



**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL**  
**CON ENFASIS EN INFRAESTRUCTURA VIAL**

**TRABAJO DE GRADO**

**INFLUENCIA DE LA GRANULOMETRIA Y LA DOSIFICACIÓN EN EL  
FRESADO ESTABILIZADO CON EMULSION ASFÁLTICA**

**Presentado por:**

**JUAN PABLO BURBANO CARVAJAL**  
**DANIEL ALBERTO ZULUAGA ASTUDILLO**

**Director**

**I.C. MSc. PhD. Fredy Alberto Reyes Lizcano**

**Bogotá D.C**

**Diciembre de 2011**



**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL**  
**CON ENFASIS EN INFRAESTRUCTURA VIAL**

**INFLUENCIA DE LA GRANULOMETRIA Y LA DOSIFICACIÓN EN EL  
FRESADO ESTABILIZADO CON EMULSION ASFÁLTICA**

**Trabajo para optar al título de  
Máster en Ingeniería Civil**

**Director**

**I.C. MSc. PhD. Fredy Alberto Reyes Lizcano**

**Bogotá D.C.**

**Diciembre de 2011**

Carta de Aprobación (Obligatoria)

## **APROBACIÓN**

El Trabajo de grado con título “***Influencia de la Granulometría y la Dosificación en el Fresado Estabilizado con Emulsión Asfáltica.***”, desarrollado por los estudiantes JUAN PABLO BURBANO CARVAJAL y DANIEL ALBERTO ZULUAGA ASTUDILLO, en cumplimiento de uno de los requisitos depuestos por la Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería civil, para optar el Título de Magister en ingeniería Civil, fue aprobado por:

**Ing. MSc. PhD. Fredy Alberto Reyes Lizcano**  
Director de trabajo de grado



**Ing. Msc. PhD. Hugo Alexander Rondón Quintana**  
Jurado 1



**Ing. Msc. Wilmar Darío Fernández Gómez**  
Jurado 2

*Influencia de la Granulometría y la Dosificación en el Fresado Estabilizado con Emulsión Asfáltica*

*Juan Pablo Burbano Carvajal*

*Daniel Alberto Zuluaga Astudillo*

La Pontificia Universidad Javeriana, no es responsable por los conceptos emitidos por los autores - investigadores del presente trabajo, por lo cual son responsabilidad absoluta de sus autores y no comprometen la idoneidad de la institución ni de sus valores.

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres José Ramiro, Consuelo y a mis hermanos José Manuel y Andrés Felipe, quienes gracias a su apoyo y ánimo lograron ayudarme para terminar este nuevo triunfo en mi vida.

A Juan Diego, quién haré los esfuerzos tanto o más grandes como éste.

## AGRADECIMIENTOS

Doy gracias a Dios y a la Virgen María por llenar de bendiciones este camino que está por terminar y los que se abren de ahora en adelante. A mi familia por su apoyo incondicional; quienes me inculcaron el deseo de querer aprender cada día más.

A Dios por las oportunidades recibidas y a todos aquellos a quienes les quite tiempo por dedicarlo en mis obligaciones académicas (padres, esposa e hijos, hermanos)

## **RESUMEN**

El proyecto consistió en la evaluación de la respuesta mecánica de probetas elaboradas con tres muestras diferentes de material obtenido en el proceso de fresado de carpetas asfálticas (R.A.P.). Dichas muestras presentaron granulometrías diferentes, y fueron objeto de estabilización con emulsión asfáltica catiónica de rompimiento lento en dosificaciones de 60, 75, 90 y 105 litros por metro cúbico. Las probetas fueron elaboradas con procesos de compactación estática y dinámica, y fueron evaluadas mediante ensayos de densidad, estabilidad - flujo, inmersión compresión y módulos dinámicos. Con los resultados obtenidos se hizo una comparación con las fuentes consultadas y una valoración de acuerdo a los parámetros de la normativa colombiana (INVIAS 2007). Finalmente se estableció que el fresado estabilizado con las dosificaciones usadas y con las granulometrías presentadas, no resultó ser un material apto para colocación en estructuras de pavimentos cuyos tráfico fueran medios y altos, y que solamente sería competente en tráfico bajos, siempre y cuando se sigan algunas recomendaciones constructivas o se utilice como material granular de relleno.

## **PALABRAS CLAVE:**

R.A.P (Reclaimed Asphalt Pavement), Fresado, Emulsión Asfáltica, Compactación Estática, Compactación Dinámica, Ensayo De Estabilidad Flujo, Ensayo De Inmersión Compresión, Ensayo De Módulos Dinámicos.

**ABSTRACT**

The project consisted of evaluating the mechanical response of specimens made with three different samples of material obtained in the process of milling asphalt (R.A.P). These samples had different particle sizes, and were the subject of cationic asphalt emulsion stabilization breakaway slow in dosages of 60, 75, 90 and 105 liters per cubic meter. The specimens were prepared with compaction processes statics and dynamics, and were evaluated by testing the density, flow stability, immersion compression and dynamic modules. With the result a comparison was made with the sources and an assessment according to the parameters of the regulations Colombia (INVIAS 2007). Finally it was established that milling with stabilized dosages used and the particle sizes presented, not to be a material suitable for placement in pavement structures which were medium and high traffic, and traffic would only be competent in low, provided you follow constructive recommendations or granular material used as filler.

**KEY WORDS:**

R.A.P, Grinding-Milling, Asphaltic Emulsion, Static Compaction, Dynamic Compaction, Stability - Flow Test, Immersion - Compression Test; Dynamic Modulus test.



## **TABLA DE CONTENIDO**

|  |    |
|--|----|
| 1. INTRODUCCION .....                                  | 1  |
| 1.1 Antecedentes .....                                 | 1  |
| 1.2 Problema .....                                     | 4  |
| 1.3 Objetivos .....                                    | 5  |
| 1.3.1 Objetivo General .....                           | 5  |
| 1.3.2 Objetivos Específicos .....                      | 5  |
| 1.4 Justificación .....                                | 6  |
| 2. MARCO CONCEPTUAL .....                              | 7  |
| 2.1 Fresado .....                                      | 7  |
| 2.2 Emulsión asfáltica .....                           | 7  |
| 2.2.1 Emulsiones catiónicas de rompimiento lento ..... | 8  |
| 2.2.1.1 Emulsión 60 - 40 .....                         | 10 |
| 2.2.1.2 Estabilización .....                           | 10 |
| 2.2.2 Reutilización del fresado .....                  | 10 |
| 2.2.2.1 Plantas de procesamiento de R.A.P .....        | 10 |
| 2.2.3 Compactador giratorio .....                      | 10 |
| 2.2.4 Estabilidad – flujo .....                        | 11 |
| 2.2.5 Inmersión - compresión .....                     | 12 |
| 2.2.6 Módulo dinámico .....                            | 12 |
| 2.2.7 RFE .....  | 13 |
| 2.2.7.1 RFE-I .....                                    | 13 |

|  |    |
|--|----|
| 2.2.7.2 RFE-II.....  | 13 |
| 2.2.7.3 RFE-III.....   | 14 |
| 3. MARCO TEÓRICO .....   | 15 |
| 3.1 Caracterización de los materiales.....   | 15 |
| 3.2 Uso del material de fresado.....   | 15 |
| 3.3 Uso de la emulsión en procesos de estabilización.....  | 18 |
| 3.3.1 Emulsión utilizada.....  | 19 |
| 3.4 Compactador giratorio .....  | 21 |
| 3.5 Granulometría.....   | 22 |
| 3.5.1 Línea de máxima densidad.....  | 27 |
| 3.6 Respuesta a ensayos .....  | 28 |
| 3.7 Conclusiones extraídas del marco teórico .....   | 33 |
| 4. METODOLOGÍA .....   | 35 |
| 4.1 Obtención del material producto del proceso de fresado y la emulsión asfáltica.....                    | 35 |
| 4.1.1 Fresado .....  | 35 |
| 4.1.2 Emulsión asfáltica.....  | 36 |
| 4.2 Determinación de las granulometrías y dosificaciones de emulsión para elaboración de probetas. ....    | 37 |
| 4.3 Elaboración de probetas para valoración de densidades. ....  | 38 |
| 4.4 Evaluación de la respuesta mecánica de las muestras estabilizadas mediante ensayos de laboratorio..... | 40 |
| 4.4.1 Estabilidad - flujo .....  | 40 |
| 4.4.2 Inmersión – compresión .....   | 41 |
| 4.4.2.1 Compactación dinámica .....  | 41 |

|  |    |
|--|----|
| 4.4.2 Compactación estática .....  | 42 |
| 4.4.3 Módulo dinámico.....   | 44 |
| 4.5 Determinación de las probetas con mejor respuesta ante las sollicitaciones mecánicas.....  | 45 |
| 4.6 Estandarizar las condiciones ideales de gradación del material de fresado y de dosificación de ligante en función de las respuestas mecánicas evidenciadas. .... | 47 |
| 5. RESULTADOS.....   | 48 |
| 5.1 Análisis granulométrico.....   | 48 |
| 5.3.1 Línea de máxima densidad.....  | 49 |
| 5.2 Emulsión Asfáltica.....  | 52 |
| 5.3 Humedades .....  | 53 |
| 5.4 Densidad.....  | 53 |
| 5.4.1 Compactación estática .....  | 53 |
| 5.4.2 Compactación dinámica .....  | 56 |
| 5.5 Estabilidad – flujo.....   | 59 |
| 5.5.1 Compactación estática .....  | 59 |
| 5.5.1.1 Estabilidad.....   | 59 |
| 5.5.1.2 Flujo.....   | 62 |
| 5.5.2 Compactación dinámica .....  | 65 |
| 5.5.2.1 Estabilidad.....   | 65 |
| 5.5.2.2 Flujo.....   | 67 |
| 5.6 Inmersión – compresión.....  | 70 |
| 5.6.1 Compactación estática .....  | 70 |
| 5.6.2 Compactación dinámica .....  | 72 |

|  |     |
|--|-----|
| 5.7 Módulos dinámicos .....  | 73  |
| 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....   | 77  |
| 6.1 Granulometría .....  | 78  |
| 6.2 Índices de areas equivalentes .....  | 79  |
| 6.3 Índice de envuelta.....  | 81  |
| 6.4 Emulsión asfáltica.....  | 87  |
| 6.5 Humedades .....  | 87  |
| 6.6 Densidades.....  | 88  |
| 6.7 Estabilidad – flujo.....   | 91  |
| 6.8 Inmersión compresión.....  | 94  |
| 6.9 Módulo dinámico.....   | 97  |
| 6.10 Comportamientos del índice de envoltura y los demás parámetros<br>evaluados ..... | 99  |
| 7. DISCUSIÓN DE OTRAS CONDICIONES.....   | 105 |
| 8. CONCLUSIONES .....  | 108 |
| 9. RECOMENDACIONES .....   | 111 |
| 9.1 Recomendaciones constructivas .....  | 111 |
| 10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....  | 113 |

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1.</b> Análisis granulométrico para las tres (3) muestras de R.A.P. ....                              | 49 |
| <b>Figura 2.</b> Comparación Línea de Máxima Densidad y Distribución granulométrica real RAP 1.....             | 50 |
| <b>Figura 3.</b> Comparación Línea de Máxima Densidad y Distribución granulométrica real RAP 2.....             | 50 |
| <b>Figura 4.</b> Comparación Línea de Máxima Densidad y Distribución granulométrica real RAP 3.....             | 51 |
| <b>Figura 5.</b> Resultados de densidad R.A.P Tipo 1 a diferentes dosificaciones en compactación estática.....  | 54 |
| <b>Figura 6.</b> Resultados de densidad R.A.P Tipo 2 a diferentes dosificaciones en compactación estática.....  | 54 |
| <b>Figura 7.</b> Resultados de densidad R.A.P Tipo 3 a diferentes dosificaciones en compactación estática.....  | 55 |
| <b>Figura 8.</b> Comparación de Densidades promedio compactación estática.....                                  | 55 |
| <b>Figura 9.</b> Resultados de densidad R.A.P Tipo 1 a diferentes dosificaciones en compactación dinámica.....  | 56 |
| <b>Figura 10.</b> Resultados de densidad R.A.P Tipo 2 a diferentes dosificaciones en compactación dinámica..... | 57 |
| <b>Figura 11.</b> Resultados de densidad R.A.P Tipo 3 a diferentes dosificaciones en compactación dinámica..... | 57 |
| <b>Figura 12.</b> Comparación de densidades promedios Compactación Dinámica. ....                               | 58 |
| <b>Figura 13.</b> Estabilidad en Kg para R.A.P tipo 1 a diferentes dosificaciones de emulsión.....              | 59 |
| <b>Figura 14.</b> Estabilidad en Kg para R.A.P tipo 2 a diferentes dosificaciones de emulsión.....              | 60 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 15.</b> Estabilidad en Kg para R.A.P tipo 3 a diferentes dosificaciones de emulsión.....                             | 60 |
| <b>Figura 16.</b> Comparación de estabildades promedio para los tres tipos de R.A.P.   | 61 |
| <b>Figura 17.</b> Flujo en mm R.A.P Tipo 1 para diferentes dosificaciones. ....  | 62 |
| <b>Figura 18.</b> Flujo en mm R.A.P Tipo 2 para diferentes dosificaciones. ....  | 62 |
| <b>Figura 19.</b> Flujo en mm R.A.P Tipo 3 para diferentes dosificaciones. ....  | 63 |
| <b>Figura 20.</b> Comparación de flujos promedio para los tres tipos de R.A.P.....   | 64 |
| <b>Figura 21.</b> Estabilidad en Kg para R.A.P tipo 1 a diferentes dosificaciones de emulsión.....                             | 65 |
| <b>Figura 22.</b> Estabilidad en Kg para R.A.P tipo 2 a diferentes dosificaciones de emulsión.....                             | 66 |
| <b>Figura 23.</b> Estabilidad en Kg para R.A.P tipo 3 a diferentes dosificaciones de emulsión.....                             | 66 |
| <b>Figura 24.</b> Comparación Estabildades promedio para los tres (3) tipos de R.A.P.<br>.....                                 | 67 |
| <b>Figura 25.</b> Flujo en mm R.A.P Tipo 1 para diferentes dosificaciones. ....  | 68 |
| <b>Figura 26.</b> Flujo en mm R.A.P Tipo 2 para diferentes dosificaciones. ....  | 68 |
| <b>Figura 27.</b> Flujo en mm R.A.P Tipo 3 para diferentes dosificaciones. ....  | 69 |
| <b>Figura 28.</b> Comparación de Flujos promedio para los tres (3) tipos de R.A.P. ....  | 69 |
| <b>Figura 29.</b> Evaluación del módulo dinámico en función de la dosificación R.A.P Tipo 1. ....                              | 74 |
| <b>Figura 30.</b> Evaluación del módulo dinámico en función de la dosificación R.A.P Tipo 2. ....                              | 74 |
| <b>Figura 31.</b> Evaluación del módulo dinámico en función de la dosificación R.A.P Tipo 3. ....                              | 75 |
| <b>Figura 32.</b> Consolidado evaluación del módulo dinámico en función de la dosificación y los tres (3) tipos de R.A.P. .... | 75 |
| <b>Figura 33.</b> Condiciones de envuelta R.A.P. Tipo 1 .....  | 83 |
| <b>Figura 34.</b> Condiciones de envuelta R.A.P. Tipo 2 .....  | 83 |
| <b>Figura 35.</b> Condiciones de envuelta R.A.P. Tipo 3 .....  | 84 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Figura 36.</b> Condiciones de envuelta dosificación de 75 lt/m <sup>3</sup> .....                      | 84  |
| <b>Figura 37.</b> Condiciones de envuelta dosificación de 90 lt/m <sup>3</sup> .....                      | 85  |
| <b>Figura 38.</b> Condiciones de envuelta dosificación de 105 lt/m <sup>3</sup> .....                     | 85  |
| <b>Figura 39.</b> Magnitudes de módulos dinámicos sugeridos para R.A.P. estabilizado en caliente.....     | 98  |
| <b>Figura 40.</b> Comportamiento del índice de envuelta y la densidad – compactación estática.....        | 100 |
| <b>Figura 41.</b> Comportamiento del índice de envuelta densidad – compactación dinámica.....             | 100 |
| <b>Figura 42.</b> Comportamiento del índice de envuelta y la estabilidad – compactación estática.....     | 101 |
| <b>Figura 43.</b> Comportamiento del índice de envuelta y la estabilidad – compactación dinámica.....     | 102 |
| <b>Figura 44.</b> Comportamiento del índice de envuelta y el flujo – compactación estática.....           | 102 |
| <b>Figura 45.</b> Comportamiento del índice de envuelta y el flujo – compactación estática.....           | 103 |
| <b>Figura 46.</b> Comportamiento del índice de envuelta y el módulo dinámico – compactación dinámica..... | 104 |

