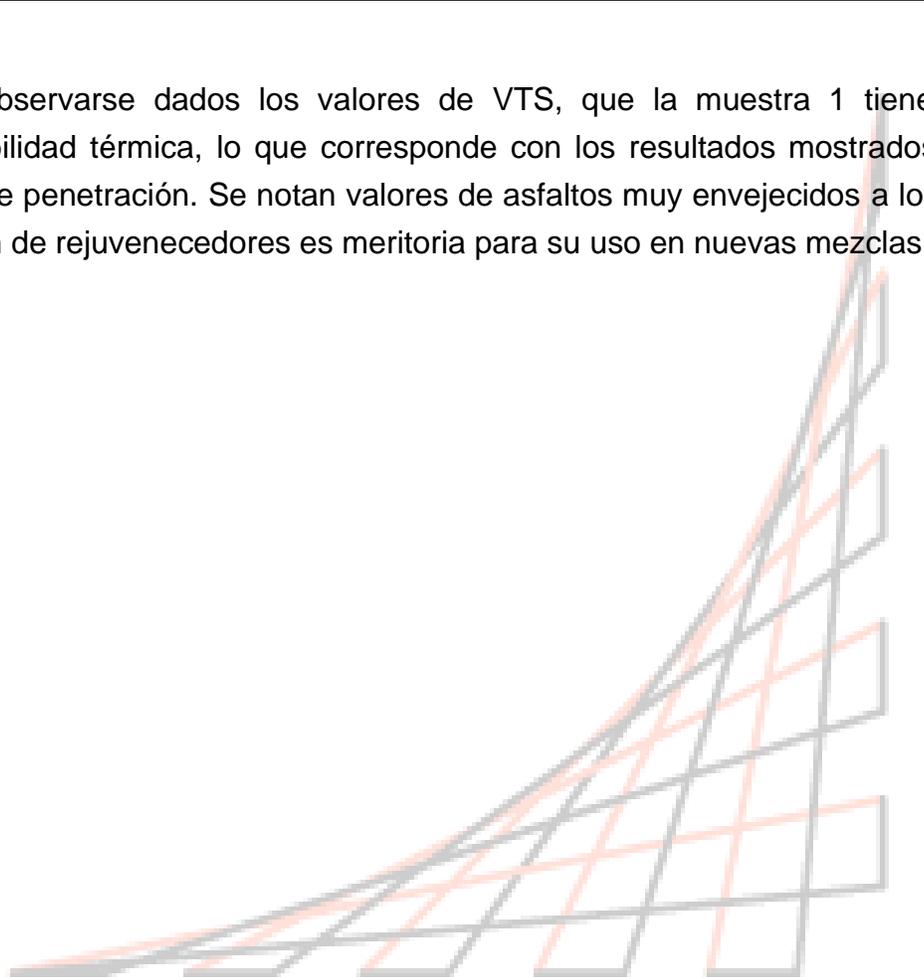


Figura 47 Curva de Susceptibilidad Térmica del Cemento Asfáltico Recuperado - Muestra 4

Tabla 34 Susceptibilidad Térmica Muestra 4

Intercepto A =	9.377
Susceptibilidad Viscosidad – Temperatura VTS =	-3.0846
Coefficiente R² =	98.5%

Puede observarse dados los valores de VTS, que la muestra 1 tiene mayor susceptibilidad térmica, lo que corresponde con los resultados mostrados en los índices de penetración. Se notan valores de asfaltos muy envejecidos a los cuales la adición de rejuvenecedores es meritoria para su uso en nuevas mezclas.



ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO

VIGILADA MINEDUCACIÓN

7.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS APLICADOS AL AGREGADO MINERAL

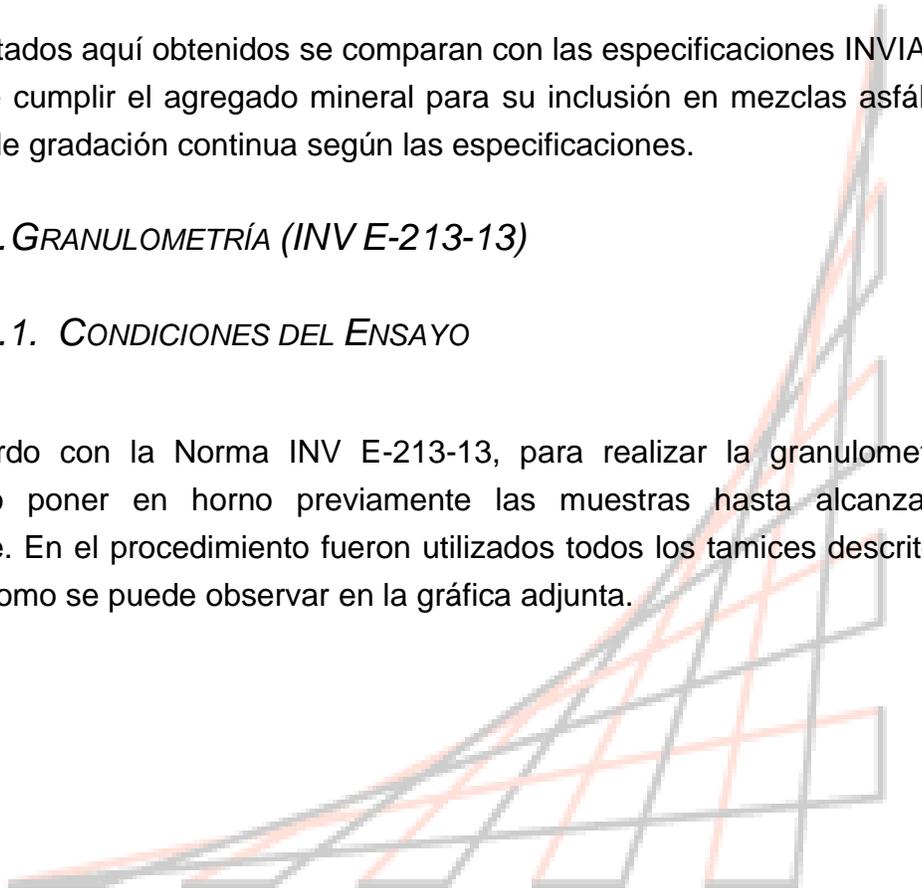
Cada muestra de agregado mineral extraído en el proceso de centrifugación fue lavado sobre tamiz No. 200 para eliminar los residuos de solvente utilizado y posteriormente fue secado con el objetivo de tener el agregado en condiciones óptimas para la realización de los ensayos descritos a continuación.

Los resultados aquí obtenidos se comparan con las especificaciones INVIAS e IDU que debe cumplir el agregado mineral para su inclusión en mezclas asfálticas en caliente de gradación continua según las especificaciones.

7.2.1. GRANULOMETRÍA (INV E-213-13)

7.2.1.1. CONDICIONES DEL ENSAYO

De acuerdo con la Norma INV E-213-13, para realizar la granulometría, fue necesario poner en horno previamente las muestras hasta alcanzar masa constante. En el procedimiento fueron utilizados todos los tamices descritos en la Norma, como se puede observar en la gráfica adjunta.



ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO

VIGILADA MINEDUCACIÓN

7.2.1.2. RESULTADOS DEL ENSAYO

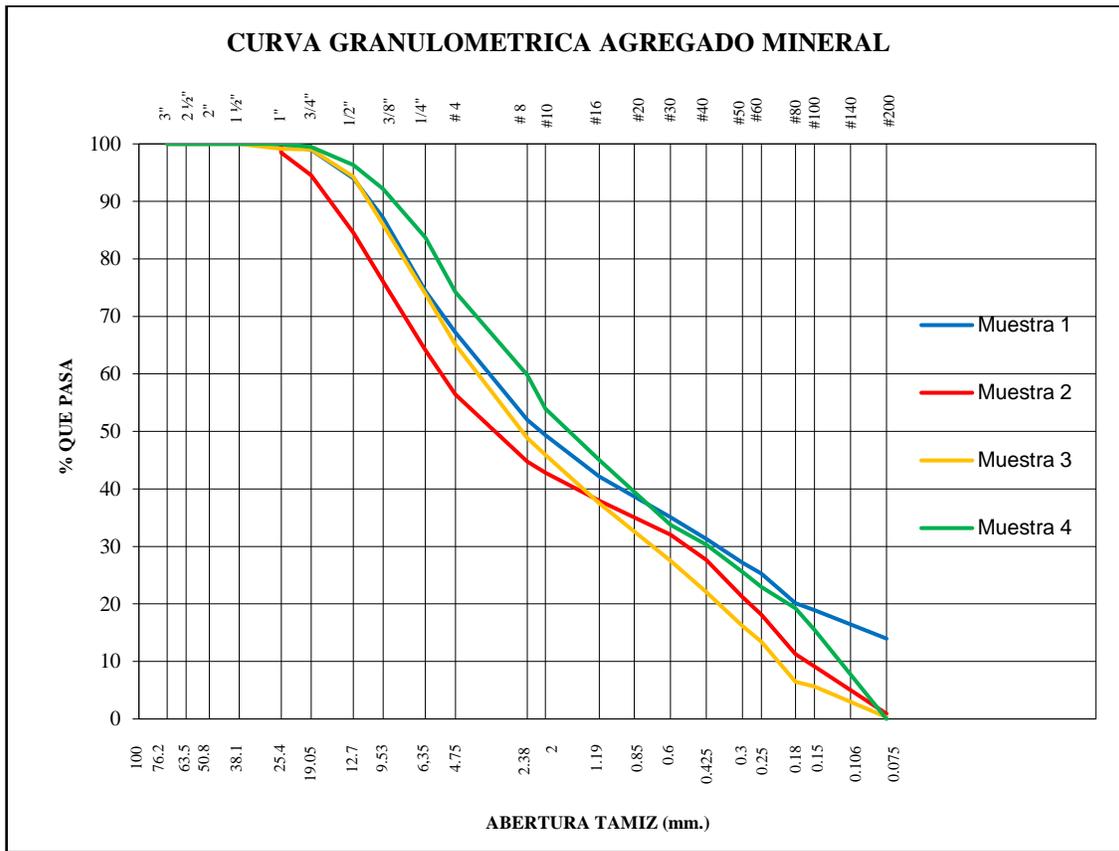


Figura 48 Curva Granulométrica Agregado Mineral

Se hará el análisis para las franjas granulométricas dadas en las especificaciones INVIAS e IDU para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua.