## LISTA DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabla 1.</b> Usos más comunes de emulsiones asfálticas. ....   | 8  |
| <b>Tabla 2.</b> Regulación de Emulsiones asfálticas Catiónicas. ....  | 9  |
| <b>Tabla 3.</b> Propiedades físicas y mecánicas del R.A.P. ....   | 15 |
| <b>Tabla 4.</b> Reciclado en frío con Emulsión. ....  | 18 |
| <b>Tabla 5.</b> Generalización de la estabilización de emulsión asfáltica. ....   | 19 |
| <b>Tabla 6.</b> Rango típico de distribución de tamaños de partículas en procesos de obtención de R.A.P. ....   | 23 |
| <b>Tabla 7.</b> Distribución granulométrica para material R.A.P. ....   | 24 |
| <b>Tabla 8.</b> Tolerancias en la granulometría del material por reciclar para considerar que un tramo es homogéneo. ....   | 24 |
| <b>Tabla 9.</b> Distribución granulométrica en puntos de control sugeridos. ....  | 25 |
| <b>Tabla 10.</b> Distribución granulométrica sugerida para el material de fresado según el tipo de mezcla. ....   | 26 |
| <b>Tabla 11.</b> Distribución granulométrica para reciclados tipo III. ....   | 26 |
| <b>Tabla 12.</b> Distribución granulométrica para reciclados tipo I y II. ....  | 27 |
| <b>Tabla 13.</b> Dosificación de líquidos dentro de la mezcla de R.A.P. ....  | 29 |
| <b>Tabla 14.</b> Cálculo de densidad para probetas con compactación estática. ....  | 30 |
| <b>Tabla 15.</b> Cálculo de densidad para probetas con compactación giratoria. ....   | 30 |
| <b>Tabla 16.</b> Resultados de ensayos a tracción indirecta. ....   | 31 |
| <b>Tabla 17.</b> Resumen de dosificaciones y ensayos. ....  | 32 |
| <b>Tabla 18.</b> Dosificación de ligantes según tipo de Intervención. ....  | 32 |
| <b>Tabla 19.</b> Resistencias mínimas ante inmersión – compresión. ....   | 33 |
| <b>Tabla 20.</b> Valores de módulos para capas recicladas. ....   | 33 |
| <b>Tabla 21.</b> Distribución del número de probetas elaboradas para la valoración inicial de gravedad específica – bulk en compactación estática y compactación dinámica. .... | 38 |
| <b>Tabla 22.</b> Dosificaciones de probetas para densidad. ....   | 39 |



|   |    |
|---|----|
| <b>Tabla 23.</b> Cantidad de probetas a elaborar para estabilidad – flujo.....  | 40 |
| <b>Tabla 24.</b> Dosificación de probetas para evaluación de estabilidad-flujo.....   | 40 |
| <b>Tabla 25.</b> Distribución del número de probetas valoración de inmersión -<br>compresión en compactación dinámica. .... | 41 |
| <b>Tabla 26.</b> Dosificación de probetas para evaluación de estabilidad – flujo R.A.P<br>Tipo 1.....                       | 41 |
| <b>Tabla 27.</b> Dosificación de probetas para evaluación de estabilidad-flujo R.A.P Tipo<br>2.....                         | 42 |
| <b>Tabla 28.</b> Dosificación de probetas para evaluación de estabilidad-flujo R.A.P Tipo<br>3.....                         | 42 |
| <b>Tabla 29.</b> Distribución del número de probetas valoración de inmersión -<br>compresión en compactación estática. .... | 43 |
| <b>Tabla 30.</b> Dosificación de probetas para evaluación de inmersión – compresión<br>R.A.P Tipo 1.....                    | 43 |
| <b>Tabla 31.</b> Dosificación de probetas para evaluación de inmersión – compresión<br>R.A.P Tipo 2.....                    | 43 |
| <b>Tabla 32.</b> Cantidad de probetas a realizar para módulos dinámicos. ....   | 44 |
| <b>Tabla 33.</b> Dosificación de probetas para evaluación de módulos dinámicos R.A.P<br>Tipo 1.....                         | 44 |
| <b>Tabla 34.</b> Dosificación de probetas para evaluación de módulos dinámicos R.A.P<br>Tipo 2.....                         | 45 |
| <b>Tabla 35.</b> Dosificación de probetas para evaluación de módulos dinámicos R.A.P<br>Tipo 3.....                         | 45 |
| <b>Tabla 36.</b> Criterios de diseño de mezcla asfáltica en caliente .....  | 46 |
| <b>Tabla 37.</b> Resistencias inmersión - compresión .....  | 47 |
| <b>Tabla 38.</b> Análisis granulométrico para las tres (3) tipos de fresado. ....   | 48 |
| <b>Tabla 39.</b> Características técnicas de la emulsión asfáltica utilizada.....   | 52 |
| <b>Tabla 40.</b> Humedades de cada tipo de fresado. ....  | 53 |
| <b>Tabla 41.</b> Resultados de Inmersión – Compresión (Estática).....   | 71 |
| <b>Tabla 42.</b> Resultados de Inmersión – Compresión (Dinámico).....   | 72 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabla 43.</b> Matriz de evaluación de respuestas mecánicas. ....                                       | 77 |
| <b>Tabla 44.</b> Distribución granulométrica reales y de máximas densidades para cada tipo de R.A.P. .... | 80 |
| <b>Tabla 45.</b> Cálculo de índices de áreas equivalentes para cada tipo de R.A.P. ....                   | 80 |
| <b>Tabla 46.</b> Índices de envuelta para cada uno de los tipos de R.A.P. ....                            | 82 |

## **1. INTRODUCCION**

### **1.1 ANTECEDENTES**

El proceso de estabilización de materiales granulares a lo largo de la historia se ha concentrado en la adición de materiales cementantes como la cal y el cemento, pero considerando los costos de producción y obtención, se ha generado la necesidad de aplicar otras sustancias que actúen como aglutinante que aseguren un buen desempeño en el tiempo y sean aplicadas por medio de un proceso constructivo sencillo, como es el caso de los materiales bituminosos.

Ya que las primeras pautas de estudio de materiales bituminosos se concentraron en el asfalto y la producción de mezclas, las técnicas de producción y reciclado más estudiadas son las desarrolladas en caliente, toda vez que se consideró que era la forma más viable de reducir la viscosidad y por ende asegurar buena manejabilidad. Por tal motivo, esta condición del avance en el tema había dejado relegada la posibilidad de generar un proceso en bajas temperaturas y con una sustancia ligante de viscosidad suficientemente baja para un buen mezclado ya fuera con granulares o con material producto del proceso de fresado, y a que a su vez presentara una serie de beneficios ambientales considerables. A partir de estos beneficios, se propuso entonces la posibilidad de mezclar el material de R.A.P con emulsiones asfálticas.

Una de las bondades de la estabilización en frío con emulsión es que alternamente pueden adicionarse sustancias de carácter cementante como cal y cemento que por su naturaleza son compatibles con el material asfáltico y que a su vez generan ganancias en la densidad. Esta posición respecto a la adición o no de

cementantes tiene apoyos de ciertos investigadores que afirman aumentos en la respuesta mecánica por efecto del aumento de la densidad y cierto grado de acción cementante (Head, 1974). Por otra parte, existen contradictores que expresan que la adición de estas sustancias genera un patrón de respuesta errático ante las pruebas mecánicas (Alonso, 2005).

Según Head (1974), presenta que la consideración general de la reacción entre la emulsión (Asfalto + Agua) y los cementante posiblemente adicionados (cemento o Cal) está representada por el siguiente proceso:

- ✓ Fase 1: Hidratación del cemento (reacción entre el cemento y el agua);
- ✓ Fase 2: Rotura de la emulsión debido al empleo de agua;
- ✓ Fase 3: El betún producido por el proceso de rotura de la emulsión se deposita en los cristales de cemento hidratado y seguido por el proceso de cohesión entre las partículas de betún.

Para los mismos autores el proceso de hidratación de la cal se rige por un efecto similar al del cemento cuando se produce la rotura de la emulsión y en lo que respecta al curado de las mezclas. A partir de estas fases se desarrolló un estudio por parte de Brown & Needham, (2000) donde se evidencia la formación permanente de una mezcla asfalto-cemento denominada mastico la cual genera un incremento en la resistencia. En general, con esta información de partida y con el estudio enfocado en el mejoramiento del módulo de rigidez, resistencia a deformación permanente y resistencia a fatiga, se propuso la adición dosificada del cemento.

Por otra parte Al-Harthy et al., (2002) adelantaron estudios enfocados en la interacción entre materiales asfálticos nuevos en conjunto con envejecidos los cuales están presentes en el material reciclado, planteándose entonces la opción de implementar la combinación del cemento con algo de material asfáltico nuevo. Entre tanto, Reclaimed Asphalt Pavement (R.A.P.) expone buenas respuestas

para funcionar como componente de aporte estructural en el pavimento y sobre todo cuando se agrega cierta proporción de cemento y no exclusivamente agregados vírgenes.

Vale la pena aclarar que ciertos autores avalan el aumento de la resistencia, pero plantean que si la dosificación es bastante rigurosa, se pueden conservar las propiedades flexibles, es decir que el cemento no rigidice la mezcla.

Otra explicación de la utilización del cemento en proporciones tan bajas como el 2% del peso de los agregados, es que su presencia ayuda en la reducción del agua incluida en la mezcla ya que esta es absorbida, generando un aumento en la densidad y aumento de cohesión en muy bajas proporciones, pero sobre todo actuando como acelerador del curado.

Con respecto a la opción de agregar o no agua al proceso de mezcla con R.A.P, se ha demostrado en estudios como los desarrollados por el proyecto OPTEL Potti (1999), que la cantidad deberá ser bien controlada ya que siempre existe un remanente del agua adicionada contenido que nunca es reducido, así los períodos de curado sean bastante prolongados.

Algo claro que Peña & Soto (2004), Sintés (2009), y Alonso (2005), sostienen es que hay que entender que el proceso de reciclaje de mezclas bituminosas es a partir de un material heterogéneo cuyas propiedades son difíciles de controlar y una de ellas es la granulometría, razón por la cual la proyección de los resultados de laboratorio a la práctica presenta cierta dificultad.

## **1.2 PROBLEMA**

Las condiciones propias de nuestro país tales como la escasez de recursos económicos y la dificultad de acceso a tecnología más avanzada, hacen difícil la adquisición de plantas de trituración y clasificación de R.A.P, generando que el uso de dicho material se lleve a cabo sin considerar la variación granulométrica. Esta condición genera entonces un cambio en las dosificaciones de la emulsión asfáltica requerida en la estabilización, y a su vez induce un comportamiento irregular en las vías que han sido tratadas por medio de ésta técnica.

Adicionalmente se presentan problemáticas alrededor de los siguientes aspectos:

- ✓ Falta de regulación, homogenización y control del tamaño de partículas implementadas en la estabilización con emulsión asfáltica.
- ✓ La franja granulométrica propuesta por algunas entidades e investigadores citados en el Anexo 2 de Comparativo granulométrico, manejan rangos amplios, de los que pueden esperarse respuestas mecánicas muy irregulares por efecto de superficies específicas, relaciones de vacíos y contenidos de ligante bastante diversos, haciendo menos homogénea la valoración de desempeño entre un tramo y otro.

La formulación de los problemas lleva entonces a una pregunta general que puede plantearse de la siguiente manera:

- ¿Qué variabilidad habrá en las respuestas mecánicas del fresado estabilizado con emulsión asfáltica cuando sean modificadas las curvas granulométricas y las dosificaciones de ligante?

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 OBJETIVO GENERAL**

Determinar la variabilidad en la respuesta mecánica del material de fresado estabilizado con emulsión asfáltica, en función de los cambios de las curvas granulométricas y los contenidos de ligante.

### **1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- ✓ Formular dosificaciones y curvas granulométricas para la elaboración de las probetas
- ✓ Evaluar las respuestas mecánicas y dinámicas de las muestras estabilizadas, mediante ensayos de laboratorio.
- ✓ Estandarizar las condiciones ideales de gradación del material de fresado y de dosificación de ligante en función de las respuestas mecánicas y dinámicas evidenciadas.

## **1.4 JUSTIFICACIÓN**

La idea de investigar el comportamiento del material de fresado estabilizado con emulsión asfáltica se soporta en que los volúmenes de dicho material en actividades de pavimentación son cada vez mayores en las principales ciudades de nuestro país, sin embargo dicha técnica se está adelantado sin una regulación respecto de los tamaños de partículas del material de fresado cuando éste es implementado como única fuente, es decir sin aportes adicionales de materiales granulares que ajusten a curvas granulométricas, situación a su vez genera variaciones en las dosificaciones de la emulsión asfáltica.

Condiciones adicionales que impulsan la investigación alrededor de la técnica de estabilización del R.A.P. con emulsión asfáltica son:

- ✓ El producto estabilizado con emulsión sin ajustes granulométricos, resulta ser más económico que la reconstrucción de una carpeta asfáltica convencional.
- ✓ El proceso se ejecuta en frío, lo que genera disminuciones importantes en las demandas de energía y de emisiones de material particulado.
- ✓ Es un proceso rápido, sencillo y puede ejecutarse con equipos convencionales.



## **2. MARCO CONCEPTUAL**

### **2.1 FRESADO**

También conocido como R.A.P por su definición en inglés (Reclaimed Asphalt Pavement), en términos generales se entiende como el resultado de la demolición controlada de una determinada carpeta asfáltica en un espesor específico que es función de un trazado topográfico, generalmente con fines de mejoramiento de la vía en la que se desarrolla la actividad, obteniéndose tamaños variables según haya sido la profundidad de la intervención. (FHWA, 2008)

Igualmente se puede obtener como una derivación de los desechos de pavimento asfáltico en actividades de reconstrucción donde el total de la carpeta existente es retirado, y cuyos residuos también pueden ser procesados. Se contempla que el tipo de materiales encontrados son: Asfalto con cierto grado de envejecimiento y agregados que según la patología que haya ameritado la intervención y según el equipo de obtención, pueden presentar algún grado de pulimiento y de fracturación. Para el caso de reutilización total, el R.A.P se suele usar como parte de una mezcla con algún estabilizante en determinadas dosificaciones los cuales serán objeto de procesos térmicos y/o mecánicos para reestructurar un tramo particular. Por otra parte cuando la recuperación está enfocada a los agregados se ejecutan procesos químicos que retiran la fase asfáltica.

### **2.2 EMULSIÓN ASFÁLTICA**

Básicamente es una dispersión de asfalto con una proporción de emulsificantes y agua, que forman una mezcla estable que permite la manipulación de carpetas asfálticas a temperaturas menores a 100°C. Las principales características de las emulsiones asfálticas están concentradas en el fraguado que éstas requieren para

el rompimiento total, el cual es bastante irregular por efecto de la composición y reología de las mismas, ya que las fases del asfalto como los asfaltenos y maltenos son variables y de diferente naturaleza química. (MANUFACTURAS Y PROCESOS INDUSTRIALES LTDA., 2008).

**Tabla 1.** Usos más comunes de emulsiones asfálticas.

| APLICACIÓN                                    | ROTURA R.A.PIDA |       |       | ROTURA MEDIA |       | ROTURA LENTA |
|---|-----------------|-------|-------|--------------|-------|--------------|
|   | CRR-0           | CRR-1 | CRR-2 | CRM-1        | CRM-2 | CRL          |
| Riegos de liga, de curado, en negro.          | X               | X     |       |              |       |              |
| Tratamientos superficiales                    | X               | X     | X     | X            |       |              |
| Mezclas en frío abiertas.                     |                 |       |       | X            | X     |              |
| Mezclas en frío almacenables para bacheo.     |                 |       |       | X            | X     |              |
| Mezclas densas en frío.                       |                 |       |       |              |       | X            |
| Riegos antipolvo.                             |                 |       |       |              |       | X            |
| Estabilizaciones de suelos. Grava - emulsión. |                 |       |       |              |       | X            |
| Lechadas asfálticas convencionales.           |                 |       |       |              |       | X            |
| Riegos de imprimación.                        |                 |       |       |              |       | X            |

*Fuente: Manufacturas y Procesos Industriales Ltda. (2008)*

### 2.2.1 EMULSIONES CATIONICAS DE ROMPIMIENTO LENTO

Por rompimiento se hace referencia a aquellas emulsiones donde la fase acuosa toma un mayor tiempo de rompimiento, es decir, en alcanzar la evaporación del agua dejando únicamente la fase asfáltica ya sea modificada o no, con o sin polímeros. Por otra parte el concepto de catiónica se refiere a la carga eléctrica que presenta la emulsión, factor determinante en la adherencia o repulsión de los ambientes en los cuales se pretende aplicar. Por razones de calidad, las emulsiones se encuentran regidas por los parámetros dados a continuación.

**Tabla 2.** Regulación de Emulsiones asfálticas Catiónicas.

| TIPO DE EMULSIONES ENSAYOS  | NORM A REF INV | ROMPIMIENTO R.A.PIDO |      |           |      | ROMPIMIENTO MEDIO |               | ROMPIMIENTO LENTO |      |            |      |           |      | FRECUENCIA DE ENSAYO  |             |
|---|----------------|----------------------|------|-----------|------|-------------------|---------------|-------------------|------|------------|------|-----------|------|-----------------------|-------------|
|   |                | MPI CRR-1            |      | MPI CRR-2 |      | MPI CRM           |               | MPI CRL-1/1E      |      | MPI CRL-1h |      | MPI CRL-0 |      |                       |             |
|   |                | MI N                 | MA X | MI N      | MA X | MIN               | MAX           | MI N              | MA X | MI N       | MA X | MI N      | MA X |                       |             |
| <b>ENSAYOS SOBRE LA EMULSIÓN</b>  |                |                      |      |           |      |                   |               |                   |      |            |      |           |      |                       |             |
| VISCOSIDAD<br>Seybolt Furol 25°C (s)  |                | -                    | -    | -         | -    | -                 | -             | -                 | 200  | -          | 100  | -         | 50   |                       |             |
| Seybolt Furol 50°C (s)  | E-763          | 20                   | 100  | 20        | 300  | 20                | 450           | -                 | -    | -          | -    | -         | -    | POR COCHADA           |             |
| ESTABILIDAD DE ALMACENAMIENTO<br>Sedimentación a los 7 días (%)                 | E-764          | -                    | 5    | -         | 5    | -                 | 5             |                   |      |            |      |           |      | POR COCHADA           |             |
| DESTILACIÓN<br>Contenido de asfalto residual (%)                                |                | 60                   | -    | 65        | -    | 60                | -             | 57                | -    | 57         | -    | 40        | -    |                       |             |
| Contenido de disolventes (%)  | E-762          | -                    | 3    | -         | 3    | -                 | 12            | -                 | -    | -          | 0    | 10        | 20   | POR COCHADA           |             |
| TAMIZADO<br>Retenido en tamiz n°20, 850 µm                                      | E-765          | -                    | 0.1  | -         | 0.1  | -                 | 0.1           | -                 | 0.1  | -          | 0.1  | -         | 0.1  | POR COCHADA           |             |
| ROTURA<br>Mezcla con cemento (%)  | E-770          | -                    | -    | -         | -    | -                 | -             | -                 | -    | -          | 2    | -         | -    | POR COCHADA SEMESTRAL |             |
| CARGA PARTICULA   | E-767          | POSITIVA             |      | POSITIVA  |      | POSITIVA          |               | POSITIVA          |      | POSITIVA   |      | POSITIVA  |      |                       |             |
| pH  | E-768          | -                    | 6    | -         | 6    | -                 | 6             | -                 | 6    | -          | 6    | -         | 6    | COCHADA               |             |
| RECUBRIMIENTO DEL AGREGADO Y RESISTENCIA AL DESPLAZAMIENTO<br>Con agregado seco |                | -                    | -    | -         | -    |                   | BUENA         | -                 | -    | -          | -    | -         | -    |                       |             |
| Con agregado seco y acción del agua   |                | -                    | -    | -         | -    |                   | SATISFACTORIA | -                 | -    | -          | -    | -         | -    |                       |             |
| Con agregado húmedo   |                | -                    | -    | -         | -    |                   | SATISFACTORIA | -                 | -    | -          | -    | -         | -    |                       |             |
| Con agregado húmedo y acción del agua   | E-769          | -                    | -    | -         | -    |                   | SATISFACTORIA | -                 | -    | -          | -    | -         | -    | COCHADA               |             |
| <b>ENSAYOS SOBRE EL RESIDUO DE LA DESTILACIÓN</b>                               |                |                      |      |           |      |                   |               |                   |      |            |      |           |      |                       |             |
| PENETRACIÓN 25°C , 100 gr, 5s (0,1 mm)  | E-706          | 60                   | 100  | 60        | 100  | 100               | 250           | 60                | 100  | 60         | 100  | 20        | 0    | 300                   | POR COCHADA |
| DUCTILIDAD @25°C , 5cm/min (cm)   | E-702          | 40                   | -    | 40        | -    | 40                | -             | 40                | -    | 40         | -    | 40        | -    | SEMESTRAL             |             |
| SOLUBILIDAD EN TRICLOROETILE NO (%)   | E-713          | 97                   | -    | 97        | -    | 97                | -             | 97                | -    | 97         | -    | 97        | -    | SEMESTRAL             |             |

*Fuente: Manufacturas y Procesos Industriales Ltda. (2008)*

### **2.2.1.1 Emulsión 60 - 40**

Corresponde a cualquier tipo de emulsión asfáltica cuya dosificación es de 60% de fase asfáltica y 40% de la fase acuosa – emulsificante.

### **2.2.1.2 Estabilización**

Mejoramiento de las propiedades mecánicas del material de fresado mediante el aglutinamiento de sus partículas implementando materiales bituminosos, permitiendo la circulación vial.

## **2.2.2 REUTILIZACIÓN DEL FRESADO**

### **2.2.2.1 Plantas de procesamiento de R.A.P**

Como se mencionó, en nuestro país no se cuenta con centros de procesamiento del R.A.P, únicamente existen centros de acopio temporal. La importancia de estos centros radica en que en ellos se procesa el material mediante una secuencia de actividades que incluyen, trituración, cribado, transporte y apilamiento. Aunque en la mayoría de los países desarrollados las carpetas asfálticas destinadas a reutilización se trabajan en las plantas de procesamiento, también es posible que éstas sean fragmentadas en el lugar y se incorporen como superficies de rodamiento o sean incluidas en la estructura de base y sub bases granulares estabilizadas haciendo uso de un equipo mezclador autopropulsado, siempre y cuando cumplan con los requisitos granulométricos especificados para el uso que se pretende dar.

### **2.2.3 COMPACTADOR GIRATORIO**

Consiste en un sistema de compactación en el cual se tratan de reproducir más confiablemente las condiciones que presentan los equipos en campo por medio de una base superior que aplica la carga en la muestra depositada en un cilindro el cual es desviado de la horizontal por efecto de la aplicación voluntaria de cierto

ángulo generando un efecto de sube y baja en los bordes del cilindro cuando una base móvil gira alrededor del cilindro por un determinado número de giros. Como se menciona el funcionamiento del compactador está fundamentado en una serie de giros responsables de la energía de compactación efecto alterno a la fuerza vertical impuesta sobre la muestra, por ende mayor número de giros genera mayor reorganización de las partículas y mayor densidad.

Más detalladamente el proceso de operación del compactador es: “Se aplica una tracción estática vertical y una acción giratoria que consiste en la rotación de la masa con un cierto ángulo respecto al eje vertical del pistón de compactación. La presión vertical se aplica antes de iniciar las rotaciones y se mantiene esta presión durante todo el proceso de compactación. La importancia del giro y el ángulo es la generación de un esfuerzo cortante en la mezcla lo que genera un efecto de amasado y por ende la reorganización de los áridos en la probeta que se está compactando. El amasado da un aporte importante en la homogeneidad de vacíos en la mezcla, ya que cuando se inicia el proceso de compactación y solamente actúa el esfuerzo vertical los vacíos entre el exterior y el núcleo de la probeta son de diferente magnitud, y cuando éste inicia por efecto del ángulo y el giro, las diferencias se van reduciendo a tal punto que pueden ser casi nulas, particularmente en los últimos niveles del proceso”. (Alonso, 2005)

La magnitud del ángulo para la metodología Superpave normalmente es de  $1.25^\circ$  y de  $1^\circ$  para el Estándar Europeo. Las variables de aplicación que rigen el funcionamiento del compactador son: Frecuencia de rotación (30 rpm), Presión vertical (600 KPa).

#### **2.2.4 ESTABILIDAD – FLUJO**

Este ensayo se ejecuta con el fin de determinar la resistencia a la deformación plástica de especímenes cilíndricos de mezclas asfálticas para pavimentación, empleando el aparato Marshall. El procedimiento se puede aplicar tanto para

proyectos de mezclas en el laboratorio como para control en obra, dicho procedimiento consiste en la fabricación de probetas de 101.6 mm (4") de diámetro y 63.5 mm (2½") de altura, las cuales son sometidas a esfuerzos a partir de los cuales se obtienen registros de estabilidad como carga máxima y deformación al momento de la falla (INV E-748-07).

### **2.2.5 INMERSIÓN - COMPRESIÓN**

Este es un método de ensayo implementado como indicador de susceptibilidad a la humedad en mezclas asfálticas compactadas, su respectiva norma de ensayo expone el procedimiento para valorar la pérdida de resistencia a la compresión por efecto del agua sobre dichas mezclas, elaboradas con cementos asfálticos. Finalmente, se reporta los resultados del ensayo obteniendo un "índice numérico" que expresa la pérdida resistencias a la compresión producida entre probetas moldeadas y curadas al aire y probetas sometidas a la acción del agua, durante un tiempo determinado. Para el caso de reciclados con emulsión asfáltica, se utilizarán los criterios de la norma INV E-738 Anexo A.

### **2.2.6 MÓDULO DINÁMICO**

Módulo dinámico: Es el valor absoluto del módulo complejo que define las propiedades elásticas de un material de viscosidad lineal sometido a una carga Sinusoidal  $|E^*|$ .

Módulo Complejo: Es un número complejo que define la relación entre esfuerzo y deformación para un material visco elástico lineal,  $E^*$ .

A partir de la INV E-753 y 754, el ensayo consiste en la preparación y prueba de mezclas asfálticas con el fin de determinar los valores del módulo dinámico. El procedimiento abarca un intervalo tanto de temperatura como de frecuencia de carga. La serie de ensayos mínima recomendada incluye temperaturas de 5°, 25°

y 40°C (42°, 77° y 104°F) y frecuencias de cargas de 1, 4 y 16 Hz para cada temperatura.

### **2.2.7 RFE**

Según Peña & Soto (2004), se define RFE como Reciclado en Frío con Emulsión Bituminosa, a la mezcla homogénea, convenientemente extendida y compactada, del material resultante producto del fresado, con el fin de aclarar los términos de clasificación de intervenciones de la ATEB (Asociación Técnica de Emulsiones Bituminosas), se anexa la descripción de los tres tipos de RFE que se caracterizan por:

#### **2.2.7.1 RFE-I**

Corresponde con aquellas situaciones en las que se pretende reciclar materiales que en su mayor parte no están tratados con ligantes bituminosos. Este es el caso de vías flexibles, que están constituidos por capas granulares con un revestimiento formado por tratamientos superficiales o capas finas (espesor igual o inferior a 4 ó 5 cm) de mezclas bituminosas. También se incluyen en este tipo los caminos rurales no pavimentados. El espesor del reciclado puede variar en función de las condiciones del tráfico desde los 8cm, en los casos de tráfico más ligero, a los 12 cm. (Peña & Soto, 2004)

#### **2.2.7.2 RFE-II**

Corresponde al caso en el cual se pretende reciclar simultáneamente materiales tratados con ligantes bituminosos y otros no tratados o tratados con conglomerantes hidráulicos, tal que la proporción de materiales con bituminosos es al menos el 50% del espesor total a tratar (preferentemente >75%). Concretamente esta situación puede darse en aquellas vías, constituidas por una o dos capas de mezcla bituminosa con un espesor entre 5 y 12cm, apoyados sobre una base granular o tratada con ligantes hidráulicos. (Peña & Soto, 2004)

### **2.2.7.3 RFE-III**

Es la situación que se plantea cuando únicamente se reciclan materiales tratados con ligantes bituminosos. Es el caso, por ejemplo, de los firmes constituidos por capas bituminosas en los que el RFE se concibe como un retratamiento de mezcla bituminosa exclusivamente. Se trata normalmente de carreteras de tráfico medio o pesado, con problemas de fisuración por fatiga, despegue de la capa de rodadura, envejecimiento, etc. También puede darse este caso cuando se pretenda reciclar las capas superiores de mezcla bituminosa de un firme semirrígido con problemas de reflexión de fisuras. (Peña & Soto, 2004)



### 3. MARCO TEÓRICO

#### 3.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

Características propias tanto físicas y mecánicas del R.A.P dependen del tipo de agregado y del contenido de humedad, sin embargo en la literatura se han establecido ciertos valores (tabla 3) que se asemejan a lo que se podrían encontrar en la obra. Según FHWA, (2008), se presenta como referencia para el manejo del material de fresado en procesos de estabilización una caracterización básica.

**Tabla 3.** Propiedades físicas y mecánicas del R.A.P.

| TIPO DE PROPIEDAD | PROPIEDAD  | RANGO DE VALORES TÍPICOS   |
|-------------------|--|--|
| <b>FÍSICAS</b>    | Peso Unitario  | 1940 - 2300 kg/m <sup>3</sup><br>(120-140 lb/ft <sup>3</sup> )<br>Normal: por encima de 5% |
|                   | Contenido de Humedad                                 | Máximo: 7-8%   |
|                   | Contenido de asfalto                                 | Normal: 4,5-6%<br>Rango máximo: 3-7%   |
|                   | Penetración del Asfalto                              | Normal: 10-80 a 25°C (77°F)  |
|                   | Viscosidad Absoluta del cemento asfáltico recuperado | Normal: 4,000 - 25,000 poises a 60°C (140°F)   |
| <b>MECÁNICAS</b>  | Peso Unitario compactado                             | 1600 - 2000 kg/m <sup>3</sup><br>(100-125 lb/ft <sup>3</sup> )                             |
|                   | CBR  | 100% R.A.P: 20-25%   |

Fuente: FHWA (2008).