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO

VIGILADA MINEDUCACIÓN

- **ESPECIFICACIONES INVIAS**

- **MEZCLAS DENSAS**

MEZCLA DENSA EN CALIENTE-MDC-25

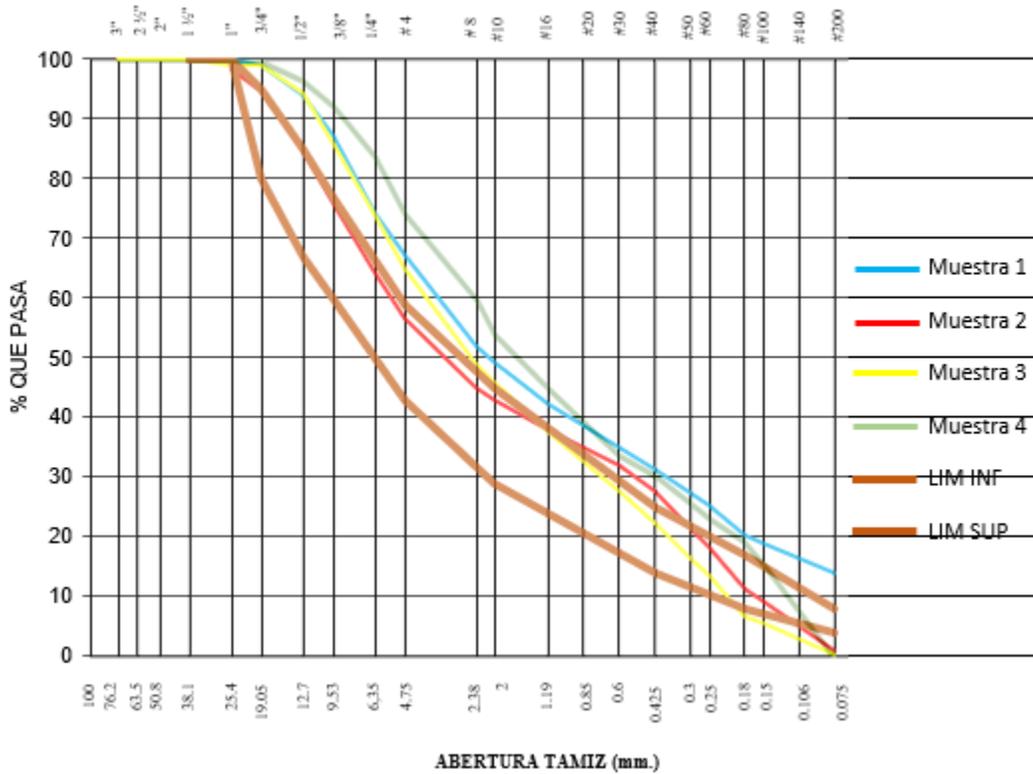


Figura 49 Curva Granulométrica MDC-25



Figura 51 Curva Granulométrica MDC-19

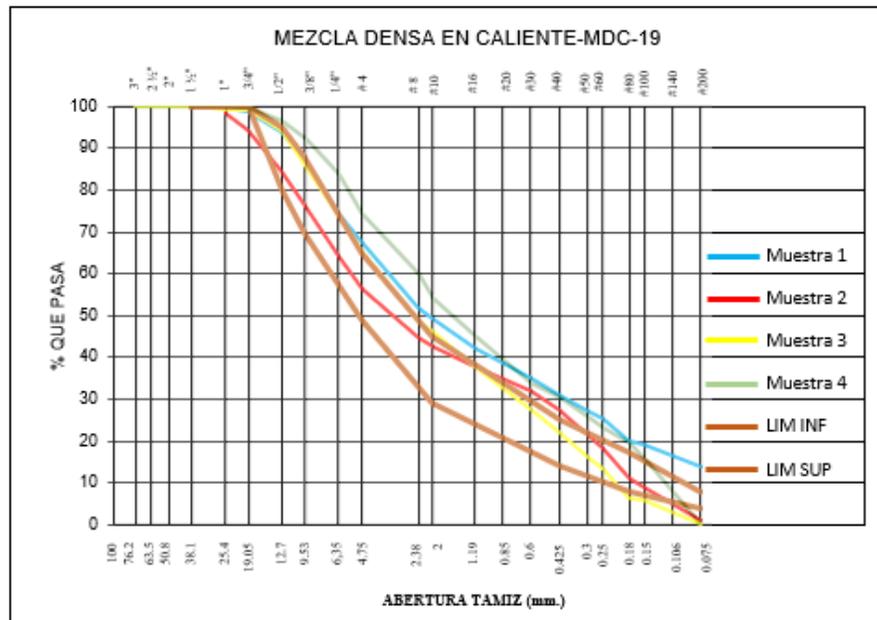
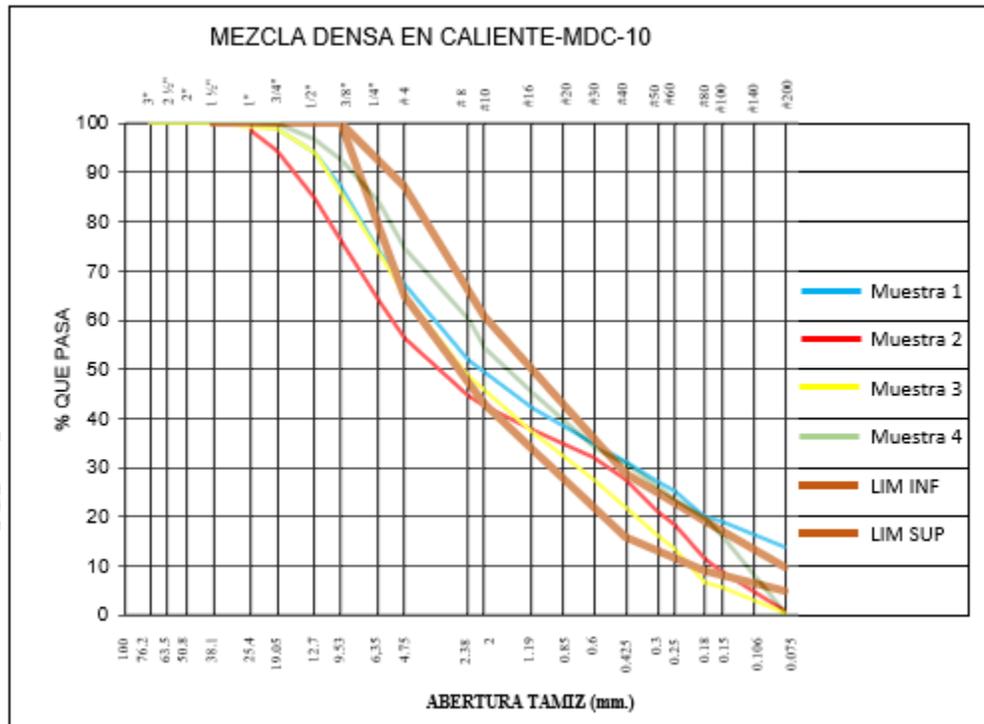


Figura 50 Curva Granulométrica MDC-10



Se evidencia en las anteriores gráficas que el encaje de las curvas granulométricas en las diferentes franjas para mezclas densas en caliente depende del tamaño máximo nominal que se especifica en cada una y del que tiene cada muestra. Así,

para la mezcla MDC-25 se ve que las curvas se salen de la franja en su mayoría, lo que se debe a que el TMN de las muestras oscila entre $\frac{1}{2}$ " (12.7 mm) y $\frac{3}{4}$ " (19.05mm), y no corresponde al tamaño de 25 mm que allí se especifica, lo cual dificulta de manera importante el ajuste de las muestras por granulometría, para este tipo de mezcla.

Por otro lado, para la mezcla MDC-19, las muestras 2 y 3 presentan un mejor ajuste a la franja aún cuando están muy cerca del límite superior, lo que hace necesario acomodar la granulometría retirando un poco de la parte final. La muestra 1 sigue sin estar dentro de la franja dado su TMN.

Para la mezcla MDC-10, la muestra 1 encaja y se acerca a la franja por el límite superior, sin que eso signifique que sea la óptima, en general las muestras se ajustan mejor a partir del tamiz No. 4 y No. 8 hasta la parte la fina en el tamiz No. 80. Todas las granulometrías son ajustables si se requiere su uso en este tipo de mezcla. De acuerdo con la muestra 4, la curva granulométrica que más se asemeja es la de MDC-10, ya que su comportamiento está dentro del rango establecido desde el tamiz $\frac{1}{4}$ " hasta el tamiz No. 100, lo cual indica que se puede cumplir con las especificaciones dadas por el INVIAS.