#### 3.2 USO DEL MATERIAL DE FRESADO

Se ha estimado que tan solo en los Estados Unidos aproximadamente 36 millones de toneladas de R.A.P, lo que representa que entre el 80 y el 85% del concreto

asfáltico producido en caliente, está siendo implementado en mezclas frías o como agregado en bases estabilizadas (FHWA, 2008).

Las propiedades del R.A.P son directamente dependientes de las propiedades de los materiales constituyentes y del tipo de concreto asfáltico, por tal razón cuando es apilado en un mismo lugar proveniente de diferentes fuentes su calidad puede variar. Problemáticas del almacenamiento prolongado y multi fuente son: El exceso de material grueso, fino y deleznable.

Cierta problemática que se presenta cuando el R.A.P no es implementado en una estabilización simultáneamente a la demolición de la carpeta, es el almacenamiento por un período relativamente prolongado en los centros de acopio, lo que implica cierta exposición al ambiente y costos de transporte.

La descripción y comportamiento del material producto del proceso de fresado radica en que las propiedades de éste son dependientes de las cualidades de los materiales constituyentes y del tipo de concreto asfáltico. Igualmente, las respuestas mecánicas y propiedades físicas como la resistencia al pulimiento y la fricción serán variables si el proceso de fresado es proveniente de una carpeta de rodadura o de base asfáltica. El contenido típico de cemento asfáltico del R.A.P es entre el 3 y 7% del peso de la mezcla. Dicho asfalto suele ser más rígido que uno virgen por las condiciones de exposición al oxígeno durante su vida útil. La magnitud de la rigidez será función de la temperatura y tiempo de la mezcla, contenido de vacíos y el tiempo de servicio (factores directamente proporcionales), y el grado de compactación (inversamente proporcional), para cualquier caso importa conocer el tipo de cemento asfáltico. (FHWA, 2008)

Para Yu & Li, (2010) cuando una Estabilización se hace en caliente, también es posible validar las cualidades mecánicas del uso de material de fresado, es decir, corroborar el uso de un material previamente utilizado. La metodología expuesta por dichos autores consistió en mezclar asfalto envejecido proveniente del R.A.P

y asfalto en estado original, procedimiento parcialmente similar al que se pretende en este trabajo de grado salvo por las temperaturas de mezclado y por el uso de emulsión asfáltica, que aunque tenga una menor concentración de componentes que el asfalto, genera cierto grado de mejoramiento al asfalto existente en el R.A.P.

En contraste con la idea de este trabajo de investigación (Generar una estabilización en frío y con emulsión asfáltica), Yu & Li, (2010) plantean la posibilidad de generar la estabilización por medio de procesos térmicos en plantas y aplicando asfalto convencional. Sin embargo, en ambos casos se expone que el R.A.P. posee propiedades mecánicas bastante aprovechables, toda vez que una buena proporción de los granulares presentes no tiene mayores evidencias de desgaste y que el suministro de un material asfáltico nuevo, genera cierto grado de rejuvenecimiento sobre aquel que se encuentra rigidizado por el paso del tiempo. (FHWA, 2008).

Por otra parte Chen & Hong, (2010) plantean que una capa de concreto asfáltico tiene un buen desempeño cuando los componentes granulares de esta se reemplazan por material de fresado en un porcentaje no mayor al 35%, siempre y cuando el proceso constructivo sea el adecuado.

Se plantea la utilización del material de fresado en tres categorías según sean los espesores y objetivos de la intervención a realizar, como se muestra en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Reciclado en frío con Emulsión.

|   |                 | TIPO I  | TIPO II  | TIPO III                                       |
|---|-----------------|---|--|--|
| <b>Material reciclado del firme existente</b> |                 | Capa bituminosa (<4/5 cm) + base granular                                 | Capa bituminosa (5 - 10 cm) + base no bituminosa (>50% "negro) | Mezclas bituminosas                            |
| <b>Emulsión (60% B. Res.)</b>                 | <b>Tipo</b>     | Emulsión de betún blando (80/100 ó 150/200)                               | Emulsión de betún blando ó regenerante                         | Emulsión de betún blando o regenerante         |
|   | <b>Dotación</b> | (4-7 %)   | (3-5%)   | (2, 5-4%)                                      |
| <b>Espesor de reciclado</b>                   |                 | 8-12 cm   | 8-12 cm  | 6-12 cm  |
| <b>Objetivo</b>                               |                 | Mejora de las características mecánicas o geométricas del firme existente | Idem tipo I y eventualmente, regeneración del ligante          | Reciclado y regeneración del ligante existente |

*Fuente: Peña & Soto (2004).*

### 3.3 USO DE LA EMULSIÓN EN PROCESOS DE ESTABILIZACIÓN

Considerando las propiedades bituminosas de la emulsión asfáltica ésta presenta una reconocida trayectoria en actividades de sello y estabilización de suelos o de reutilización de carpetas parcialmente deterioradas, obteniendo respuestas satisfactorias posteriores a su implementación.

Soto y Peña, (2004) reconocen la implementación de la emulsión asfáltica en planta o in situ, aplicada a carpetas asfálticas provenientes del procesos de fresado y en donde se hace uso del ligante existente en las mismas y proponen como espesores de trabajo capas entre 6 y 12 cm. Por otra parte es expuesta la posibilidad de implementar el 100% del material granular proveniente del R.A.P o también adicionarle granulares que ayuden a corregir la gradación dado que esta no cumpla el requerimiento técnico.

Jahren y Behling, (2004) corroboran el uso de emulsión en el mejoramiento de carpetas asfálticas para usos superficiales como sello, de donde se pone a prueba el material ante condiciones altas de desgaste, siendo un antecedente de buena implementación de la emulsión asfáltica como ligante bajo condiciones

exigentes. Por otra parte presenta la tabla 5 como guía para los usos más comunes de emulsión asfáltica:

**Tabla 5.** Generalización de la estabilización de emulsión asfáltica.

| Características   | Reciclado con emulsión Asfáltica   |  |   | Reciclado con un conglomerante hidráulico   |
|---|--|--|---|---|
|   | Clase I  | Clase II   | Clase III   | Clase IV  |
| <b>Ligante</b>  | Emulsión de betún blando de penetración 180/220 o 80/100   | Emulsión de betún blando o de betún regenerante  | Emulsión de betún blando o de betún regenerante               | Cemento, o Conglomerante del tipo de escoria granulada, mezcla del conglomerante hidráulico + arena   |
| <b>Materiales reciclados provenientes del firme antiguo</b> | 3 o 4 cm de las capas bituminosas + capa de base (tratada o no tratada)  | 4 o 8 cm del pavimento + capa de base, pero al menos 75% proviene de las capas bituminosas | Solamente materiales bituminosos, incluyendo la interfaz      | Todo o parte del pavimento bituminoso. Todo o parte de las capas de base. Eventualmente parte del soporte   |
| <b>Objetivo</b>   | Mejora de las características mecánicas y geométricas del firme utilizando en mayor o menor medida el firme antiguo, y eventualmente regeneración del betún en la Clase II |  | Reciclado del pavimento bituminoso con regeneración del betún | Construcción de una nueva capa hidráulica: con o sin material de aportación, con o sin enanche de la calzada, con o sin alcanzar el suelo de la explanada, con o sin eliminar la capa superficial |
| <b>Aplicación</b>   | Refuerzo estructural para tráfico bajo   | Rehabilitación de capas superficiales  |   | Refuerzo estructural importante con o sin ensanche de la calzada  |

*Fuente: Alonso (2005).*

### 3.3.1 Emulsión utilizada

Según las especificaciones generales de carreteras del Instituto Nacional de Vías de Colombia (INVIAS, 2007) se estipula que para reciclados en frío en el lugar con emulsión asfáltica, ésta será de rompimiento lento, del tipo CRL-1, cuyo residuo de destilación tenga una penetración entre 100 y 250 décimas de milímetro, que sea compatible con los agregados pétreos, la cual deberá cumplir con los requisitos de calidad establecidos en el numeral 400.2.4 del artículo 400

de las mismas especificaciones. Cuando se requiera utilizar una emulsión de diferentes características como re-generante, deberá ser trabajada bajo una especificación particular.

Alonso (2005), afirma que el tipo de emulsión más empleado en los reciclados in situ y en procesos en frío es la ECL-2, cuyo asfalto residual presenta una penetración de alrededor 200 décimas de mm, pero aclara también que no toda ECL-2 o EAL-2 será compatible con los agregados o con las condiciones ambientales y por ende si no se hace una buena selección, estas no responderán adecuadamente a los requerimientos del proceso de estabilización.

En términos generales los requisitos básicos requeridos para una emulsión en el proceso de estabilización son: Compatibilidad con la mineralogía y granulometría de los materiales producto del fresado, estabilidad en la emulsión tal que permita un cubrimiento homogéneo en todos los tamaños de partículas dentro del cuerpo de materiales antes de la rotura, las respuestas mecánicas de la mezcla deben ser acordes al tráfico, ya sea durante la construcción o la puesta en servicio. El aumento de la cohesión por eliminación de agua y de la compactación por efecto de la circulación vehicular no deberá ser contraproducente en la mezcla, las condiciones mecánicas finales deberán ser recíprocas a las expectativas y deberán ser alcanzadas en un plazo adecuado, la adherencia entre agregados y emulsión deberá soportar las exigencias del agua y el tráfico.

A partir de estas pautas se establece que cualquiera que sea el tipo de emulsión aniónica o catiónica pero de rompimiento lento, es indispensable que la compatibilidad con los agregados sea la óptima para asegurar el buen desempeño en las demás condiciones expuestas. En el caso de la mezcla con material de fresado esta compatibilidad resulta ser difícil de determinar ya que en la mayoría de la superficie la emulsión no tendrá contacto directo con los agregados, si no con su capa asfáltica periférica, agua adicionada o del ambiente y si es el caso materiales granulares de aporte.

La FHWA, (2008) plantea que el material de fresado obtiene cierto grado de humedad mientras esté apilado con valores de hasta el 5%, y que a la vez es directamente proporcional con el tiempo de almacenaje. Por las características de fracturamiento el R.A.P puede retener una medida considerable de agua cuando es expuesto a la lluvia con contenidos entre 7 y 8%.

### **3.4 COMPACTADOR GIRATORIO**

Considerando que las condiciones de reproducción en laboratorio respecto de la actividad en campo deben ser lo más similares posibles, y que esta premisa involucra también al proceso de compactación de cualquier tipo de mezclas, alrededor del mundo se intentan desarrollar investigaciones que orienten en el entendimiento del acomodamiento de partículas y reducción de vacíos por efecto de una carga dinámica que sea efectiva pero no excesiva al punto de afectar los agregados. Tal es el caso del compactador giratorio, el cual está respaldado por el Strategic Highway Research Program (SHRP) y por el Estándar Europeo.

Es un ensayo bastante valorado ya que define la mezcla por sus características volumétricas y para este caso resulta apropiado toda vez que ha sido valorado en la compactación de reciclado en frío. En este tipo de compactación se refleja que la distribución de vacíos es completamente diferente entre el núcleo y zona exterior, tal como se evidencia en proyectos de estabilización con fresado previamente realizados.

A partir de las respuestas en densificación se puede obtener información como:

- ✓ Para mezclas que den como resultado curvas cerradas, pendientes de densificación pronunciadas indicarán aquellas que tengan una mayor compactibilidad. Su estructura, constituida por el porcentaje adecuado de asfalto o emulsión y por la granulometría adecuada de áridos con una elevada angulosidad, absorberá un alto grado de energía de compactación. Aquellas

mezclas que presenten curvas achatadas, pendientes bajas, se caracterizan por una baja compactibilidad. (Alonso, 2005)

- ✓ La buena compactibilidad se corresponde con buena resistencia frente a deformación permanente. Además, una elevada energía de compactación puede reorganizar el esqueleto de la mezcla. El resultado de la fricción interna garantiza resistencia a deformación de la mezcla in situ.

Basándose en el estudio del efecto de la incorporación de material granular en el reciclado con emulsión de pavimentos asfálticos, mediante el empleo del compactador giratorio, Sintés, (2009) se establece que el movimiento del compactador genera un esfuerzo cortante que depende de la estructura de la mezcla. Las principales ventajas del compactador giratorio son: El efecto de amasado, el hecho de que permita realizar la curva de compactibilidad y la posibilidad de poder ser utilizado por una amplia gama de tamaños de árido de la mezcla. Una desventaja de este compactador es la estricta geometría, ya que no se puede utilizar para ensayar vigas o probetas de diferentes medidas que las que permite el molde cilíndrico.

### **3.5 GRANULOMETRIA**

Según la FHWA, (2008) cualquier proceso de obtención de fresado ya sea por desgarramiento o aplastamiento causa degradación en los agregados. Cuando el equipo actúa por desgarramiento la gradación del producto obtenido resulta ser más fina y más densa que en los agregados vírgenes y cuando el equipo actúa por aplastamiento el material no sufre tanto daño, es decir, la granulometría no es tan fina como en desgarramiento pero es más gruesa que en el material virgen. Para ambos casos se esperaría que la mayoría de los tamaños de partículas estén por debajo de los 38 mm con un tamaño máximo entre 51 y 63 mm.



**Tabla 6.** Rango típico de distribución de tamaños de partículas en procesos de obtención de R.A.P.

| Tamiz              | Porcentaje de finos que pasan |
|--------------------|-------------------------------|
| 37.5 mm (1.5 in)   | 100                           |
| 25 mm (1.0 in)     | 95 - 100                      |
| 19 mm (3/4 in)     | 84 - 100                      |
| 12.5 mm (1/2 in)   | 70 - 100                      |
| 9.5 mm (3/8 in)    | 58 - 95                       |
| 75 mm (No. 4)      | 38 - 75                       |
| 2.36 mm (No. 8)    | 25 - 60                       |
| 1.18 mm (No. 16)   | 17 - 40                       |
| 0.60 mm (No. 30)   | 10 - 35 <sup>a</sup>          |
| 0.30 mm (No. 50)   | 5 - 25 <sup>b</sup>           |
| 0.15 mm (No. 100)  | 3 - 20 <sup>c</sup>           |
| 0.075 mm (No. 200) | 2 - 15 <sup>d</sup>           |

a. Usualmente menor que el 30%  
 b. Usualmente menor que el 20%  
 c. Usualmente menor que el 15%  
 d. Usualmente menor que el 10%

Fuente: FHWA (2008)

Algunos estudios desarrollados por esta entidad reflejan que en ciertos puntos de control granulométrico pueden presentarse alzas en la concentración de material, los registros que soportan dicha afirmación reflejan por ejemplo en el caso del tamiz N°8 para una situación previa al fresado valores entre del 41 y 69% y pasado el proceso se encontró un rango entre 52 y 72%, por otra parte el tamiz N°200 presenta valores de 6 al 10% que cambian hasta un 8 al 12%.

La normativa colombiana plantea la franja granulométrica para material de reciclado representada en la tabla 7, y al igual que la fuente anterior no se discrimina el uso que se le pretende dar a la capa estabilizada, aunque haya una mayor serie de tamices, presentando proporciones bastante elevadas entre un tamiz y otro. Se plantea que si el material producto del fresado no cumple con esta gradación, es posible dosificar agregados vírgenes hasta que se incluyan todos los tamaños dentro de las proporciones especificadas.

**Tabla 7.** Distribución granulométrica para material R.A.P.

|         | TAMIZ  |         | PORCENTAJE QUE PASA |
|---------|--------|---------|---------------------|
|         | NORMAL | ALTERNO |                     |
| 37.5 mm |        | 1 1/2"  | 100                 |
| 25.0 mm |        | 1"      | 75 - 100            |
| 19.0 mm |        | 3/4"    | 65 - 100            |
| 9.5 mm  |        | 3/8"    | 45-75               |
| 4.75 mm |        | N° 4    | 30 - 60             |
| 2.00 mm |        | N° 10   | 20 - 45             |
| 425 µm  |        | N° 40   | 10 - 30             |
| 75 µm   |        | N° 200  | 5 - 20              |

*Fuente: Art. 461 INV- E (2007).*

Alternativamente se expone en la tabla 8 una serie de tolerancias por medio de las cuales se determina si el material es homogéneo entre un lote y otro y por ende las condiciones de trabajo y respuestas mecánicas se espera sean similares. Tales niveles de tolerancia se implementan con el fin de tratar de regular la disparidad en tamaños y propiedades que el R.A.P puede presentar, según sea el espesor, componentes de la capa fresada y el equipo implementado.

**Tabla 8.** Tolerancias en la granulometría del material por reciclar para considerar que un tramo es homogéneo.

| CARACTERISTICAS   |   | TOLERANCIA |
|---|---|------------|
| <b>Granulometría (tolerancia respecto de la masa total del material por reciclar)</b> | Porcentaje que pasa tamiz de 2 mm y mayores (N° 10 y mayores) | ± 6        |
|   | Porcentaje que pasa tamiz de 425 µm (N° 40)                   | ± 4        |
|   | Porcentaje que pasa tamiz de 75 µm                            | ± 3        |
| <b>Espesor (Variación en el espesor de la capa, en mm)</b>                            | Capas asfálticas  | 25         |
|   | Capas granulares  | 50         |

*Fuente: Art. 461 INV- E (2007).*

Queda nuevamente la duda de si las variaciones granulométricas son realmente influyentes en el desempeño de las mezclas y si los rangos presentados son de una magnitud tal que entre un extremo y otro no haya variaciones considerables.

En contraposición Alonso, (2005) propone la fabricación de probetas únicamente utilizando árido reciclado proveniente de fresado de una misma fuente, sin incorporar agregados como correctores de granulometría y sin discriminar el uso que se le dará a la capa estabilizada, ya sea como base asfáltica o como rodadura provisional. La gradación general para la Universidad Politécnica de Cataluña está dada por la tabla 9.

**Tabla 9.** Distribución granulométrica en puntos de control sugeridos.

| <b>Tamaño tamiz (mm)</b> | <b>% retenido</b> | <b>Peso retenido (g)</b> | <b>Peso acumulado (g)</b> | <b>% Pasa</b> |
|--------------------------|-------------------|--------------------------|---------------------------|---------------|
| 20                       | -                 | -                        | -                         | 100           |
| 8                        | 26                | 260                      | 260                       | 74            |
| 4                        | 42                | 420                      | 680                       | 32            |
| Resto                    | 32                | 320                      | 1000                      | 0             |

*Fuente: Alonso (2005).*

Por otra parte en Argentina se desarrolló una especificación técnica particular (Ministerio de Obras y servicios Públicos de Argentina, 2008) donde se propone la provisión de mezcla de concreto asfáltico en frío con material de fresado (R.A.P) y emulsión catiónica rejuvenecedora para cierta granulometría, véase tabla 10:

**Tabla 10.** Distribución granulométrica sugerida para el material de fresado según el tipo de mezcla.

| TAMIZ          | MEZCLAS DENSAS |       |       | MEZCLAS ABIERTAS |       |       |
|----------------|----------------|-------|-------|------------------|-------|-------|
|                | TM ½"          | TM ¾" | TM 1" | TM ½"            | TM ¾" | TM 1" |
| 38 mm (1 ½")   | ---            | ---   | 100   | ---              | ---   | 100   |
| 25.4 mm (1")   | ---            | 100   | 80-95 | ---              | 100   | 65-90 |
| 19 mm (¾")     | 100            | 80-95 | ---   | 100              | 65-90 | ---   |
| 12.7 mm (½")   | 80-95          | ---   | 62-77 | 65-90            | ---   | 30-55 |
| 2 mm (N10)     | 32-45          | 32-46 | 32-45 | 4-19             | 4-19  | 4-19  |
| 4.20 µn (N100) | 8-15           | 8-15  | 8-15  | 3-8              | 3-8   | 3-8   |
| 7.4 µn (N200)  | 3-8            | 3-8   | 3-8   | 0-4              | 0-4   | 0-4   |

*Fuente: Ministerio de Obras y Servicios Públicos de Argentina (2008)*

Peña & Soto, (2004) expone en la tabla 11 una serie de granulometrias sugeridas, en función del tipo de reciclado y del tráfico de circulación que se espera.

Para este caso el tipo de reciclado III hace referencia a vias de alta circulación de vehiculos pesados.

**Tabla 11.** Distribución granulométrica para reciclados tipo III.

| TIPO DE REICLADO III | CEDAZOS Y TAMICES UNE - EN 933 - 2 (mm) |        |        |       |       |       |       |      |      |       |
|----------------------|---|--------|--------|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|
|                      | 40                                      | 25     | 20     | 12.5  | 8     | 4     | 2     | 0.5  | 0.25 | 0.063 |
| RE1                  | 100                                     | 78-100 | 69-95  | 52-82 | 40-70 | 25-53 | 15-40 | 2-20 | 0-10 | 0-3   |
| RE2                  |   | 100    | 80-100 | 62-89 | 49-77 | 31-58 | 19-42 | 2-20 | 0-10 | 0-3   |

*Fuente: Peña & Soto (2004).*

Para vías de circulación baja y media de vehículos pesados Peña & Soto, (2004) afirma que no hay una normativa oficial pero que a partir de la experiencia se han logrado aproximar ciertos criterios granulométricos de la siguiente manera, como se analiza en la tabla 12:

**Tabla 12.** Distribución granulométrica para reciclados tipo I y II.

| TIPO DE<br>RECICLADO III | CEDAZOS Y TAMICES UNE - EN 933 - 2 (mm) |        |        |       |       |       |       |      |      |       |
|--------------------------|---|--------|--------|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|
|                          | 40                                      | 25     | 20     | 12.5  | 8     | 4     | 2     | 0.5  | 0.25 | 0.063 |
| RE1                      | 100                                     | 78-100 | 69-95  | 52-82 | 40-70 | 25-53 | 15-40 | 8-25 | 5-20 | 2-12  |
| RE2                      |   | 100    | 80-100 | 62-89 | 49-77 | 31-58 | 19-42 | 8-25 | 5-20 | 2-12  |

Fuente: Peña & Soto (2004).

### 3.5.1 LINEA DE MAXIMA DENSIDAD

La metodología de diseño superpave ha propuesto la utilización del exponente 0.45 en la carta granulométrica para definir una línea de tendencia que se use como técnica gráfica única para juzgar la distribución de tamaños acumulados de partículas de una mezcla de agregados, la cual representaría la línea de máxima densidad que presenta dicha mezcla, en función del tamaño máximo que la distingue. (Asphalt Institute et al., 1996)

De modo convencional a una distribución granulométrica, en el eje vertical se fijan los porcentajes que pasan, mientras que en el eje horizontal, se representan las aberturas de los tamices en mm, elevadas a la potencia 0.45.

Esta forma de representación granulométrica, corresponde a una línea recta extendida desde la abscisa de tamaño máximo del agregado y ordenada 100% hasta el origen (0%, 0 mm).

El método emplea la serie estándar de tamices de la ASTM y las siguientes definiciones con respecto al tamaño del agregado:

- Tamaño máximo nominal: (1) tamaño de tamiz mayor que el primer tamiz que retiene más del 10%.
- Tamaño máximo: (1) tamaño de tamiz mayor que el tamaño máximo nominal.

La línea de máxima densidad representa la graduación para la cual las partículas del agregado se acomodan entre sí conformando el arreglo volumétrico más compacto posible. (Asphalt Institute et al., 1996)

Algunos autores expresan que dicha línea debe evitarse, ya que habría menos espacio entre los agregados como para permitir la presencia efectiva de una película de ligante lo suficientemente amplia como para asegurar la durabilidad de una mezcla.

### **3.6 RESPUESTA A ENSAYOS**

Para Yu & Li (2010), se plantea la necesidad de hacer ensayos de resistencia a la humedad razón por la cual la implementación del ensayo de inmersión compresión resulta ser un buen parámetro de evaluación, además se acompaña de ensayos de fatiga, prueba que no está contemplada en el presente trabajo.

Por otra parte en el compendio de la revista *Épsilon*, Reyes & Figueroa, (2004) se corrobora el uso de emulsiones asfálticas en la estabilización de suelos y de reciclado de carpetas deterioradas, mediante la comparación de resultados con tramos trabajados con asfalto espumado, arrojando valores de densidad bastante similares.

West et al., (2009) reflejó la disminución significativa de la resistencia a la fatiga en una serie de probetas elaboradas con un 45 % de R.A.P y 55 % de materiales granulares de aporte, las cuales fueron comparadas con otra serie de probetas elaboradas sin adición de R.A.P, respuesta justificada por el autor, por efecto de una mayor cantidad de material envejecido, es decir, a mayor cantidad de R.A.P., mayor cantidad de asfalto envejecido y por ende mayor rigidez en la mezcla y a su vez menor desempeño a la fatiga.

Podría decirse entonces que para el presente trabajo de grado, cualquiera de las probetas que se fuesen elaboradas (R.A.P. 1, 2 y 3), presentarían bajo desempeño a la fatiga, considerando que el material utilizado es 100% R.A.P.

S. Kim et al., (2009) presentan la respuesta ante ensayos de ahuellamiento y agrietamiento en mezcla asfálticas adicionadas con R.A.P y tratadas con polímeros modificadores de ligantes, generalmente rejuvenecedores que permiten mezclar en mejores condiciones el asfalto envejecido presente en el R.A.P.

Según Alonso, (2005) la valoración de la densidad debe ser un parámetro que anticipadamente refleja los posibles valores de resistencia a tracción indirecta, según sean las adiciones implementadas y porcentajes de agua suministrados. Sería fácil pensar que para mayores valores de densidad, mayores resistencias se obtendrían. Algunas de las dosificaciones trabajadas por este autor se presentan en la tabla 13:

**Tabla 13.** Dosificación de líquidos dentro de la mezcla de R.A.P.

| PROBETA | Agua | ECL-2 |
|---------|------|-------|
| 1_1     |      |       |
| 1_2     | 2.0% | 2.5%  |
| 1_3     |      |       |
| 1_4     |      |       |
| 1_5     | 1.5% | 3.0%  |
| 1_6     |      |       |
| 1_7     |      |       |
| 1_8     | 1.0% | 3.5%  |
| 1_9     |      |       |

*Fuente: Alonso (2005).*

Como se observa las probetas analizadas no están adicionadas con ningún tipo de cementante. Los resultados de densidad están dados en la tabla 14 para compactación estática, tabla 15 para compactación dinámica, y la respuesta a tracción Indirecta en la tabla 16.

Para estas pruebas en particular donde existió adición de agua, se desarrolló un ensayo de proctor donde se trataba el material de R.A.P como granular con el fin de obtener unos valores de humedad óptima.

**Tabla 14.** Cálculo de densidad para probetas con compactación estática.

| Probeta | H <sub>1</sub><br>(mm) | H <sub>2</sub><br>(mm) | H <sub>3</sub><br>(mm) | H<br>media(mm) | P seco<br>(g) | P sumergido<br>(g) | P saturado<br>(g) | Densidad<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | Densidad Media<br>(g/cm <sup>3</sup> ) |
|---------|------------------------|------------------------|------------------------|----------------|---------------|--------------------|-------------------|----------------------------------|--|
| 1_1     | 58.4                   | 58.5                   | 59                     | 58.63          | 1003.7        | 545.7              | 1006.9            | 2.1763                           |  |
| 1_2     | 58.2                   | 58.6                   | 59.4                   | 58.73          | 1004.9        | 541.1              | 1006.4            | 2.1539                           |  |
| 1_3     | 58.4                   | 59.3                   | 58.4                   | 58.7           | 1000.7        | 548.3              | 1009.2            | 2.1799                           | <b>2.17</b>                            |
| 1_4     | 59.4                   | 58                     | 58.3                   | 58.57          | 1001.8        | 549                | 1012.6            | 2.1773                           |  |
| 1_5     | 58.7                   | 58.8                   | 59.7                   | 59.07          | 1005          | 544.9              | 1011.5            | 2.1614                           |  |
| 1_6     | 59.9                   | 59.6                   | 59                     | 59.5           | 995.7         | 546.4              | 1011.1            | 2.164                            | <b>2.1676</b>                          |
| 1_7     | 58.6                   | 59.1                   | 59.8                   | 59.17          | 989.7         | 550                | 1015.6            | 2.171                            |  |
| 1_8     | 58.3                   | 58.9                   | 58.4                   | 58.53          | 1005.2        | 546.8              | 1007.4            | 2.1776                           |  |
| 1_9     | 58.2                   | 58                     | 57.6                   | 57.93          | 1009.4        | 553                | 1011              | 2.1996                           | <b>2.1827</b>                          |

Fuente: Alonso (2005).

**Tabla 15.** Cálculo de densidad para probetas con compactación giratoria.

| Probeta | H <sub>1</sub><br>(mm) | H <sub>2</sub><br>(mm) | H <sub>3</sub><br>(mm) | H<br>media(mm) | P seco<br>(g) | P sumergido<br>(g) | P saturado<br>(g) | Densidad<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | Densidad Media<br>(g/cm <sup>3</sup> ) |
|---------|------------------------|------------------------|------------------------|----------------|---------------|--------------------|-------------------|----------------------------------|--|
| 4_1     | 61.1                   | 61.3                   | 61.5                   | 61.3           | 997.4         | 536.1              | 1005.1            | 2.12665                          |  |
| 4_2     | 61.4                   | 61.3                   | 61.3                   | 61.33          | 1004.9        | 535.4              | 1014.9            | 2.095772                         |  |
| 4_3     | 61.4                   | 60.9                   | 61                     | 61.1           | 1000.7        | 537.6              | 1008.7            | 2.12418                          | <b>2.11552</b>                         |
| 4_4     | 61.3                   | 61.4                   | 61.3                   | 61.33          | 1001.8        | 546.1              | 1009.7            | 2.16091                          |  |
| 4_5     | 61.8                   | 61.9                   | 61.9                   | 61.87          | 1005          | 544.3              | 1015.3            | 2.13376                          |  |
| 4_6     | 61.1                   | 61.2                   | 61.2                   | 61.17          | 995.7         | 541.6              | 1003.8            | 2.15426                          | <b>2.14964</b>                         |
| 4_7     | 60.5                   | 61.3                   | 60.9                   | 60.9           | 989.7         | 535.2              | 993.6             | 2.15903                          |  |
| 4_8     | 60.6                   | 61.4                   | 61                     | 61             | 1005.2        | 547                | 1011.4            | 2.16451                          |  |
| 4_9     | 60.8                   | 60.4                   | 60.3                   | 60.5           | 1009.4        | 549.9              | 1014.6            | 2.17215                          | <b>2.16523</b>                         |

Fuente: Alonso (2005).