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO

VIGILADA MINEDUCACIÓN

○ **MEZCLAS SEMIDENSAS**

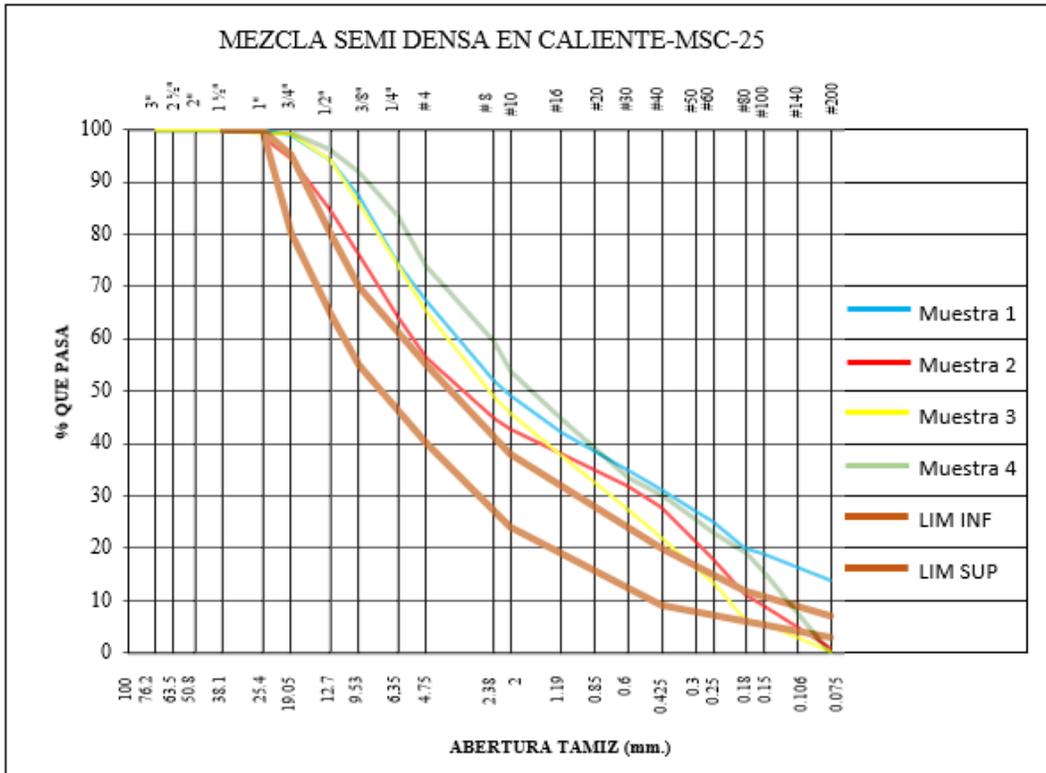


Figura 53 Curva Granulométrica MSC-25

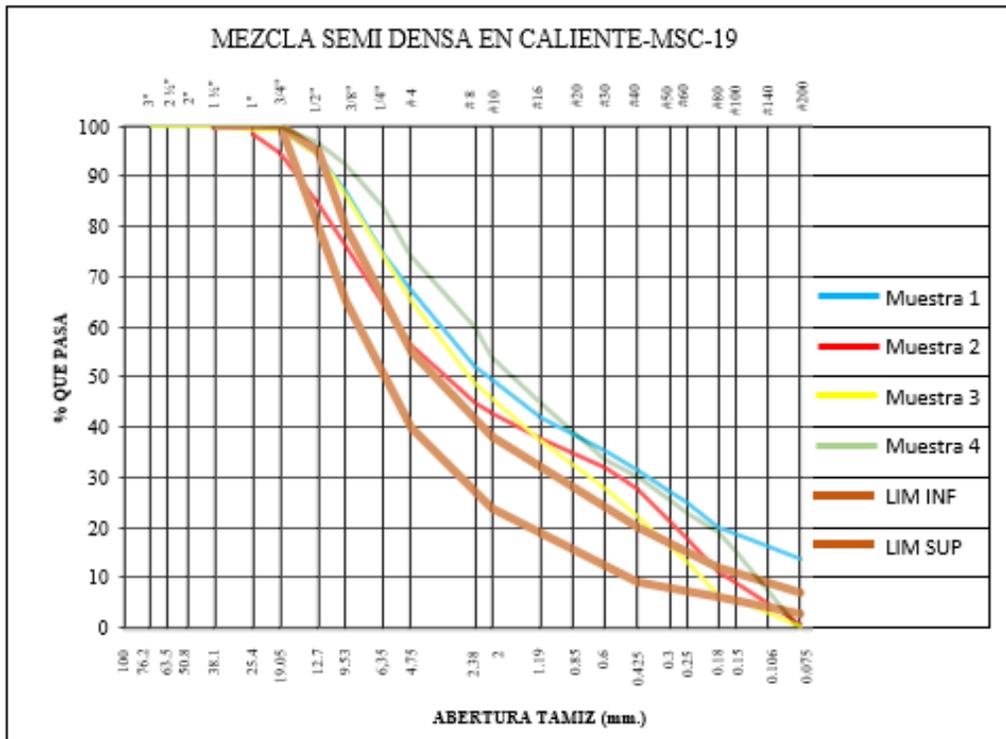


Figura 52 Curva Granulométrica MSC-19

En el caso de las mezclas semidensas en caliente se nota que en ninguno de los dos tipos (MSC-25 y MSC-19) las granulometrías de las cuatro muestras no logran ajustarse a las franjas, lo que hace que su uso en estas no sea óptimo, pues un reajuste resulta siendo dispendioso.

○ **MEZCLAS GRUESAS**

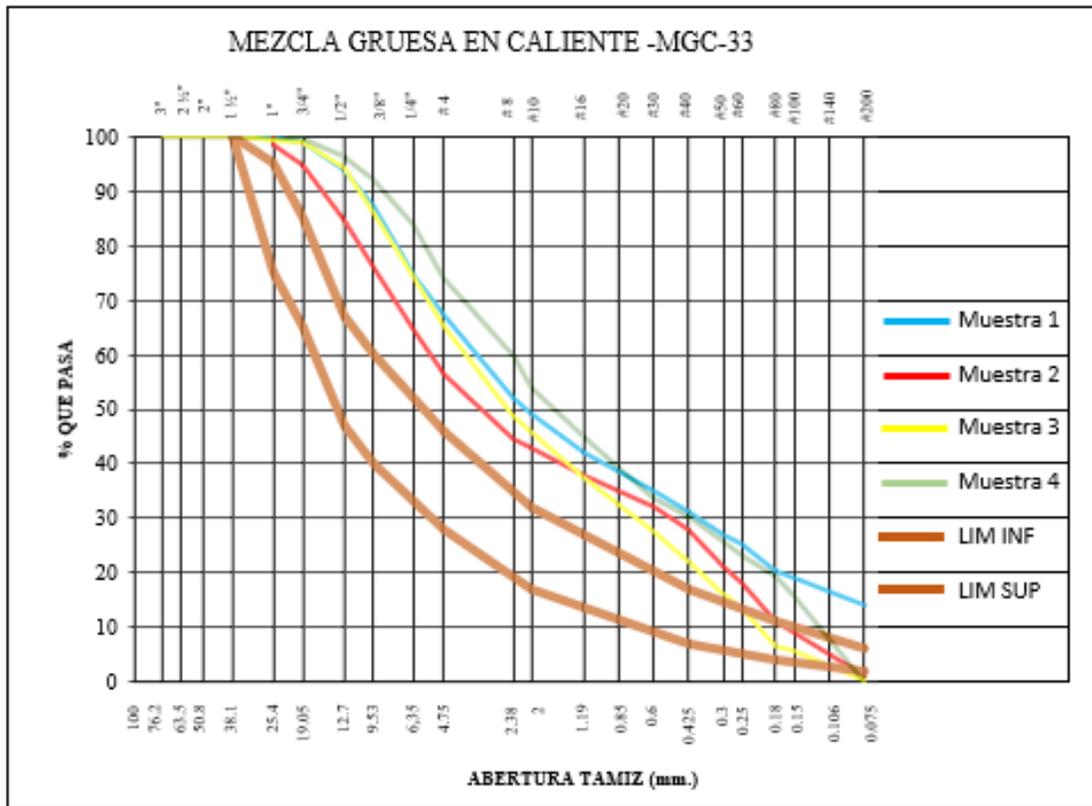


Figura 54 Curva Granulométrica MGC-33

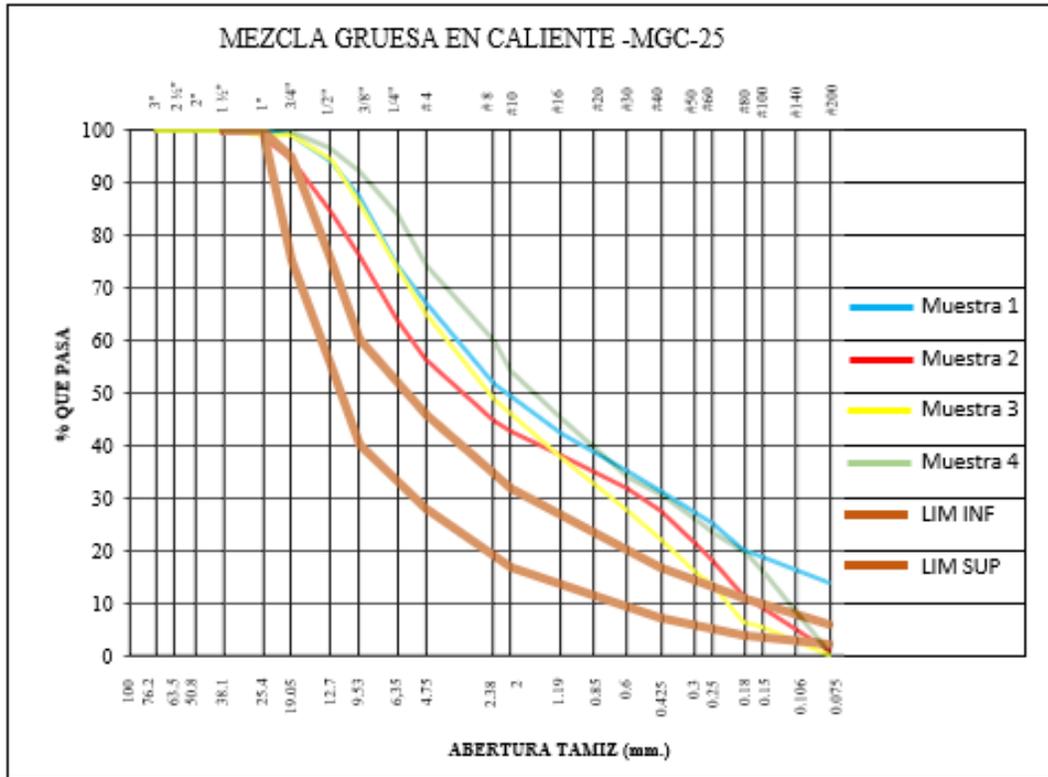


Figura 55 Gráfica 26 Curva Granulométrica MGC-25

Ninguna de las muestras cumple con las franjas granulométricas para mezclas gruesas en caliente, por lo que no es posible su uso en este tipo de mezclas, lo que significa también que en un principio, como agregado virgen, no fue usado ni para MGC-33 ni para MGC-25.

○ **MEZCLA DE ALTO MÓDULO**

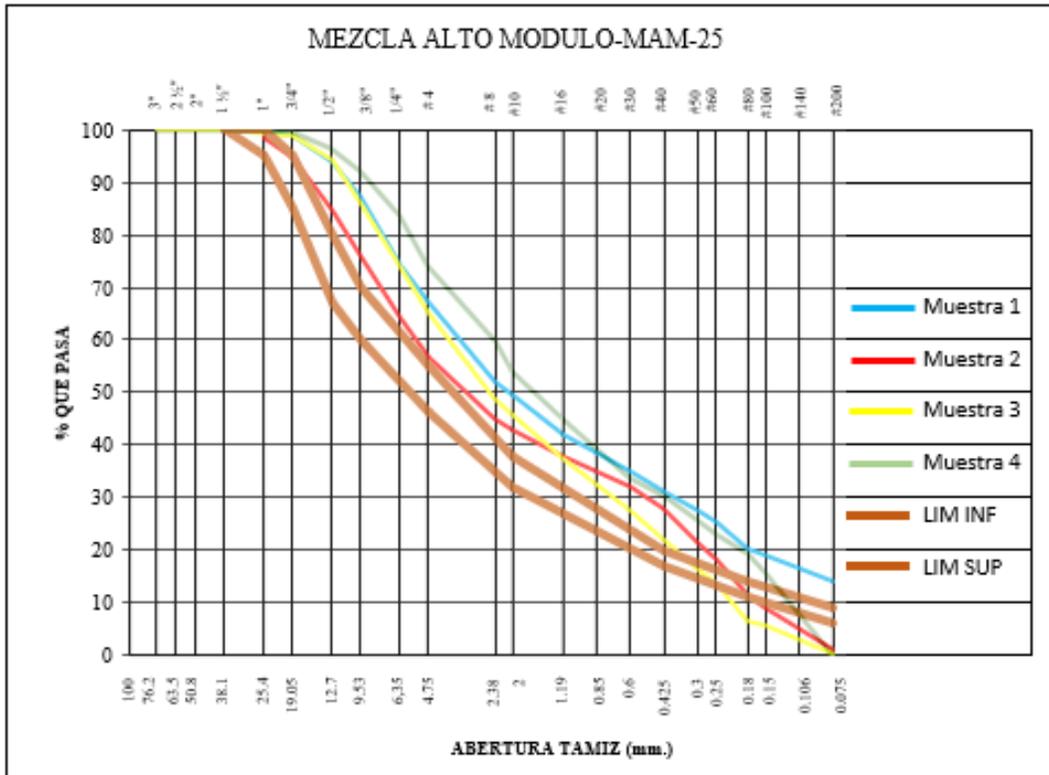


Figura 56 Curva Granulométrica MAM-25

En definitiva, las muestras analizadas no fueron usadas como agregado virgen en mezclas de alto módulo, ni tampoco podrán ser usadas para este tipo de mezclas.