**Tabla 16.** Resultados de ensayos a tracción indirecta.

| Probeta | Densidad (t/m <sup>3</sup> ) | Carga Máx (kgf) | Deformación (mm) | Resistencia (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Ecarga (Kgf/mm) |
|---------|------------------------------|-----------------|------------------|------------------------------------|-----------------|
| 4_1     | 2.13                         | 1573            | 1.88             | 16.08                              | 2368.08         |
| 4_2     | 2.1                          | 1465            | 2.24             | 14.97                              | 1676.48         |
| 4_3     | 2.12                         | 1228            | 1.56             | 12.59                              | 1386.6          |
| 4_4     | 2.16                         | 1518            | 2                | 15.51                              | 1982.77         |
| 4_5     | 2.13                         | 1418            | 1.69             | 14.36                              | 1722.03         |
| 4_6     | 2.15                         | 1507            | 2.32             | 15.44                              | 2136.2          |
| 4_7     | 2.16                         | 1570            | 1.43             | 16.16                              | 1976.71         |
| 4_8     | 2.16                         | 1464            | 1.58             | 15.04                              | 1725.86         |
| 4_9     | 2.17                         | 1621            | 1.39             | 16.78                              | 1276.88         |

Fuente: Alonso (2005).

Alonso (2005), además del análisis de las dosificaciones, adelantó alternamente un comparativo entre la implementación de compactación estática y giratoria dando como resultado las siguientes conclusiones:

La resistencia a la tracción de las probetas es directamente proporcional a su densidad, y los mayores valores de resistencia se presentan en aquellas probetas con mayor contenido de emulsión, para este caso (3.5% Emulsión + 1% de Agua). Las mayores densidades se obtendrán en compactación giratoria y no estática, pero los mayores valores de resistencia a la tracción se dan en compactación estática, contrario a lo que se esperaría. Por ende se concluye que la compactación giratoria produce mayor ordenamiento de las partículas pero no mayor reducción de volumen, donde la compactación estática es más eficiente.

Ahora analizando las respuestas ante la adición de cementantes son obtenidos resultados como sigue la tabla 17.

**Tabla 17.** Resumen de dosificaciones y ensayos.

| Mezcla                             | Resistencia Tracción<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | Deformación<br>(mm) |
|------------------------------------|--|---------------------|
| 3 % ECL-2 + 1.5 % H <sub>2</sub> O | 18.01  | 1.72                |
| 1% Cemento                         | 15.12  | 1.38                |
| 2% Cemento (cuando cámara húmeda)  | 10.58  | 0.93                |
| 3% ECL-2 + 1.5 % H <sub>2</sub> O  |  |                     |
| 2% Cemento                         | 15.64  | 1.33                |
| 3% Cemento                         | 16.95  | 1.29                |
|                                    | 0.5% Cal                                       | 14.37               |
| 3% ECL-2 + 1.5 % H <sub>2</sub> O  | 0.5% Cal                                       | 13.74               |
|                                    | 0.5% Cal                                       | 13.07               |

*Fuente: Alonso (2005).*

De donde se observa que los mayores resultados de resistencia a tracción se dan cuando no haya adición de cementantes, pero las deformaciones si son menores cuando estos son aplicados.

Por otra parte la Asociación Técnica de Emulsiones Bituminosas (ATEB) desarrolló la valoración de las probetas de material fresado con emulsión en la siguiente dosificación de la tabla 18:

**Tabla 18.** Dosificación de ligantes según tipo de Intervención.

| Tipo de Reciclado | Emulsión al 60% B. res.<br>(% en peso sobre material a reciclar) |      | Ligante<br>(% en peso sobre material a reciclar) |     |
|-------------------|--|------|--|-----|
|                   | Min  | Máx. | Min  | Max |
| RFE - III         | 2.5  | 4    | 1.5  | 2.4 |
| RFE - II          | 3  | 5    | 1.8  | 3   |
| RFE - I           | 4  | 7    | 2.4  | 4.2 |

*Fuente: Soto & Peña (2004).*

Adicionalmente se evaluaron en pruebas de inmersión - compresión, obteniendo los siguientes resultados, presentados en la tabla 19.

**Tabla 19.** Resistencias mínimas ante Inmersión – Compresión.

| Tipo de Reciclado                      | Categoría del Tráfico Pesado       | Valores mínimos           |                                  |                            |
|--|------------------------------------|---------------------------|----------------------------------|----------------------------|
|  |                                    | Resistencia en Seco (MPa) | Resistencia tras inmersión (MPa) | Resistencia Conservada (%) |
| RFE - III                              | T1 (sólo capas de base) - T2 y (*) | 3                         | 2.5                              | 75                         |
|  | T3 - T4 y arcenes                  | 2.5                       | 2                                | 70                         |
| RFE – II<br>>75%<br>“negro”            | T2 y (*)                           | 3                         | 2.5                              | 75                         |
|  | T3 - T4 y arcenes                  | 2.5                       | 2                                | 70                         |
| RFE – II<br><75%<br>“negro y<br>RFE -I | T3 - T4 y arcenes                  | 2.5                       | 2                                | 70                         |
|  | Caminos Agrícolas y asimilados     | 0.9                       | 0.7                              | 50                         |

(\*) Vías de servicio no agrícolas de autopistas y autovías interurbanas

Fuente: Soto & Peña (2004).

Por otra parte se evalúan en la tabla 20 las respuestas a ensayos de módulo dinámico dando una serie de valores orientativos:

**Tabla 20.** Valores de módulos para capas recicladas.

| Tipo de reciclado | Módulo dinámico E (MPa) | Módulo de Poisson $\nu$ | Observaciones                         |
|-------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------------------|
| RFE - I           | 1.200 - 1.800           | 0.35                    |                                       |
| RFE - II          | 1.500 - 2.500           | 0.35                    | Valores a alcanzar tras la maduración |
| RFE - III         | 2.500 - 3.500           | 0.35                    |                                       |

Fuente: Soto & Peña (2004).

### 3.7 CONCLUSIONES EXTRAÍDAS DEL MARCO TEÓRICO

- ✓ Resulta bastante complejo establecer una fórmula de trabajo en una mezcla que presente material reciclado por efecto de la distribución no homogénea en tamaños y propiedades y por ende se esperarían resultados menos uniformes.

- ✓ La adición de sustancias cementantes a la mezcla generan un aporte en la cohesión y resistencia inicial por efecto de la reducción de agua, lo que reduce el tiempo de apertura al tráfico.
- ✓ La utilización de cementantes no ayudan en la ganancia de resistencias finales a tracción indirecta.
- ✓ La discontinuidad en los resultados de ciertos ensayos realizados bajo las mismas condiciones lleva a pensar que la granulometría del árido escogido tiene gran influencia en los valores obtenidos.
- ✓ La adición de cementantes aporta en la obtención de mezclas más densas y homogéneas, siendo efectivo el cemento que la cal.
- ✓ Dado que el proceso de curado sea controlado y realizado en cámara húmeda se obtienen mayores valores de densidad pero cuyas resistencias son menores. Lo que demuestra que no existe una directa relación entre la densidad y la resistencia a tracción indirecta, probablemente por la variación granulométrica de la mezcla.

## **4. METODOLOGÍA**

La metodología presentada a continuación presenta de forma detallada el desarrollo del proyecto para cada una de las fases fijadas desde la adquisición de los materiales hasta la obtención de los resultados.

### **4.1 OBTENCIÓN DEL MATERIAL PRODUCTO DEL PROCESO DE FRESADO Y LA EMULSIÓN ASFÁLTICA.**

#### **4.1.1 FRESADO**

Tras visita adelantada al centro de almacenaje de materiales de la alcaldía local de Suba, con la respectiva autorización para toma de muestra y retiro de las mismas, se adelantaron los siguientes pasos, antes de analizar primero el comportamiento del fresado en una calle importante de Bogotá.

- ✓ Identificación visual: Se optó por un material de R.A.P que fuera homogéneo respecto del origen, años de servicio y procesos de obtención a fin de eliminar variables en el estudio. Las condiciones seleccionadas fueron: Malla vial Arterial, 10 años de Servicio, espesor de capa de fresado 15 centímetros. Adicionalmente, se determinaron tres montículos que presentaran marcadas diferencias granulométricas, tomando como referencia el tamaño máximo visual. (Característica corroborada en laboratorio).
- ✓ Toma de muestras: De cada uno de los montículos seleccionados se tomaron aproximadamente 200 kg de material que fueron dispuestos en lonas de polietileno resistentes al punzonamiento, y cuyo llenado se hizo manualmente. Para la obtención de la muestra, se tomarán porciones de la cima, el medio (núcleo) y la base de cada montículo, para contrarrestar los

posibles efectos de segregación. Así mismo, el transporte que requirió de un vehículo de platón cubierto con capacidad mínima de 600kg, que trasladó el material desde la localidad de Suba hasta las instalaciones del laboratorio de ingeniería civil de la Pontificia Universidad Javeriana.

- ✓ Disposición y almacenaje: Una vez arribado el material al laboratorio, se dispuso en el cuarto de materiales por el tiempo que se requirió para el desarrollo de este proyecto.

#### **4.1.2 EMULSIÓN ASFÁLTICA**

Se adelantó la toma de muestras de la producción de DOBLE A INGENIERÍA, considerando las siguientes: Tipo: Catiónica de Rompimiento Lento, Concentración: 60 – 40, Asfalto Residual: Penetración 80 – 100. Las pautas para adquirir el material fueron las siguientes:

- ✓ Toma de muestras: Se dispuso de 10 envases plásticos con capacidad de 4 litros cada uno, herméticos de color oscuro que aseguraran la conservación de la emulsión (vale la pena resaltar que se debieron hacer varias tomas de emulsión tres considerando que todos los ensayos no se desarrollaron simultáneamente y tomando en cuenta que la emulsión tiene unos tiempos máximos de almacenamiento antes de rompimientos y precipitación). Las características técnicas de la emulsión se encuentran relacionadas en la tabla N° 36. Además, para transportar la materia prima, se recurrió a un vehículo de platón cubierto, que trasladó el material desde la localidad de Suba hasta las instalaciones del laboratorio de ingeniería civil de la Pontificia Universidad Javeriana. Así pues, se dispone y se almacena en el laboratorio, se colocó en un lugar seco, alejado de fuentes de calor y de posibles manipulaciones.

## **4.2 DETERMINACIÓN DE LAS GRANULOMETRÍAS Y DOSIFICACIONES DE EMULSIÓN PARA ELABORACIÓN DE PROBETAS.**

Se adelantó un análisis granulométrico para cada uno de las muestras para cada una de las muestras de material extraído implementando la norma INV E-123.

A partir de las cantidades implementadas en la práctica sugeridas por la entidades reguladoras de la intervención vial en el distrito, cercanas a los 70 litros por metro cúbico se fijaron cuatro (4) dosificaciones de emulsión asfáltica que propongan un rango superior e inferior a dicha magnitudes.

- ✓ 60 litros de emulsión por cada metro cúbico de fresado.
- ✓ 75 litros de emulsión por cada metro cúbico de fresado.
- ✓ 90 litros de emulsión por cada metro cúbico de fresado.
- ✓ 105 litros de emulsión por cada metro cúbico de fresado.

La primera dosificación se descartó considerando que la cantidad de emulsión resultó ser bastante escasa como para proporcionar una superficie de recubrimiento homogéneo, por ende se aclara que dosificaciones inferiores son descartadas por la misma razón. La presente aclaración toda vez que existen contratistas que expresan que con dosificaciones tan bajas como 40 litros por metros cúbicos se obtiene mezclas estables, pero en ningún caso expresan cuales son los ensayos de valoración.

En esta fase se desarrolló el ensayo de gravedad específica máxima teórica ( $G_{mm}$ ) y densidad de Mezclas asfálticas para pavimentos de acuerdo a la Norma I.N.V. E – 735 – 07, con el fin de caracterizar el material.

### 4.3 ELABORACIÓN DE PROBETAS PARA VALORACIÓN DE DENSIDADES.

La Tabla 21 refleja la cantidad y distribución de probetas iniciales que fueron elaboradas para la valoración de densidades, mientras la tabla 22 refiere las dosificaciones de las probetas que se van a construir, para el análisis de densidades. La dosificación de 60 lt/m<sup>3</sup> fue descartada considerando que la poca manejabilidad e inestabilidad que se presentó incluso pasado el tiempo de rompimiento.

**Tabla 21.** Distribución del número de probetas elaboradas para la valoración inicial de gravedad específica – Bulk en compactación estática y compactación dinámica.

| NÚMERO DE PROBETAS COMPACTACIÓN ESTÁTICA – DINÁMICA<br>(Cálculo de Densidades) |      |         |         |         |
|--|------|---------|---------|---------|
| R.A.P TIPO   | Dos. | R.A.P 1 | R.A.P 2 | R.A.P 3 |
| CONTENIDO DE EMULSIÓN<br>ASFÁLTICA EN (lt/m <sup>3</sup> ) DE<br>R.A.P.        | 75   | 6 - 6   | 6 - 6   | 6 - 6   |
|  | 90   | 6 - 6   | 6 - 6   | 6 - 6   |
|  | 105  | 6 - 6   | 6 - 6   | 6 - 6   |

*Fuente: Elaboración propia (2011).*

Cada una de estas probetas fue elaborada implementando el siguiente protocolo:

- ✓ Selección de 1200 gr de material de fresado.
- ✓ Dosificación de la emulsión asfáltica: A partir de los 1200 gr del material de fresado propuestos para la elaboración de las probetas, y considerando los valores de densidades de los materiales se proponen las siguientes dosificaciones:



**Tabla 22.** Dosificaciones de probetas para densidad.

| <b>DOSIFICACION</b> $\text{lt/m}^3$               | <b>75</b> | <b>90</b> | <b>105</b> |
|---|-----------|-----------|------------|
| Centímetros cúbicos<br>( $\text{cm}^3$ ) Emulsión | 46.212    | 55.454    | 64.696     |
| Gramos Emulsión                                   | 47.136    | 56.563    | 65.990     |
| Gramos Agua                                       | 6.864     | N.A       | N.A        |
| % Emulsión  | 3.928     | 4.714     | 5.499      |
| % Agua  | 0.572     | N.A       | N.A        |
| Gramos Fresado                                    | 1146.000  | 1143.437  | 1134.010   |

*Fuente: Elaboración propia (2011).*

Disposición en bandeja de mezclado: Una vez establecida la dosificación para cada caso, se dispone el fresado en una bandeja con bordes que eviten la pérdida de material, se agregará la emulsión asfáltica de forma homogénea y en varias tandas, con el fin de asegurar la cobertura total, al tiempo que se mezcla manualmente con una cuchara metálica. El proceso de mezclado se ejecutará como máximo en 10 minutos. Una vez realizada la mezcla se dejará el material abierto en la bandeja por un período de 5 minutos.

Compactación Estática: Para el caso de la compactación estática se procede con lo expuesto en la norma resistencia de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall. I.N.V. E – 748 – 07. Las muestras se expusieron a 75 golpes por cara.

Compactación giratoria: Cumplido el tiempo de exposición se introduce el material en el cilindro del compactador giratorio en tres (3) capas cada una de las cuales se apisonó con espátula de bordes redondeados dando quince (15) golpes por capa. El proceso de compactación programado para el equipo fue de 174 giros.

Ganancia de resistencias: Para ambos casos de compactación, una vez terminado el proceso, éstas son retiradas del equipo y puestas en un lugar cubierto y de humedad y temperatura ambiente durante 48 horas, tiempo en el cual la emulsión ha desarrollado parte del rompimiento ya que comparativamente con la práctica este tiempo sería suficiente para la apertura al tráfico.

## 4.4 EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA MECÁNICA DE LAS MUESTRAS ESTABILIZADAS MEDIANTE ENSAYOS DE LABORATORIO:

### 4.4.1 ESTABILIDAD - FLUJO

Se elaboraron probetas con los diferentes tipos de R.A.P y las diferentes dosificaciones mencionadas en la tabla 24 con el fin de realizar el ensayo “Resistencia de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall (ensayo estabilidad – flujo) Norma INV E-748-07. Se adelantaron grupos de probetas mediante compactación estática y mediante compactación dinámica de la misma forma descrita en el aparte de elaboración de probetas para cálculo de densidad, las dosificaciones se observan en la tabla 23.

**Tabla 23.** Cantidad de probetas a elaborar para estabilidad – flujo.

|  |            | NUMERO DE PROBETAS COMPACTACIÓN ESTÁTICA – DINÁMICA<br>(Estabilidad - Flujo) |         |         |
|--|------------|--|---------|---------|
|  |            | R.A.P 1  | R.A.P 2 | R.A.P 3 |
| <b>CONTENIDO DE EMULSIÓN ASFÁLTICA EN (Lt/m<sup>3</sup>) DE R.A.P.</b> | <b>75</b>  | 6-6  | 6-6     | 6-6     |
|  | <b>90</b>  | 6-6  | 6-6     | 6-6     |
|  | <b>105</b> | 6-6  | 6-6     | 6-6     |

*Fuente: Elaboración propia (2011).*

**Tabla 24.** Dosificación de probetas para evaluación de estabilidad-flujo.

| DOSIFICACION Lt/m3                              | 75       | 90       | 105      |
|---|----------|----------|----------|
| Centímetros Cúbicos Emulsión (cm <sup>3</sup> ) | 46.212   | 55.454   | 64.696   |
| Gramos Emulsión                                 | 47.136   | 56.563   | 65.990   |
| Gramos Agua                                     | 6.864    | N.A      | N.A      |
| % Emulsión                                      | 3.928    | 4.714    | 5.499    |
| % Agua  | 0.572    | N.A      | N.A      |
| Gramos Fresado                                  | 1146.000 | 1143.437 | 1134.010 |

*Fuente: Elaboración propia (2011).*

#### 4.4.2 INMERSIÓN – COMPRESIÓN

Considerando los resultados obtenidos en el ensayo de estabilidad - flujo, aquellas probetas que presentaron mejor desempeño fueron evaluadas implementando la norma “Efecto del agua sobre la cohesión de las mezclas asfálticas compactadas (ensayo de inmersión-compresión) Norma INV E-738-07”, para ambos casos de compactación. Dado en la tabla 25 la distribución de las probetas.

##### 4.4.2.1 COMPACTACIÓN DINÁMICA

**Tabla 25.** Distribución del número de probetas valoración de inmersión - compresión en compactación dinámica.

| NÚMERO DE PROBETAS PARA INMERSIÓN COMPRESIÓN<br>(Estado Seco - Saturado) |     |         |         |         |
|--|-----|---------|---------|---------|
| R.A.P TIPO   |     | R.A.P 1 | R.A.P 2 | R.A.P 3 |
|  | 75  |         |         |         |
| CONTENIDO DE EMULSIÓN ASFÁLTICA EN (lt/m <sup>3</sup> ) DE R.A.P.        | 90  |         | 6 - 6   | 6 - 6   |
|  | 105 | 6 - 6   |         |         |

Fuente: Elaboración propia (2011).

Las dosificaciones para cada una de las probetas están presentadas en las tablas N° 26, 27, 28

**Tabla 26.** Dosificación de probetas para evaluación de estabilidad – flujo R.A.P Tipo 1.

| DOSIFICACIÓN                                    | R.A.P 1 | PESO PROBETA (gr) |    |    | 1672.81  |
|---|---------|-------------------|----|----|----------|
| DOSIFICACION lt/m <sup>3</sup>                  |         | 60                | 75 | 90 | 105      |
| Centímetros cúbicos Emulsión (cm <sup>3</sup> ) |         |                   |    |    | 86.489   |
| Gramos Emulsión                                 |         |                   |    |    | 88.219   |
| Gramos Agua                                     |         |                   |    |    | 0        |
| % Emulsión                                      |         |                   |    |    | 5.274    |
| % Agua  |         |                   |    |    | 0        |
|   |         |                   |    |    |          |
|   |         |                   |    |    |          |
|   |         |                   |    |    |          |
|   |         |                   |    |    |          |
|   |         |                   |    |    |          |
|   |         |                   |    |    |          |
| Gramos Fresado                                  |         |                   |    |    | 1584.591 |

Fuente: Elaboración propia (2011).

**Tabla 27.** Dosificación de probetas para evaluación de estabilidad-flujo R.A.P Tipo 2.

| DOSIFICACIÓN R.A.P 2                            | PESO PROBETA (gr) |    |           | 1678.43    |
|---|-------------------|----|-----------|------------|
|   | 60                | 75 | 90        |            |
| <b>DOSIFICACION Lt/m<sup>3</sup></b>            |                   |    | <b>90</b> | <b>105</b> |
| Centímetros cúbicos Emulsión (cm <sup>3</sup> ) |                   |    | 74.133    |            |
| Gramos Emulsión                                 |                   |    | 75.616    |            |
| Gramos Agua                                     |                   |    | 0         |            |
| % Emulsión                                      |                   |    | 4.505     |            |
| % Agua  |                   |    | 0         |            |
|   |                   | ↓  |           |            |
| Gramos Fresado                                  |                   |    | 1602.814  |            |

Fuente: Elaboración propia (2011).

**Tabla 28.** Dosificación de probetas para evaluación de estabilidad-flujo R.A.P Tipo 3.

| DOSIFICACIÓN R.A.P 3                            | PESO PROBETA (gr) |    |           | 1600.23    |
|---|-------------------|----|-----------|------------|
|   | 60                | 75 | 90        |            |
| <b>DOSIFICACION Lt/m<sup>3</sup></b>            |                   |    | <b>90</b> | <b>105</b> |
| Centímetros cúbicos Emulsión (cm <sup>3</sup> ) |                   |    | 74.133    |            |
| Gramos Emulsión                                 |                   |    | 75.616    |            |
| Gramos Agua                                     |                   |    | 0         |            |
| % Emulsión                                      |                   |    | 4.505     |            |
| % Agua  |                   |    | 0         |            |
|   |                   | ↓  |           |            |
| Gramos Fresado                                  |                   |    | 1528.137  |            |

Fuente: Elaboración propia (2011).

A partir de los valores obtenidos se establecieron las condiciones de resistencia conservada y se compararon con los datos disponibles en la bibliografía existente.

#### **4.4.2.2 COMPACTACIÓN ESTÁTICA**

Para la compactación estática se analizan la misma distribución del número de probetas presentadas en la tabla 29.

**Tabla 29.** Distribución del número de probetas valoración de inmersión - compresión en compactación estática.

| NÚMERO DE PROBETAS PARA INMERSIÓN COMPRESIÓN<br>(Estado Seco - Saturado) |         |         |         |
|--|---------|---------|---------|
| R.A.P TIPO   | R.A.P 1 | R.A.P 2 | R.A.P 3 |
| CONTENIDO DE EMULSIÓN ASFÁLTICA EN<br>(lt/m <sup>3</sup> ) DE R.A.P.     | 75      | 6 - 6   |         |
|  | 90      | 6 - 6   |         |

Fuente: Elaboración propia (2011).

Las dosificaciones para cada una de las probetas para compactación estática están presentadas en la tabla N° 30, 31.

**Tabla 30.** Dosificación de probetas para evaluación de inmersión – compresión R.A.P Tipo 1.

| DOSIFICACIÓN R.A.P 1                            | PESO PROBETA (gr) |           |           | 1948.9     |
|---|-------------------|-----------|-----------|------------|
| <b>DOSIFICACION Lt/m<sup>3</sup></b>            | <b>60</b>         | <b>75</b> | <b>90</b> | <b>105</b> |
| Centímetros cúbicos Emulsión (cm <sup>3</sup> ) |                   | 61.778    |           |            |
| Gramos Emulsión                                 |                   | 63.013    |           |            |
| Gramos Agua                                     |                   | 24.687    |           |            |
| % Emulsión                                      |                   | 3.233     |           |            |
| % Agua  |                   | 1.267     |           |            |
|   |                   | ↓         |           |            |
| Gramos Fresado                                  |                   | 1861.200  |           |            |

Fuente: Elaboración propia (2011).

**Tabla 31.** Dosificación de probetas para evaluación de inmersión – compresión R.A.P Tipo 2.

| DOSIFICACIÓN R.A.P 2                            | PESO PROBETA (gr) |           |           | 1814.73    |
|---|-------------------|-----------|-----------|------------|
| <b>DOSIFICACION Lt/m<sup>3</sup></b>            | <b>60</b>         | <b>75</b> | <b>90</b> | <b>105</b> |
| Centímetros cúbicos Emulsión (cm <sup>3</sup> ) |                   |           |           | 86.489     |
| Gramos Emulsión                                 |                   |           |           | 88.219     |
| Gramos Agua                                     |                   |           |           | 0.000      |
| % Emulsión                                      |                   |           |           | 4.861      |
| % Agua  |                   |           |           | 0.000      |
|   |                   |           |           | ↓          |
| Gramos Fresado                                  |                   |           |           | 1726.511   |

Fuente: Elaboración propia (2011).

#### 4.4.3 MÓDULO DINÁMICO

La valoración del módulo dinámico se hizo únicamente para probetas compactadas de forma giratoria, ya que presentaron mayor regularidad en las caras de aplicación de la fuerza (requisito indispensable en el desarrollo del ensayo). La cantidad de probetas está presentada en la tabla N°32, dichas probetas fueron elaboradas siguiendo las normas “Preparación de especímenes asfálticos para el ensayo del módulo dinámico I.N.V. E – 753 – 07” y “módulo dinámico de mezclas asfálticas I.N.V. E – 754 – 07”.

**Tabla 32.** Cantidad de probetas a realizar para módulos dinámicos.

| NÚMERO DE PROBETAS PARA MÓDULO DINÁMICO (Compactación Dinámica)      |     |         |         |         |
|--|-----|---------|---------|---------|
| R.A.P TIPO   |     | R.A.P 1 | R.A.P 2 | R.A.P 3 |
|  | 75  | 3       | 3       | 3       |
| CONTENIDO DE EMULSIÓN ASFÁLTICA EN<br>(lt/m <sup>3</sup> ) DE R.A.P. | 90  | 3       | 3       | 3       |
|  | 105 | 3       | 3       | 3       |

Fuente: *Elaboración propia (2011).*

Las Dosificaciones para la elaboración de las probetas se presentan en las tablas N° 33, 34, 35.

**Tabla 33.** Dosificación de probetas para evaluación de módulos dinámicos R.A.P Tipo 1.

| DOSIFICACIÓN R.A.P 1                               |          | PESO<br>PROBETA (gr) | 3345.62  |
|--|----------|----------------------|----------|
| DOSIFICACION lt/m <sup>3</sup>                     | 75       | 90                   | 105      |
| Centímetros cúbicos Emulsión<br>(cm <sup>3</sup> ) | 123.556  | 148.267              | 172.978  |
| Gramos Emulsión                                    | 126.027  | 151.232              | 176.437  |
| Gramos Agua  | 24.526   | 0                    | 0        |
| % Emulsión   | 3.767    | 4.52                 | 5.274    |
| % Agua   | 0.733    | 0                    | 0        |
|  | ↓        | ↓                    | ↓        |
| Gramos Fresado                                     | 3195.067 | 3194.388             | 3169.183 |

Fuente: *Elaboración propia (2011).*

**Tabla 34.** Dosificación de probetas para evaluación de módulos dinámicos R.A.P Tipo 2.

| DOSIFICACIÓN R.A.P 2                            |    | PESO PROBETA (gr) |          | 3356.86  |
|---|----|-------------------|----------|----------|
| DOSIFICACION lt/m <sup>3</sup>                  | 60 | 75                | 90       | 105      |
| Centímetros cúbicos Emulsión (cm <sup>3</sup> ) |    | 123.556           | 148.267  | 172.978  |
| Gramos Emulsión                                 |    | 126.027           | 151.232  | 176.437  |
| Gramos Agua                                     |    | 25.032            | 0        | 0        |
| % Emulsión                                      |    | 3.754             | 4.505    | 5.256    |
| % Agua  |    | 0.746             | 0        | 0        |
|   |    | ↓                 | ↓        | ↓        |
| Gramos Fresado                                  |    | 3205.801          | 3205.628 | 3180.423 |

Fuente: Elaboración propia (2011).

**Tabla 35.** Dosificación de probetas para evaluación de módulos dinámicos R.A.P Tipo 3.

| DOSIFICACIÓN R.A.P 3                            |    | PESO PROBETA (gr) |          | 3200.46  |
|---|----|-------------------|----------|----------|
| DOSIFICACION lt/m <sup>3</sup>                  | 60 | 75                | 90       | 105      |
| Centímetros cúbicos Emulsión (cm <sup>3</sup> ) |    | 123.556           | 148.267  | 172.978  |
| Gramos Emulsión                                 |    | 126.027           | 151.232  | 176.437  |
| Gramos Agua                                     |    | 17.994            | 0        | 0        |
| % Emulsión                                      |    | 3.938             | 4.725    | 5.513    |
| % Agua  |    | 0.562             | 0        | 0        |
|   |    | ↓                 | ↓        | ↓        |
| Gramos Fresado                                  |    | 3056.439          | 3049.228 | 3024.023 |

Fuente: Elaboración propia (2011).

#### **4.5 DETERMINACIÓN DE LAS PROBETAS CON MEJOR RESPUESTA ANTE LAS SOLICITACIONES MECÁNICAS.**

A partir de los resultados obtenidos en el ensayo de estabilidad - flujo para ambos casos de compactación, se seleccionan las combinaciones entre granulometría y dosificación de emulsión que mejores resultados arrojaron, dichas probetas se sometieron a evaluación de susceptibilidad al agua mediante el ensayo de inmersión compresión. Finalmente, se evalúan todas las combinaciones de R.A.P y emulsión asfáltica compactadas de forma dinámica. Los resultados se obtuvieron mediante la formulación propuesta por cada una de las normas, y los valores

obtenidos se pueden observar en el aparte de resultados. La forma de valoración para cada ensayo se plantea así:

**DENSIDADES:** Los valores que fueron tenidos en cuenta para comparar la respuesta mecánica de los ensayos adelantados en el presente trabajo respecto de las otras fuentes bibliográficas, son los siguientes:

Valores de Densidad promedio para compactación estática según la tabla 14, (2.16, 2.17, 2.18) y valores de densidad promedio en compactación Dinámica de acuerdo a la Tabla 15, (2.11, 2.14, 2.16). Alonso (2005).

**ESTABILIDAD FLUJO:** Los rangos de evaluación de este parámetro son los presentados en la tabla 36, la cual se fundamenta en el Artículo 450 de la normativa INVIAS 2007.

**Tabla 36.** Criterios de Diseño de Mezcla Asfáltica en Caliente

| CARACTERISTICA             | NORMA DE ENSAYO INV | MEZCLAS DENSAS, SEMIDENSAS Y GRUESAS |       |         | MEZCLA DE ALTO MODULO |
|----------------------------|---------------------|--------------------------------------|-------|---------|-----------------------|
|                            |                     | CATEGORÍA DE TRÁNSITO                |       |         |                       |
|                            |                     | NT1                                  | NT2   | NT3     |                       |
| Compactación (golpes/cara) | E-748               | 50                                   | 75    | 75      | 75                    |
| Estabilidad mínima (kg)    | E-748               | 500                                  | 750   | 900     | 1500                  |
| Flujo (mm)                 | E-748               | 2 - 4                                | 2 - 4 | 2 - 3.5 | 2 - 3                 |

*Fuente: Art 450 INVIAS - 07*

**INMERSIÓN – COMPRESIÓN:** Los rangos de comparación de este parámetro son los presentados en la tabla 19 (Soto & Peña, 2004), tabla 37 (Potti, 1999) y de acuerdo a la normativa colombiana:

- ✓ Resistencia de probetas curadas en seco (mínima): 20 kg/cm<sup>2</sup>
- ✓ Resistencia conservada tras curado húmedo (mínima): 75 %



**Tabla 37.** Resistencias Inmersión - Compresión

| Categoría de tráfico HGV | Seco (Mpa) | Después de Inmersión (Mpa) | Conservado (%) |
|--------------------------|------------|----------------------------|----------------|
| T1 (o tráfico base) y T2 | 3          | 2.5                        | 75             |
| T3, T4 y bermas          | 2.5        | 2                          | 70             |

Fuente: Potti (1999).