- **ESPECIFICACIONES IDU**
 - **MEZCLAS DENSAS**

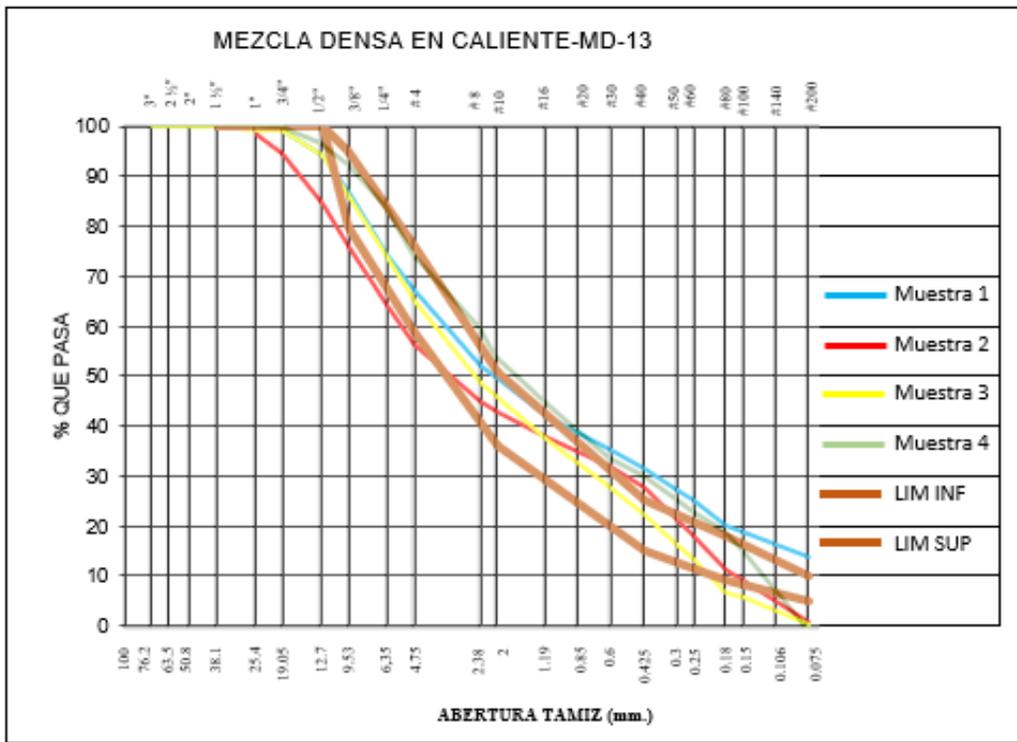


Figura 58 Curva Granulométrica MD-13

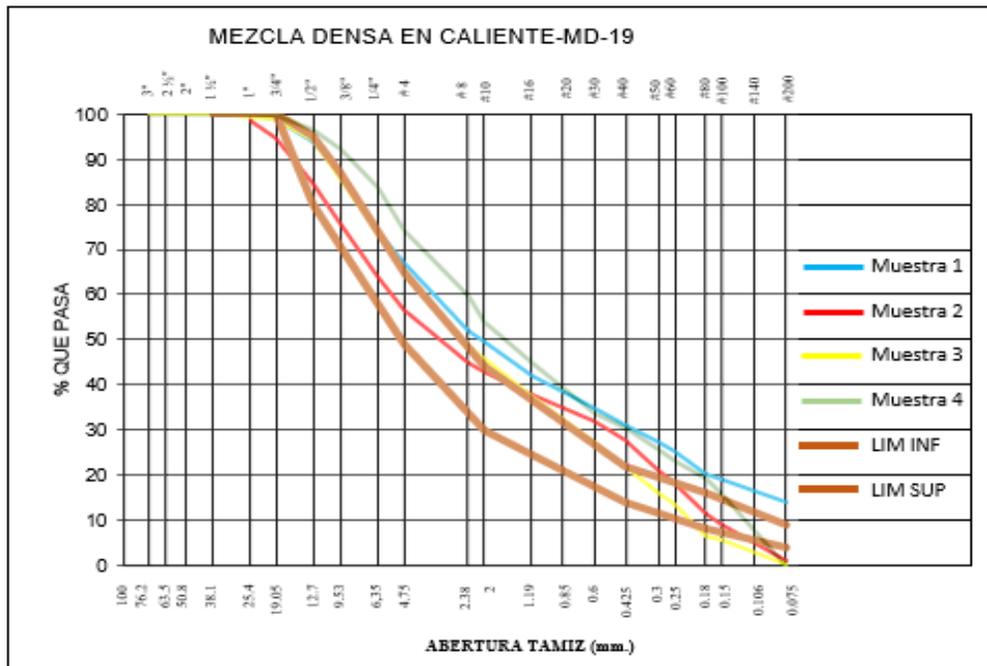


Figura 57 Curva Granulométrica MD-19

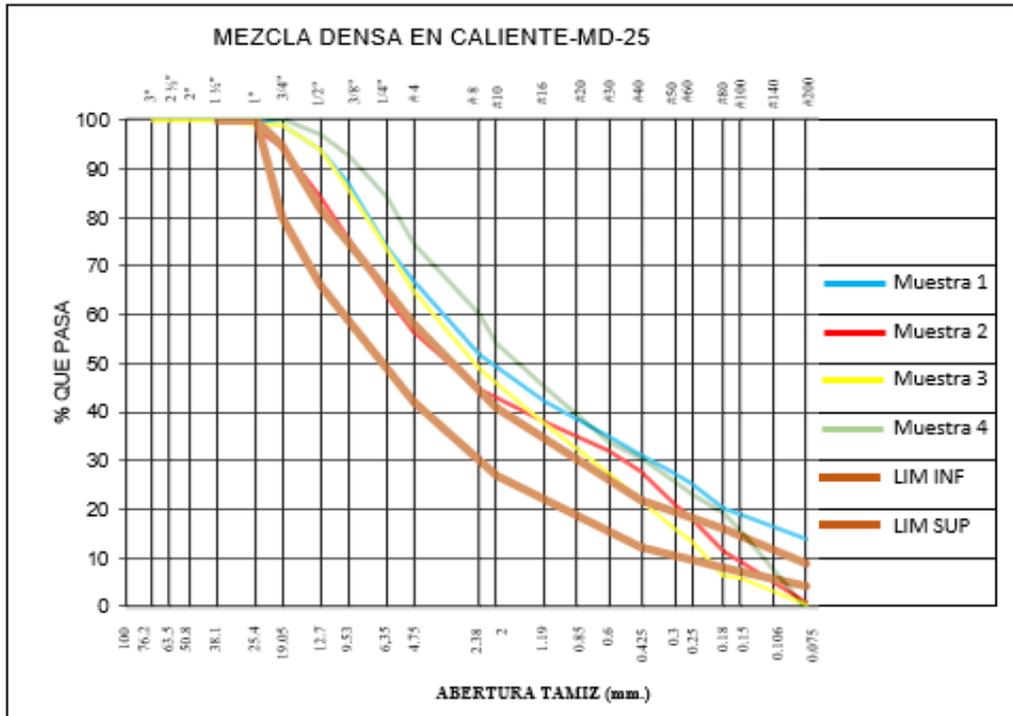


Figura 59 Curva Granulométrica MD-25

La franja a la que mejor se ajustan las muestras es a la MD-13, pues esta se acerca a su TMN. La muestra 3 es la que mejor se acomoda a la franja, pues los ajustes que deberían hacerse son mínimos, mientras que la muestra 2 ajusta mejor por la parte fina a partir del tamiz No. 4. La muestra 1 se ajusta más en la parte gruesa, hasta el tamiz No. 16, mientras que en la muestra 4, en la MD-13 está un poco por encima del comportamiento del límite superior, los cuales podría ser apto para ese tipo de mezclas.

Para las mezclas MD-19 y MD-25 no se nota un ajuste óptimo, por lo que puede inferirse que no fueron usadas en este tipo de mezclas o que en el proceso de molienda se generaron fracciones más finas.

○ **MEZCLAS SEMIDENSAS**

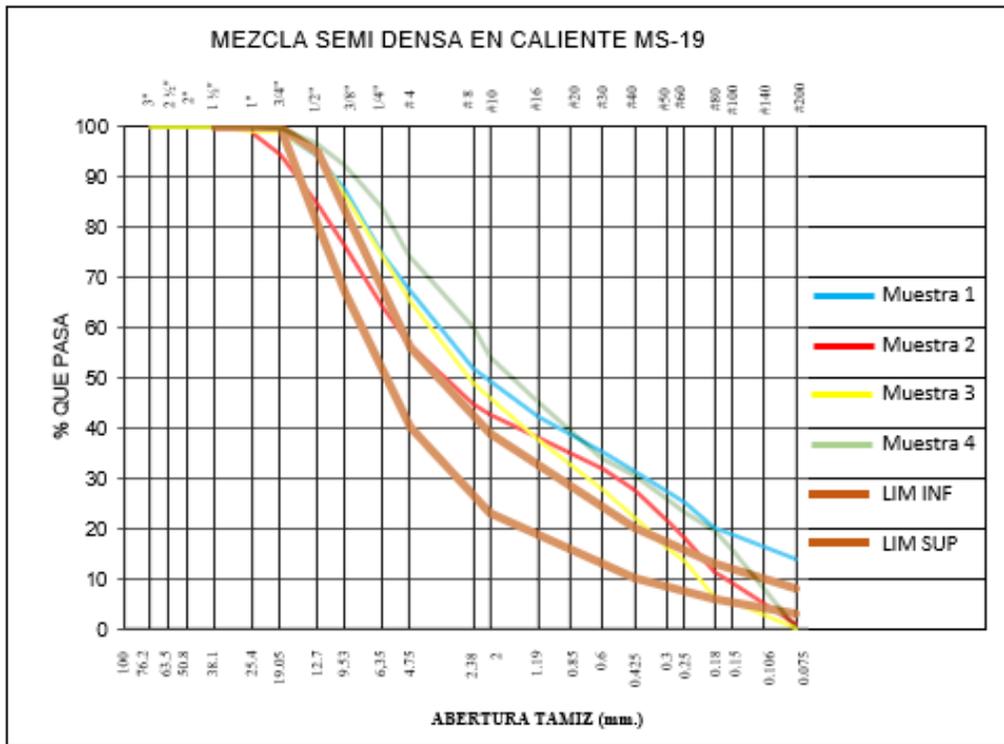


Figura 60 Curva Granulométrica MS-19

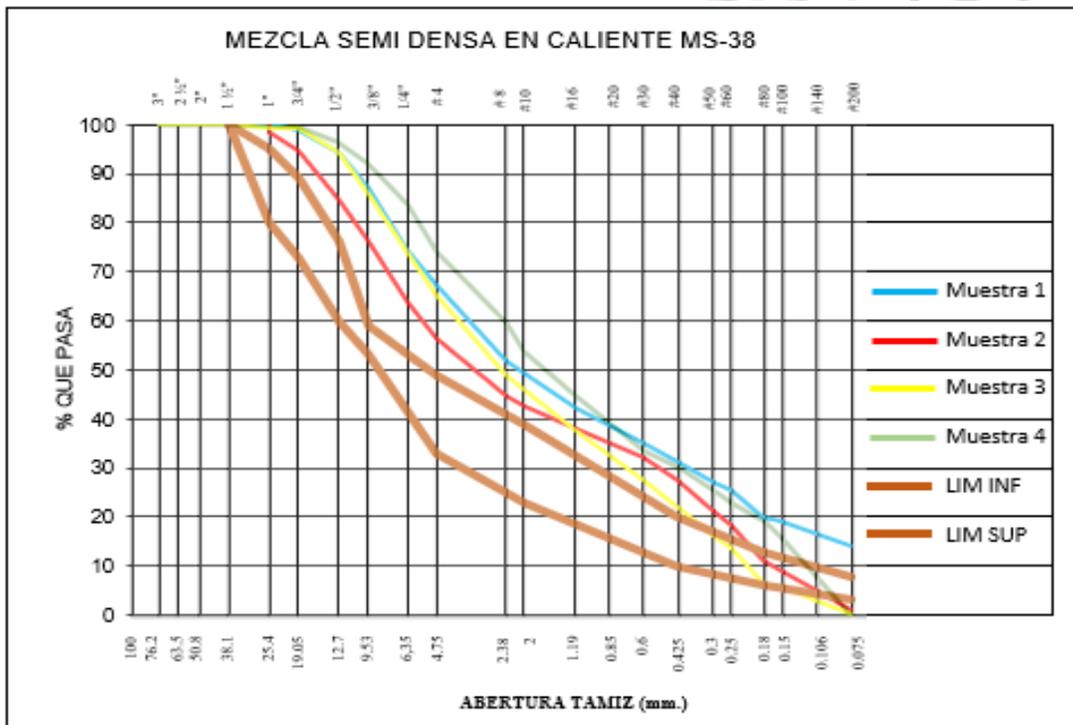


Figura 61 Curva Granulométrica MS-38

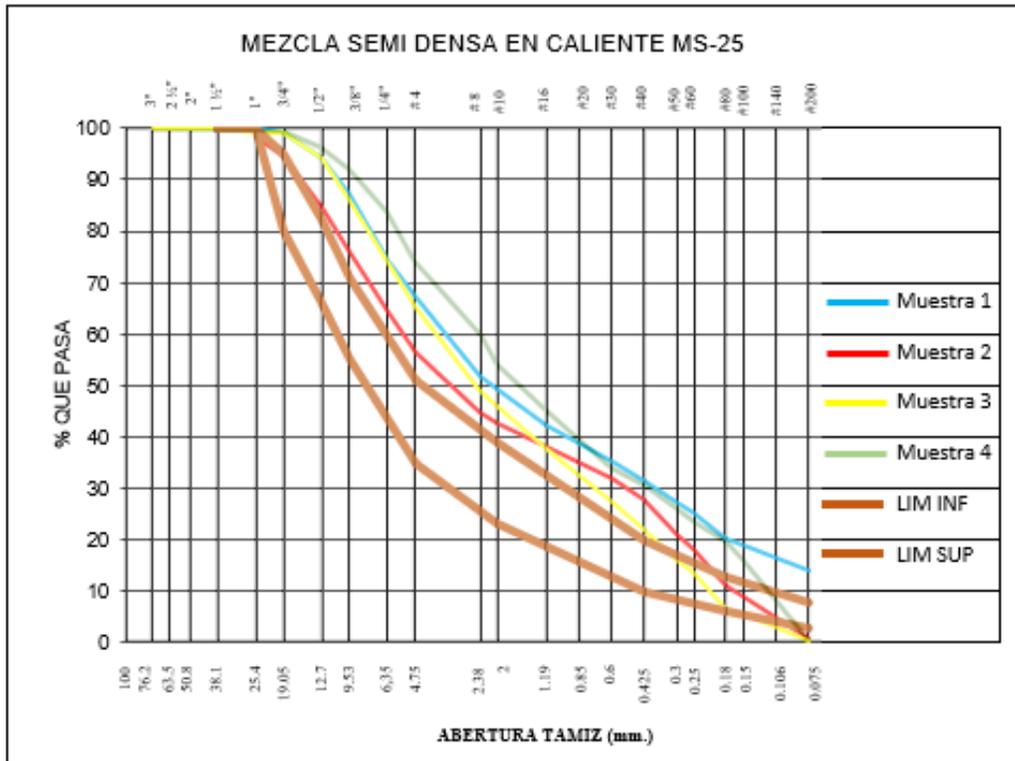


Figura 62 Curva Granulométrica MS-25

No se evidencia ajuste de las muestras en las franjas granulométricas de las mezclas semidensas propuestas por IDU, lo que indica que no fueron usadas como agregado virgen en estas.

○ **MEZCLAS GRUESAS**

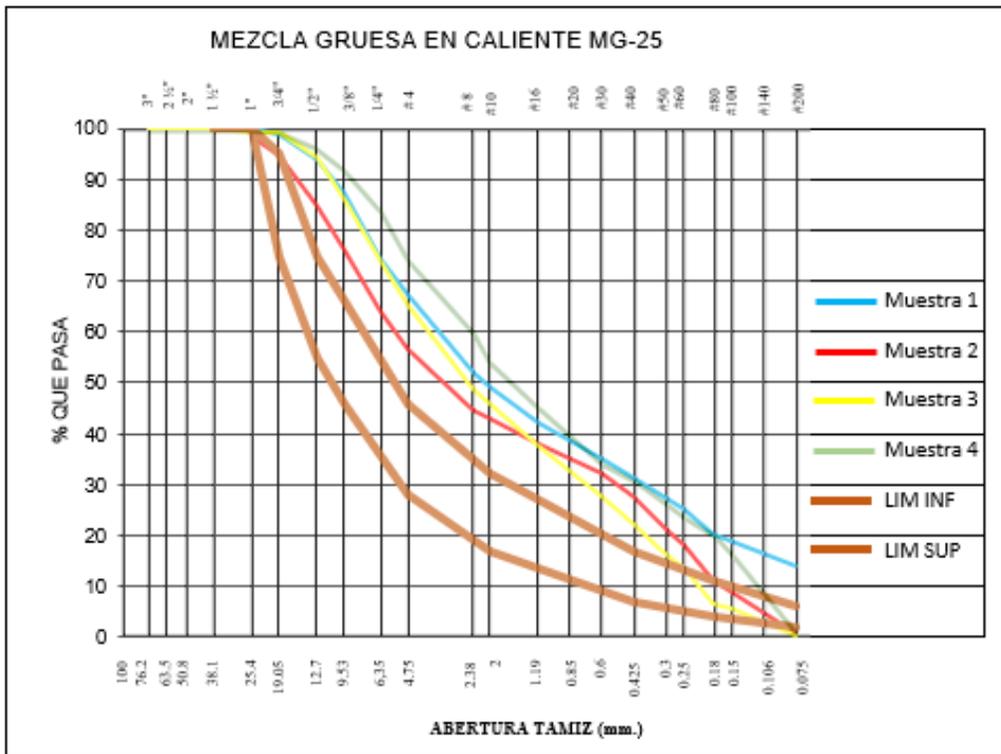


Figura 63 Curva Granulométrica MG-25

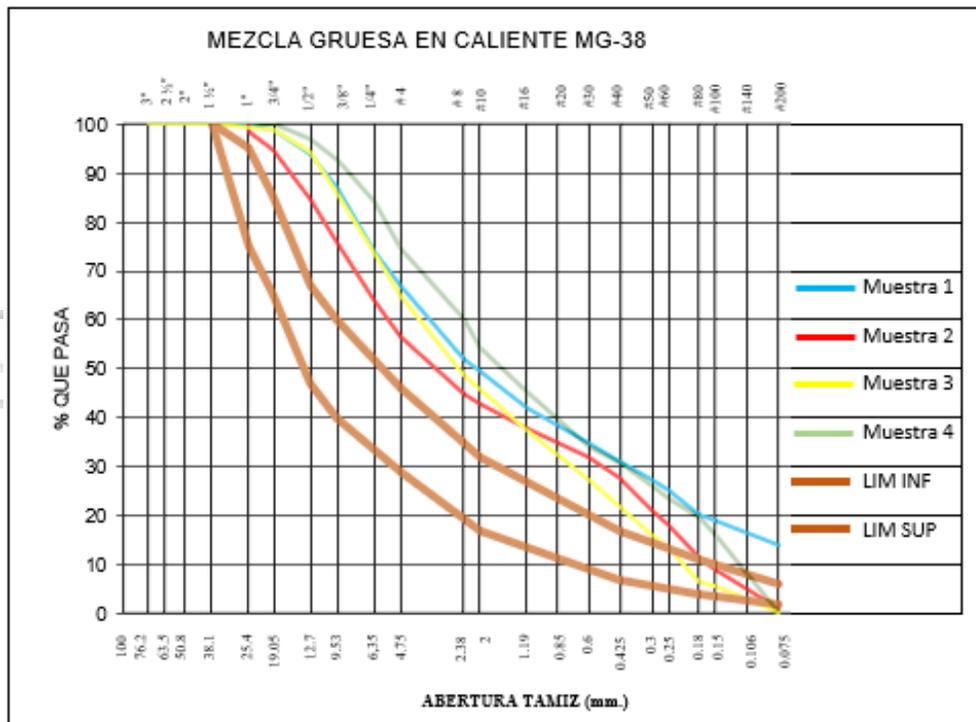


Figura 64 Curva Granulométrica MG-38

Todas las curvas salen de las franjas granulométricas de las mezclas gruesas en caliente, por lo tanto, no fueron usadas como agregado virgen en estas.

○ **MEZCLA DE ALTO MÓDULO**

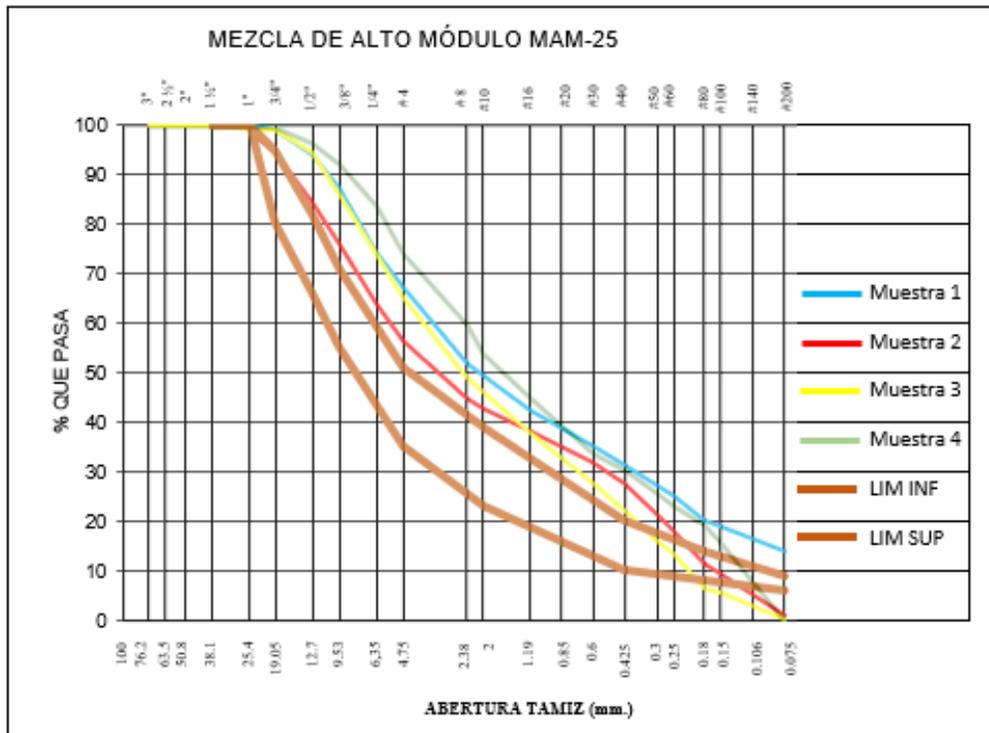


Figura 65 Curva Granulométrica MAM-25

Dadas las especificaciones de IDU para mezclas de alto módulo, puede verse que no es posible que el agregado mineral de las muestras haya sido usado en este tipo de mezcla.

7.2.2. MÁQUINA DE LOS ÁNGELES (INV E-218-13)

7.2.2.1. CONDICIONES DEL ENSAYO

- MUESTRA 3

Para este ensayo y siguiendo los lineamientos de la Norma INVIAS INV E-218-13 para agregado de tamaño menor a 1 1/2" que se tiene, se utilizó una carga abrasiva (6 esferas) de 5000 ± 25 g según las condiciones para el método D, el número de revoluciones especificado por la norma es 500 revoluciones las cuales se cumplen en aproximadamente 16 min, estas revoluciones fueron divididas primero en una etapa de 100 revoluciones y en otra de 400 para completar las 500 revoluciones.

- MUESTRA 4

Para este ensayo y siguiendo los lineamientos de la Norma INVIAS INV E-218-13 para agregado de tamaño menor a 1 1/2" que se tiene, se utilizó una carga abrasiva (6 esferas) de 5000 ± 25 g según las condiciones para el método D, el número de revoluciones especificado por la norma es 500 revoluciones las cuales se cumplen en aproximadamente 16 min, estas revoluciones fueron divididas primero en una etapa de 100 revoluciones y en otra de 400 para completar las 500 revoluciones.

Nota: No se tienen resultados de desgaste en Máquina de los Ángeles de las muestras 1 y 2.

7.2.2.2. RESULTADOS DEL ENSAYO

Tabla 35 Resultados del Ensayo de Máquina de Los Ángeles para las muestras de Agregado Mineral

		Muestra 3	Muestra 4	
Resultados	% Perdidas= $((A-B)/A)*100$	100 REVOLUCIONES	6,74%	5,25%
		500 REVOLUCIONES	34,37%	31,52%
Gradación		D	D	

- **ESPECIFICACIONES INVIAS**

Tabla 36 Especificaciones INVIAS Mezclas Asfálticas en Caliente de Gradación Continua - Máquina de Los Ángeles

	NT1 (% MÁX)		NT2 (% MÁX)		NT3 (% MÁX)	
	100 REV.	500 REV.	100 REV.	500 REV.	100 REV.	500 REV.
Capa de Rodadura	5%	25%	5%	25%	5%	25%
Capa Intermedia	7%	35%	7%	35%	7%	35%
Base	-	-	7%	35%	7%	35%

Dados los valores de la anterior tabla, las muestras 3 y 4 no cumplen para ningún nivel de tránsito para ser usada en capa de rodadura, sin embargo funcionan en las capas intermedia y de base teniendo en cuenta el resultado de 500 revoluciones.

- **ESPECIFICACIONES IDU**

- **MEZCLAS ASFÁLTICA EN CALIENTE DENSA, SEMIDENSA Y GRUESA**

Tabla 37 Especificaciones IDU Mezclas Asfálticas en Caliente Densa, Semidensa y Gruesa - Máquina de Los Ángeles

	T1 (% MÁX)	T2 (% MÁX)	T3 (% MÁX)
	500 REV.	500 REV.	500 REV.
Capas de Base e Intermedias	35%	35%	30%
Capas de Rodadura	30%	30%	25%

Con el valor obtenido para las muestras 3 y 4 a 500 revoluciones (34.37% y 31.52% respectivamente), se nota que el agregado mineral cumple para las capas de base e intermedias de los niveles de tránsito T1 y T2, para nivel de tránsito T3 y para capas de rodadura, siguiendo el criterio de máquina de los ángeles, las muestras del agregado mineral no son aptos.

○ **MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE DE ALTO MÓDULO**

Tabla 38 Especificaciones IDU Mezcla Asfálticas en Caliente de Alto Módulo - Máquina de Los Ángeles

T1 (% MÁX)	T2 (% MÁX)	T3 (% MÁX)
500 REV.	500 REV.	500 REV.
-	30%	25%

El valor obtenido para las muestras 3 y 4, ambas muestras no cumplen con lo requerido para que funcione con Mezclas Asfálticas en Caliente de Alto Módulo, de acuerdo con el ensayo de la Máquina de Los Ángeles.

○ **MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE DRENANTE**

Tabla 39 Especificaciones IDU Mezcla Asfálticas en Caliente Drenante - Máquina de Los Ángeles

T1 (% MÁX)	T2 (% MÁX)	T3 (% MÁX)
500 REV.	500 REV.	500 REV.
-	30%	25%

Dado que las especificaciones son las mismas para mezclas de alto módulo, ambas muestras del agregado mineral no cumplen como agregado para mezcla en caliente drenante, según las especificaciones IDU.

○ **MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE ABIERTA**

Tabla 40 Especificaciones IDU Mezcla Asfálticas en Caliente Abierta - Máquina de Los Ángeles

T1 (% MÁX)	T2 (% MÁX)	T3 (% MÁX)
500 REV.	500 REV.	500 REV.
35%	35%	30%

El agregado mineral de las muestras 3 y 4 cumplen con las especificaciones para las categorías T1 y T2.

- **MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE DISCONTINUA PARA CAPA DE RODADURA (MICROAGLOMERADO EN CALIENTE)**

Tabla 41 Especificaciones IDU Mezcla Asfálticas en Caliente Discontinua para Capa de Rodadura (Microaglomerado en Caliente) - Máquina de Los Ángeles

T1 (% MÁX)	T2 (% MÁX)	T3 (% MÁX)
500 REV.	500 REV.	500 REV.
-	30%	25%

Los agregados minerales de ambas muestras no cumplen con la especificación, dada las condiciones de durabilidad.

7.2.3. MICRO DEVAL (INV E-238-13)

7.2.3.1. CONDICIONES DEL ENSAYO

- MUESTRA 1:

Para este ensayo y siguiendo los lineamientos de la Norma INVIAS INV E-238-13 para el TMN (3/8 ") que se tiene se utilizó una carga abrasiva (esferas) de 5000 ± 5 g, se realizó inmersión del material en 2L de agua durante 1h a una temperatura de 21°C siendo la especificada en la norma de $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$, el número de revoluciones especificado por la norma es de 9500 ± 100 revoluciones las cuales se cumplen en 95 ± 1 minuto.

- MUESTRA 2:

Para este ensayo y siguiendo los lineamientos de la Norma INVIAS INV E-238-13 para el TMN (3/8") que se tiene se utilizó una carga abrasiva (esferas) de 5000 ± 5 g, se realizó inmersión del material en 2L de agua durante 1h a una temperatura de 21°C siendo la especificada en la norma de $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$, el número de revoluciones especificado por la norma es de 9500 ± 100 revoluciones las cuales se cumplen en 95 ± 1 minuto.

▪ MUESTRA 3:

Para este ensayo y siguiendo los lineamientos de la Norma INVIAS INV E-238-13 para el TMN (1/2 ") que se tiene se utilizó una carga abrasiva (esferas) de 5000 ± 5 g, se realizó inmersión del material en 2L de agua durante 1h a una temperatura de 21°C siendo la especificada en la norma de 20 ± 5°C, el número de revoluciones especificado por la norma es de 10500 ± 100 revoluciones las cuales se cumplen en 105 ± 1 minuto.

▪ MUESTRA 4:

Para este ensayo y siguiendo los lineamientos de la Norma INVIAS INV E-238-13 para el TMN (3/8 ") que se tiene se utilizó una carga abrasiva (esferas) de 5000 ± 5 g, se realizó inmersión del material en 2L de agua durante 1h a una temperatura de 21°C siendo la especificada en la norma de 20 ± 5°C, el número de revoluciones especificado por la norma es de 10500 ± 100 revoluciones las cuales se cumplen en 105 ± 1 minuto.

7.2.3.2. RESULTADOS DEL ENSAYO

Tabla 42 Resultados Ensayo Micro Deval Agregado Mineral

		CTU	UMV	IDU	PAVIMENTOS COLOMBIA
		Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
Resultados	% Perdidas=$((A-B)/A)*100$	17,40%	16,95%	14,23%	15,68%

• **ESPECIFICACIONES INVIAS**

Tabla 43 Especificaciones INVIAS Mezclas Asfálticas en Caliente de Gradación Continua – Micro Deval

	NT1 (%MÁX)	NT2 (%MÁX)	NT3 (%MÁX)
Capa de Rodadura	-	25%	20%
Capa Intermedia	-	30%	25%
Base	-	30%	25%

Los resultados muestran que el agregado de las cuatro muestras cumple para todos los niveles de tránsito en cualquier capa (rodadura, intermedia y base), para

desgaste por abrasión. Además, el resultado muestra un buen comportamiento debido a que está en un rango no muy próximo al valor límite.

- **ESPECIFICACIONES IDU**

- **MEZCLAS ASFÁLTICA EN CALIENTE DENSA, SEMIDENSA Y GRUESA**

Tabla 44 Especificaciones IDU Mezclas Asfálticas en Caliente Densa, Semidensa y Gruesa – Micro Deval

IDU MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE DENSA, SEMIDENSA Y GRUESA							
	T1 (% MÁX)	T2 (% MÁX)	T3 (% MÁX)	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
Capas de Base e Intermedias	30%	30%	25%	17,40%	16,95%	14,23%	15,68%
Capas de Rodadura	25%	25%	20%				

En este caso, el agregado mineral tanto de la muestra 1, 2, 3 y 4, cumplen con los valores límite dados por las especificaciones IDU para el ensayo de Micro Deval.

- **MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE DE ALTO MÓDULO**

Tabla 45 Especificaciones IDU Mezcla Asfálticas en Caliente de Alto Módulo – Micro Deval

IDU MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE DE ALTO MÓDULO						
T1 (% MÁX)	T2 (% MÁX)	T3 (% MÁX)	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
-	25%	20%	17,40%	16,95%	14,23%	15,68%

Para mezcla asfáltica en caliente de alto módulo todos los agregados cumplen con la especificación para este tipo de desgaste, no obstante, como se vio anteriormente, no cumple para mezcla asfáltica en caliente de alto módulo en el caso de máquina de los ángeles.

○ **MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE DRENANTE**

Tabla 46 Especificaciones IDU Mezcla Asfálticas en Caliente Drenante – Micro Deval

IDU MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE DRENANTE						
T1 (% MÁX)	T2 (% MÁX)	T3 (% MÁX)	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
-	25%	20%	17,40%	16,95%	14,23%	15,68%

El agregado de todas las muestras cumple con el valor máximo permitido para este tipo de mezcla.

○ **MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE ABIERTA**

Tabla 47 Especificaciones IDU Mezcla Asfálticas en Caliente Abierta - Micro Deval

IDU MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE ABIERTA						
T1 (% MÁX)	T2 (% MÁX)	T3 (% MÁX)	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
30%	30%	25%	17,40%	16,95%	14,23%	15,68%

○ **MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE DISCONTINUA PARA CAPA DE RODADURA (MICROAGLOMERADO EN CALIENTE)**

Tabla 48 Especificaciones IDU Mezcla Asfálticas en Caliente Discontinua para Capa de Rodadura (Microaglomerado en Caliente) – Micro Deval

IDU MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE DISCONTINUA PARA CAPA DE RODADURA (MICROAGLOMERADO EN CALIENTE)						
T1 (% MÁX)	T2 (% MÁX)	T3 (% MÁX)	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
-	25%	20%	17,40%	16,95%	14,23%	15,68%

En general las cuatro muestras cumplen con las especificaciones IDU para Micro Deval, sin embargo, para ser usadas en estas clases de mezclas deben cumplir también con las especificaciones para Máquina de Los Ángeles, por lo tanto, la calidad del agregado no es la adecuada.

7.3. PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS (INV E 227-13)

7.3.1.1. CONDICIONES DEL ENSAYO

Cada muestra de agregado mineral obtenida fue separada en las fracciones especificadas por la Norma, empezando en el Tamiz de 1". El ensayo se desarrolla por inspección visual de acuerdo con la siguiente ilustración mostrada en la norma de referencia:

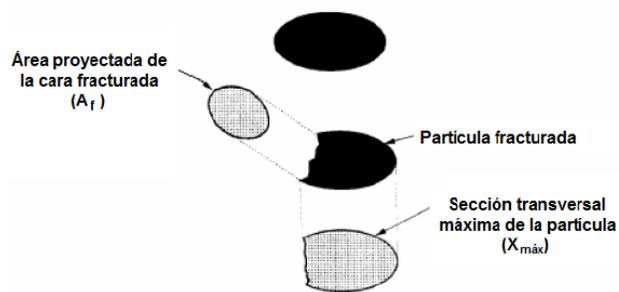


Figura 66 Esquema de una partícula fracturada con cara fracturada-Normas Ensayos de Laboratorio INVIAS

Las partículas clasificadas como fracturadas se determinaron como porcentaje en masa, como puede verse en la Tabla adjunta.

7.3.1.2. RESULTADOS DEL ENSAYO

Tabla 49 Resultados Porcentaje de Caras Fracturadas Agregado Mineral

	Muestra 1			Muestra 2			Muestra 3			Muestra 4		
PASA TAMIZ	1"	3/4"	1/2"	1"	3/4"	1/2"	1"	3/4"	1/2"	1"	3/4"	1/2"
RETIENE TAMIZ	3/4"	1/2"	3/8"	3/4"	1/2"	3/8"	3/4"	1/2"	3/8"	3/4"	1/2"	3/8"
% PARTÍCULAS CON CARAS FRACTURADAS (GEOMETRÍA DE LAS PARTÍCULAS AGREGADO GRUESO)	100%	100%	100%	100%	80%	100%	100%	60%	100%	-	94%	98%

- **ESPECIFICACIONES INVIAS**

Tabla 50 Mezclas Asfálticas en Caliente de Gradación Continua Especificaciones INVIAS para Caras Fracturadas, agregado grueso (Para una cara)

	MEZCLA ASFÁLTICAS EN CALIENTE DE GRADACIÓN CONTINUA (% MÍN)		
	NT-1	NT-2	NT-3
Capa de Rodadura	75%	75%	85%
Capa Intermedia	60%	75%	75%
Capa de Base	-	60%	60%

Observando las fracciones puede verse que en general todas están cumpliendo, a excepción de la fracción pasa ¾” – retiene ½” de la muestra 3. Para la muestra 4, como la fracción al momento de realizar la extracción es más pequeña, entonces no hubo ninguna partícula que retuviera sobre el tamiz ¾”, así que solo se trabajó el tamiz que retiene ½” y #4. Estos resultados sugieren que, en principio, si el agregado mineral fue usado en una mezcla asfáltica en caliente de gradación continua, este cumplía con los criterios propuestos por el INVIAS para cualquiera que sea el nivel de tránsito.

- **ESPECIFICACIONES IDU**

- **MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE DENSA, SEMIDENSA Y GRUESA**

Tabla 51 Especificaciones IDU Mezclas Asfálticas en Caliente Densa, Semidensa y Gruesa – Caras Fracturadas

MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE DENSA, SEMIDENSA Y GRUESA (% MÍN)			
	T1	T2	T3
1 Cara	75%	75%	90%

- **MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE DE ALTO MÓDULO**

Tabla 52 Especificaciones IDU Mezcla Asfálticas en Caliente de Alto Módulo – Caras Fracturadas

MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE DE ALTO MÓDULO (% MÍN)			
	T1	T2	T3
1 Cara	-	75%	90%

- **MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE DRENANTE**

Tabla 53 Especificaciones IDU Mezclas Asfáltica en Caliente Drenante– Caras Fracturadas

MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE DRENANTE (% MÍN)			
	T1	T2	T3
1 Cara	-	75%	90%

○ **MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE ABIERTA**

Tabla 54 Especificaciones IDU Mezclas Asfáltica en Caliente Abierta– Caras Fracturadas

MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE ABIERTA (% MÍN)			
	T1	T2	T3
1 Cara	75%	75%	90%

○ **MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE DISCONTINUA PARA CAPA DE RODADURA (MICROAGLOMERADO EN CALIENTE)**

Tabla 55 Especificaciones IDU Mezclas Asfáltica Discontinua para Capa de Rodadura (Microaglomerado en Caliente)– Caras Fracturadas

MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE DISCONTINUA PARA CAPA DE RODADURA (MICROAGLOMERADO EN CALIENTE) (% MÍN)			
	T1	T2	T3
1 Cara	-	75%	90%

De manera general, todas las fracciones cumplen con los requerimientos para todos los tipos de mezclas especificados por IDU, en todos los niveles de tránsito para una y dos caras, por lo que el agregado pudo haber sido usado en cualquiera de las mezclas, en lo que respecta al criterio de caras fracturadas.

7.3.2. ÍNDICES DE APLANAMIENTO Y DE ALARGAMIENTO DE LOS AGREGADOS (INV E 230-13)

7.3.2.1. CONDICIONES DEL ENSAYO

Para cada muestra se separaron las fracciones especificadas en la Norma INV E 230-13, empezando en el Tamiz de 1”, para el caso del Índice de Aplanamiento se utilizó un calibrador con ranuras separadas $3/5[(d_i+D_i)/2]$, las partículas que pasan el tamiz, son consideradas partículas planas.

Para el caso del Índice de Alargamiento se hizo uso de un calibrador de barras verticales separadas a distancias de $9/5[(d_i+D_i)/2]$, se consideran partículas alargadas aquellas que quedan retenidas entre las barras.

7.3.2.2. RESULTADOS DEL ENSAYO

7.3.2.2.1. ÍNDICE DE APLANAMIENTO

Tabla 56 Tabla Resumen Índice de Aplanamiento

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
IA = ÍNDICE DE APLANAMIENTO GLOBAL	23.82%	24.51%	30.17%

7.3.2.2.2. ÍNDICE DE ALARGAMIENTO

Tabla 57 Tabla Resumen Índice de Alargamiento

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
IL = ÍNDICE DE ALARGAMIENTO GLOBAL	14.44%	9.38%	13.29%

- **ESPECIFICACIONES INVIAS**

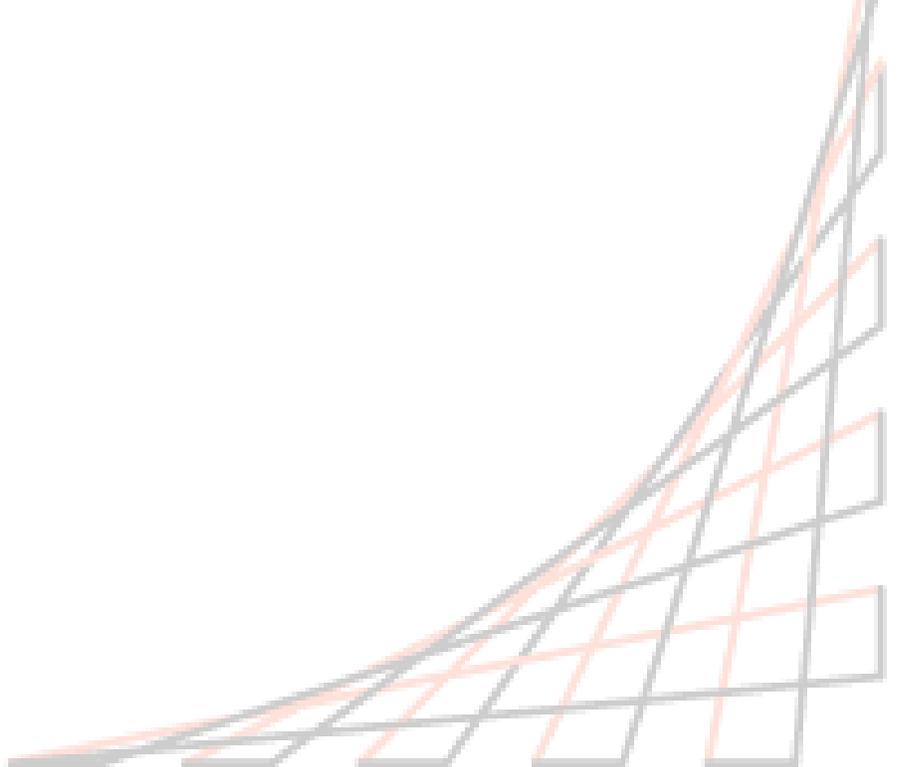
En la Tabla 450-3 se establece un máximo para Índice de Aplanamiento e Índice de Alargamiento de 10% para los niveles de tránsito NT1, NT2 y NT3; puede verse que a excepción de la Muestra 2 en el Índice de Alargamiento, ninguna muestra está cumpliendo con este valor máximo para mezcla asfáltica en caliente de gradación continua, y, de hecho, con ninguna de las mezclas que se presentan en INVIAS.

El no cumplimiento de este valor puede deberse al efecto del tránsito y al desgaste natural, no obstante, los resultados están bastante alejados del valor permitido, lo

que indica la posibilidad de que desde un inicio el agregado no cumpliera, incidiendo directamente en la modificación de la granulometría por rotura de las partículas.

- **ESPECIFICACIONES IDU**

Para todos los tipos de mezclas vistos con anterioridad, IDU especifica un valor máximo para Índice de Aplanamiento e Índice de Alargamiento de 10%, al igual que INVIAS, por lo tanto, ninguna de las muestras cumple con el requerimiento (a excepción de la muestra 2), como se vio en las especificaciones INVIAS.



ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO

VIGILADA MINEDUCACIÓN

8. CONCLUSIONES

En la actualidad colombiana es de vital importancia que se logre la estructuración de un documento en el que se especifique y reglamente el uso del RAP, dado que por esta causa los acopios no se preservan de manera adecuada, además de que se generan grandes volúmenes de material que el cliente no aprovecha, pues la reglamentación no es concisa en su uso como tal.

Así mismo, se hace necesario que las entidades que acopian sigan más las recomendaciones de la literatura acerca del almacenamiento del RAP, ya que se encuentran algunas deficiencias en el manejo que pueden traducirse en un mal comportamiento del material, esto dado en parte, al acopio en ocasiones inadecuado o poco óptimo.

En cuanto al uso que se le puede dar al RAP según las especificaciones de los diferentes ensayos, se encontró, por el lado del ajuste a las franjas granulométricas, que para el cumplimiento de las especificaciones INVIAS, el RAP de las cuatro muestras presenta mejor ajuste para su uso en bases que en sub-bases. Para las especificaciones dadas por IDU, se nota un mejor ajuste también para bases. Se observa que las curvas se ajustan más a las especificaciones IDU para bases que a las del INVIAS.

Por otro lado, en lo que a desgaste se refiere, el RAP cumple para su uso en bases y sub-bases en la mayoría de los casos para las especificaciones INVIAS, tendría que examinarse un poco más a fondo para ampliar su uso en vías de alto tráfico en el caso del RAP para bases de clase A en caso del RAP de la primera entidad si su uso se da en carreteras nacionales. En el caso de IDU, el RAP cumple con los criterios de desgaste para todas las categorías de base y sub-base que rigen en Bogotá, exceptuando el uso de RAP de la entidad 1 en base granular tipo A. Se cumple con desgaste tanto en el ensayo de Máquina de los Ángeles como en el de Micro Deval.

Pasando a las características del asfalto recuperado de las muestras, es posible ratificar la principal característica de las pilas de acopio: su naturaleza multifuente; pudiéndose evidenciar esto en la confrontación de los resultados arrojados por las muestras tomadas en el periodo 2016-2 y 2019-2, pues valores como punto de ablandamiento y porcentaje de asfalto distan notoriamente en todos los periodos.

Las muestras de pilas multifuente presentan mayor variabilidad en el punto de ablandamiento a causa del tiempo que estuvieron en servicio antes de la obtención, el proceso que dio origen al RAP en el caso del proveniente de residuos de plantas y en cierta medida por el envejecimiento en el momento de la fabricación e la mezcla original.

Se nota un asfalto envejecido que podría recuperar algunas características con la adición de rejuvenecedores, en tanto que la muestra que menos cantidad de rejuvenecedor necesita es la muestra 2, en la cual se evidenció, además, que las muestras tomadas en los diferentes periodos pudieron pertenecer a la misma fuente, pues resultados como porcentaje de asfalto y viscosidad difieren poco en los dos periodos.

Por su parte, de acuerdo con los resultados vistos sobre el agregado mineral extraído, y analizando en qué tipo de mezclas asfálticas en caliente de gradación continua el agregado cumplía con las especificaciones; se concluye que fue utilizado en principio para mezclas densas en caliente dado el ajuste de las curvas granulométricas a las franjas dadas por las especificaciones IDU e INVIAS, lo que es consecuente con la realidad colombiana, en donde las mezclas densas en caliente son típicamente elegidas.

En cuanto a especificaciones por desgaste del agregado mineral en máquina de los ángeles, para INVIAS el agregado cumple para uso en capa de base e intermedia, mientras que para especificaciones IDU cumple también para capas de base e intermedia y además para mezcla asfáltica en caliente abierta, con excepción del nivel de tránsito T3 en todas las mencionadas.

Para desgaste por Micro Deval, las muestras cumplen en todas las mezclas en caliente de gradación continua, tanto para especificaciones INVIAS como para IDU; sin embargo, dados los resultados por desgaste en máquina de los ángeles, se restringe el uso del agregado mineral, como se vio anteriormente.

En lo que se refiere a caras fracturadas se cumple con los valores permitidos para cualquier tipo de mezcla en caliente de gradación continua tanto para especificaciones INVIAS como para IDU, sin embargo, bajo el criterio de índice de aplanamiento e índice de alargamiento, no se cumple con el valor requerido para ninguna de las especificaciones, siendo muy distantes los valores obtenidos, por lo que puede concluirse que no se cumplió en principio con este criterio.

La realización de los ensayos practicados a las cuatro muestras ha permitido entender a fondo el comportamiento del RAP, del asfalto recuperado y del agregado mineral, que las cuatro entidades bogotanas proporcionaron, lo que una idea aproximada del contexto en el que este material se encuentra enmarcado en la ciudad, además de poner a analizar las buenas prácticas y las falencias que al día de hoy se tienen con respecto al manejo de este material. Puede notarse el interés creciente de las entidades por establecer lineamientos que permitan el uso adecuado y más extenso del RAP, dado el valor cuantificable que acarrea en aspectos ambientales, económicos y sociales, por lo cual se espera que documentos como este impulsen la investigación aún más profunda y logren dar conciencia de los múltiples beneficios a que da lugar el reciclaje de pavimentos asfálticos.

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO

VIGILADA MINEDUCACIÓN

9. AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestros más sinceros agradecimientos a las cuatro entidades que nos colaboraron de manera muy atenta en la obtención de muestras y datos para el desarrollo del presente documento, pues constituyeron la base de este.

Así mismo, agradecemos extensamente a la Ingeniera Sandra Ximena Campagnoli Martínez, directora del trabajo de investigación, por su dedicada orientación en la realización de los diferentes ensayos, estructuración del documento, y en general por transmitirnos su valioso conocimiento, pilar de la investigación y los resultados que aquí se consignan.

A todo el equipo del laboratorio del Centro de Estudios Geotécnicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito agradecemos inmensamente por su entera ayuda, disposición y orientación en todos los ensayos mostrados. De manera especial agradecemos al laboratorista Marco Contreras porque de su mano fue posible el desarrollo exitoso de cada uno de los ensayos, y a su equipo: Osmar Tolosa (Laboratorista) e Ingrid Fajardo (Secretaria), igualmente agradecemos al Ingeniero Leonardo Tejedor y a la Ingeniera Carolina Bojacá por su colaboración y orientación.

Agradecemos también al Semillero de Investigación en Pavimentos, por la colaboración de algunos de sus miembros en la preparación y realización de ensayos.

Por último, agradecemos a nuestra alma mater la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito por brindarnos la oportunidad de desarrollar trabajos de investigación como este y permitir el mismo en sus instalaciones, por ser la institución que nos dio el conocimiento de nuestra profesión.

Atentamente,

Cristian Alzate R.

Cristian David Alzate Ruiz

Danna Vanesa Rojas Avila

Danna Vanesa Rojas Avila

Juan Sebastián Hernández Sánchez

Joan Sebastián Hernández Sánchez

10. BIBLIOGRAFÍA

- Al-Qadi, I. L., Elseifi, M., & Carpenter, S. H. (2007). Reclaimed asphalt pavement - A literature review, (FHWA-ICT-07-001), 23. <https://doi.org/http://hdl.handle.net/2142/46007>
- Austrroads. (2013). AUSTROADS TECHNICAL REPORT: Maximising the Re-use of Reclaimed Asphalt Pavement: Binder Blend Characterisation.
- Austrroads. (2015). Maximising the Re-use of Reclaimed Asphalt Pavement Outcomes of Year Two : RAP Mix Design.
- Copeland, a. (2011). Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice. Report No. FHWA-HRT-11-021, (FHWA), McLean, Virginia. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.119>
- Document, A. R. (2014). Towards Sustainable Pavement Systems :, (February).
- Illinois Department of Transportation. (2014). Reclaimed Asphalt Pavement Specification (RAP).
- TRANSPORTATION RESEARCH BOARD . (12 de enero de 2014). Application of Reclaimed Asphalt Pavement and Recycled Asphalt Shingles in Hot-Mix Asphalt . Washington, D.C., Estados Unidos: TBR.
- Pradyumna, T. A., Mittal, A., & Jain, P. K. (2013). Characterization of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) for Use in Bituminous Road Construction. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 104, 1149–1157. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.11.211>
- West, R. C. (2010). Reclaimed asphalt pavement management: Best Practices. National Center for Asphalt Technology at Auburn University, 31.
- INVIAS. (2013). Especificaciones técnicas . Colombia.
- ASEFMA;CEDEX;IECA. (2011). Reciclaje de pavimentos asfálticos. España.
- Botasso, H., Cuattrocchio, A., Rebollo, O., & C., J. S. (s.f.). Reciclado de pavimentos asfálticos en frío. Una forma de utilizar totalmente el RAP para el mantenimiento y rehabilitación de la red caminera. Buenos Aires, Argentina.

- Federal Highway Administration, F. (1997). Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments. Chapter 14 Cold Mix Design Asphalt Recycling (Materials and Mix Design).
- Fujie Zhou, P. P., Gautam Das, M., Tom Scullion, P., & Sheng Hu, P. P. (february de 2010). RAP STOCKPILE MANAGEMENT AND PROCESSING IN TEXAS: STATE OF THE PRACTICE AND PROPOSED GUIDELINES . Texas, united states.
- Gabriele Tebaldi, E. D. (octubre de 2012). Classification of recycled asphalt (RA) material. France.
- Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2015). *Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos en Vías con Medios y Altos Volúmenes de Tránsito*.
- NAPA. (2017). Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage. United States.
- NCHRP (National Cooperative Highway Research Program). (2001). *Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in Superpave Mix Design Method: Technician's Manual*. Washington D.C. : Transportation Research Board.
- Randy C. West, P. P. (Diciembre de 2015). Best Practices for RAP and RAS Managemen. Lanham, Maryland : NAPA (National Asphalt Pavement Association).
- Standard Specifications Illinois. (2014). Reclaimed Asphalt Pavement and Reclaimed Asphalt Shingles. Illinois.
- T.Anil Pradyumna, A. M. (2013). Characterization of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) for Use in Bituminous Road Construction . India: Elsevier LTD.
- TRANSPORTATION RESEARCH BOARD . (12 de enero de 2014). Application of Reclaimed Asphalt Pavement and Recycled Asphalt Shingles in Hot-Mix Asphalt . Washington, D.C., Estados Unidos: TBR.
- Wirtgen Group. (2004). Wirtgen Manual de Reciclado en Frío. Windhagen , Alemania.