MÓDULOS DINÁMICOS: Los valores que fueron tenidos en cuenta para comparar la respuesta dinámica de los ensayos adelantados en el presente trabajo respecto de las otras fuentes bibliográficas, son los siguientes:

- ✓ Tabla 20, rangos de valores de módulos (Soto & Peña 2004),
- ✓ “Es frecuente admitir un módulo entre 2500 MPa. y 4000 MPa.... en cuanto al uso del reciclaje en frío” (Alonso, 2005).
- ✓ “2500 MPa a 20°C, de acuerdo con la norma Andaluza.” (Potti, 1999).

#### **4.6 ESTANDARIZAR LAS CONDICIONES IDEALES DE GRADACIÓN DEL MATERIAL DE FRESADO Y DE DOSIFICACIÓN DE LIGANTE EN FUNCIÓN DE LAS RESPUESTAS MECÁNICAS EVIDENCIADAS.**

Considerando las respuestas obtenidas tanto en granulometría como en las diferentes respuestas a partir de los ensayos, se tabuló una serie de sugerencias que tienden a garantizar el mejor desempeño de cada una de las muestras de R.A.P, pero que no necesariamente dan cumplimiento a la normatividad. Precisamente, el criterio de calificación de una determinada muestra de fresado en la vía será a partir de su análisis granulométrico, dicho resultado deberá estar dentro del rango (-6,+6 % para arenas y gruesos, y -4,+4% para finos) y será asociado entonces con alguna de las granulometrías obtenidas en este estudio.

## 5. RESULTADOS

En el presente capítulo se muestran los resultados de los ensayos de caracterización de los materiales utilizados y los resultados obtenidos en diferentes ensayos de laboratorio desarrollados sobre varias series de probetas de material estabilizado con emulsión asfáltica.

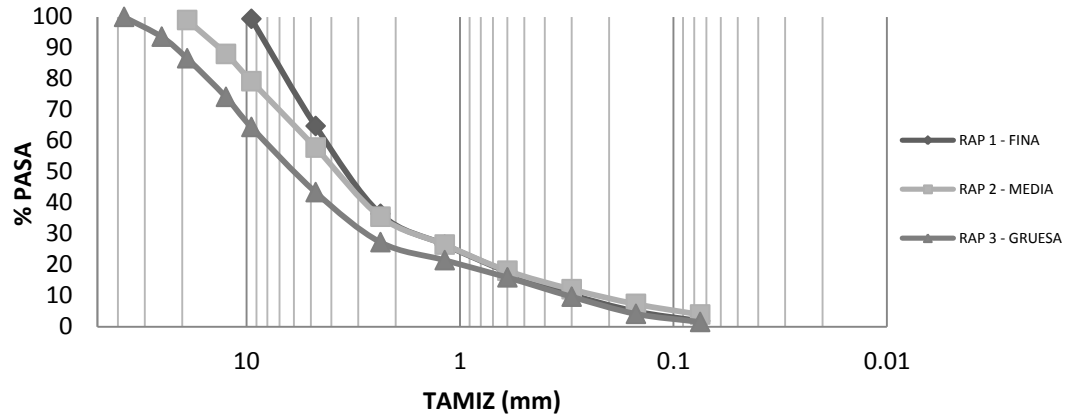
### 5.1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

El análisis granulométrico pretende reflejar las diferencias respecto del tamaño de las partículas que presentaron las tres (3) muestras de R.A.P. que fueron seleccionadas para el desarrollo del presente trabajo. Las distribuciones granulométricas obtenidas se presentan en la tabla 38 y la Figura 1.

**Tabla 38.** Análisis granulométrico para las tres (3) tipos de fresado.

| COMPARATIVO GRANULOMÉTRICO |         |         |         |
|----------------------------|---------|---------|---------|
| TAMIZ<br>(mm)              | % PASA  |         |         |
|                            | R.A.P 1 | R.A.P 2 | R.A.P 3 |
| 37.5                       | 100     | 100     | 100     |
| 25                         | 100     | 99.77   | 93.61   |
| 19                         | 100     | 98.98   | 86.65   |
| 12.5                       | 99.88   | 88.03   | 74.19   |
| 9.5                        | 99.36   | 79.24   | 64.48   |
| 4.75                       | 64.78   | 57.81   | 43.44   |
| 2.36                       | 36.43   | 35.5    | 27.3    |
| 1.18                       | 26.46   | 26.51   | 21.48   |
| 0.6                        | 17.74   | 18.07   | 15.94   |
| 0.3                        | 10.37   | 12.1    | 9.69    |
| 0.15                       | 4.95    | 7.36    | 4.15    |
| 0.075                      | 1.84    | 3.93    | 1.53    |
| PASA                       | 0.24    | 0.8     | 0.26    |

*Fuente: Elaboración propia (2011).*



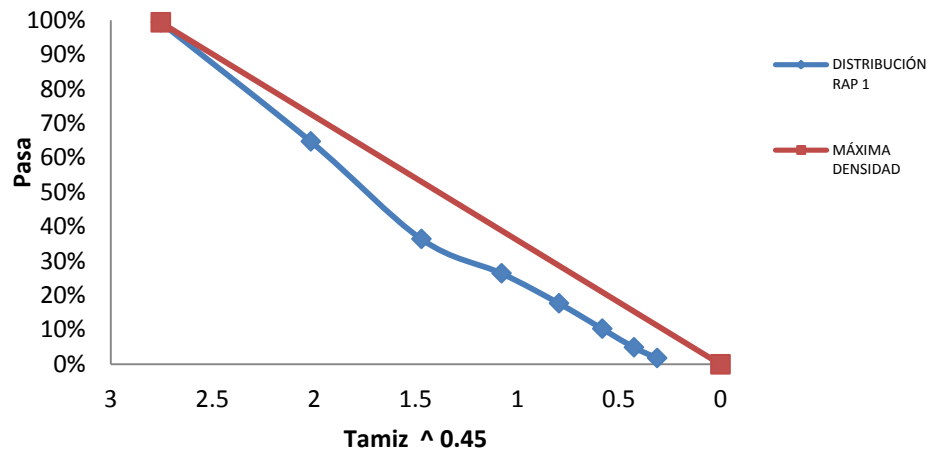
**Figura 1.** Análisis granulométrico para las tres (3) muestras de R.A.P.  
Fuente: Elaboración propia (2011).

Tal como se observó en los centros de acopio, el material presenta 3 distribuciones y tamaños máximos diferentes, útiles para el estudio de susceptibilidad por efecto del cambio granulométrico.

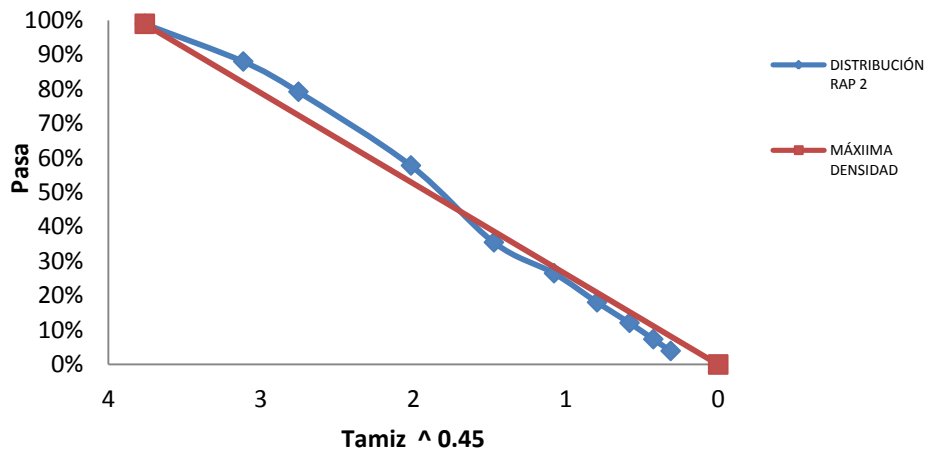
Como resultado de la comparación de las granulometrías de los 3 tipos R.A.P. con diversas fuentes y diversos usos de materiales granulares, se presenta el Anexo Número 2, denominado comparativo granulométrico.

### 5.3.1 LINEA DE MAXIMA DENSIDAD

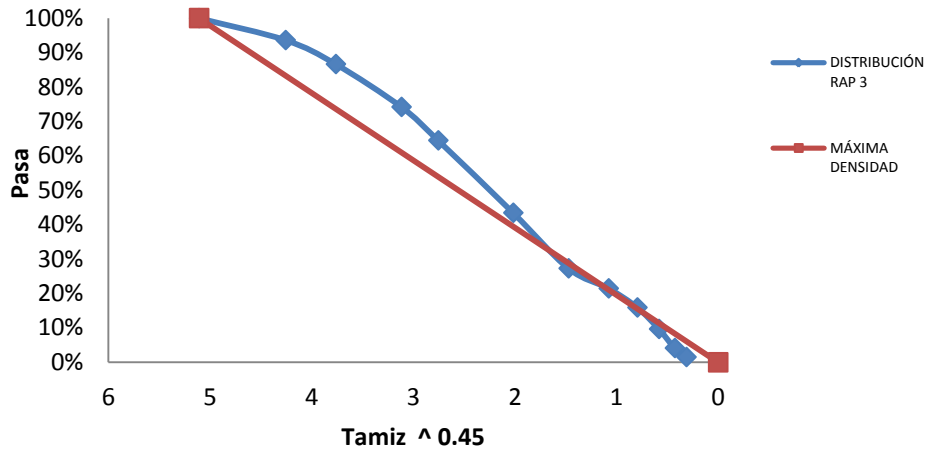
A partir del concepto de línea de máxima densidad (acomodamiento de partículas de una mezcla de agregados que menor cantidad de vacíos presenta) propuesto por la metodología Superpave Asphalt Institute et al., (1996), se adelantó el cálculo de las mismas en función de los tamaños máximos que presenta cada uno de los tres tipos de R.A.P. estudiados y se compararon con la distribución granulométrica real de dichas muestras, obteniéndose como resultados las figuras 2, 3, 4



**Figura 2.** Comparación Línea de Máxima Densidad y Distribución granulométrica real RAP 1  
Fuente: Elaboración Propia (2011)



**Figura 3.** Comparación Línea de Máxima Densidad y Distribución granulométrica real RAP 2  
Fuente: Elaboración Propia (2011)



**Figura 4.** Comparación Línea de Máxima Densidad y Distribución granométrica real RAP 3  
Fuente: Elaboración Propia (2011)

Es apreciable que ninguna de las distribuciones reales es completamente regular respecto de la línea de máxima tendencia, presentándose valores por encima y por debajo de la misma, lo que hace que su valoración requiera ser analizada en cada uno de los tamaños de tamiz que componen la franja granulométrica. Así pues se plantea el análisis por medio del índice de áreas equivalentes.

A primera vista se observa que la distribución granométrica del R.A.P. tipo 2, cuyo tamaño máximo es de 19 mm, es la que más semejanza tiene con la línea de máxima densidad respectiva, aun cuando presenta desfases por encima y por debajo, de lo que se extrae que ésta es la granulometría que mayores valores de densidad ha de presentar (tendencia corroborada con los ensayos de laboratorio respectivos).

## 5.2 EMULSIÓN ASFÁLTICA

Se presenta la evaluación de la emulsión Asfáltica utilizada para la respectiva estabilización del R.A.P., haciendo el comparativo respectivo de la normativa colombiana. Se plasman resultados de tres muestras, toda vez que la estabilización del material se hizo en diferentes etapas de acuerdo a la programación propuesta para la ejecución de los ensayos, (toma de muestras en diferentes tiempos a lo largo del desarrollo del presente proyecto). Las propiedades de los ensayos de la emulsión asfáltica, se presentan en la tabla 39.

**Tabla 39.** Características Técnicas de la emulsión asfáltica utilizada.

| ENSAYO / ANÁLISIS   | UNIDAD | NORMA DE ENSAYO INV | ESPECIFICACIÓN |          | MUESTREO # 1 | MUESTREO # 2 | MUESTREO # 3 | FRECUENCIA |
|---|--------|---------------------|----------------|----------|--------------|--------------|--------------|------------|
|   |        |                     | MIN            | MAX      |              |              |              |            |
| Contenido de Asfalto  | %      | Evaporación         | 57             | -        | 60.95        | 59.39        | 60.42        | CADA LOTE  |
| Viscosidad Saybolt furol a 25°C   | s      | E-763               | -              | 200      | 19.3         | 25.6         | 25.6         | QUINCENAL  |
| Contenido de Agua en Volumen  | %      | E-761               | -              | 43       | 39.97        | 39.97        | 39.97        | CADA LOTE  |
| Estabilidad de Almacenamiento - Sedimentación a los 7 días                      | %      | E-764               | -              | 5        | 1.98         | 1.98         | 1.98         | QUINCENAL  |
| Destilación - Contenido de Asfalto residual                                     | %      | E-762               | 57             | -        | 60.03        | 60.03        | 60.03        | MENSUAL    |
| Destilación - Contenido de Disolventes Tamizado - Retenido Tamiz N° 20 (850 µm) | %      | E-765               | Reportar       | 0        | 0            | 0            | 0            | MENSUAL    |
| Rotura - Dioctilsulfosuccinato sódico   | %      | E-766               | -              | 0.1      | < 0.1        | < 0.1        | < 0.1        | CADA LOTE  |
| Carga de Partícula  |        | E-767               | Reportar       | 0.2      | 0.2          | 0.2          | 0.2          | SEMESTRAL  |
| pH  |        | E-768               | Positiva       | Positiva | Positiva     | Positiva     | Positiva     | MENSUAL    |
|   |        |                     | -              | 6        | 2.81         | 2.76         | 3.8          | CADA LOTE  |
| ENSAYOS SOBRE EL RESIDUO DE DESTILACIÓN   |        |                     |                |          |              |              |              |            |
|   |        |                     | 60             | 100      |              |              |              |            |
| Penetración (25°C, 100 g, 5s)   | 0.1 mm | E-706               | 100            | 250      | 62           | 62           | 62           | MENSUAL    |
| Ductilidad (25°C, 5 cm/min)   | cm     | E-702               | 40             | -        | 85.5         | 85.5         | 85.5         | MENSUAL    |
| Solubilidad en tricloroetileno  | %      | E-713               | 97             | -        | NA           | NA           | NA           | SEMESTRAL  |

*Fuente: Doble A Ingeniería (2011).*

### 5.3 HUMEDADES

Las muestras fueron evaluadas respecto del contenido de humedad presente al momento de la toma de muestras desde los lugares de acopio, con cantidades y procedimientos iguales para los tres tamaños arrojando los siguientes resultados de la tabla 40.

**Tabla 40.** Humedades de cada tipo de fresado.

|                      | R.A.P # 1     |           | R.A.P # 2     |           | R.A.P # 3     |           |
|----------------------|---------------|-----------|---------------|-----------|---------------|-----------|
|                      | TOMA DE DATOS | HUMEDAD % | TOMA DE DATOS | HUMEDAD % | TOMA DE DATOS | HUMEDAD % |
| Muestra (M):         | 1000 g        |           | 1000 g        |           | 1000 g        |           |
| Peso Recipiente (R): | 119 g         | 0.2       | 74 g          | 0.3       | 109 g         | 0.3       |
| Peso R + M           | 1119 g        |           | 1074 g        |           | 1109 g        |           |
| Peso Seco + R        | 1117 g        |           | 1071 g        |           | 1106 g        |           |

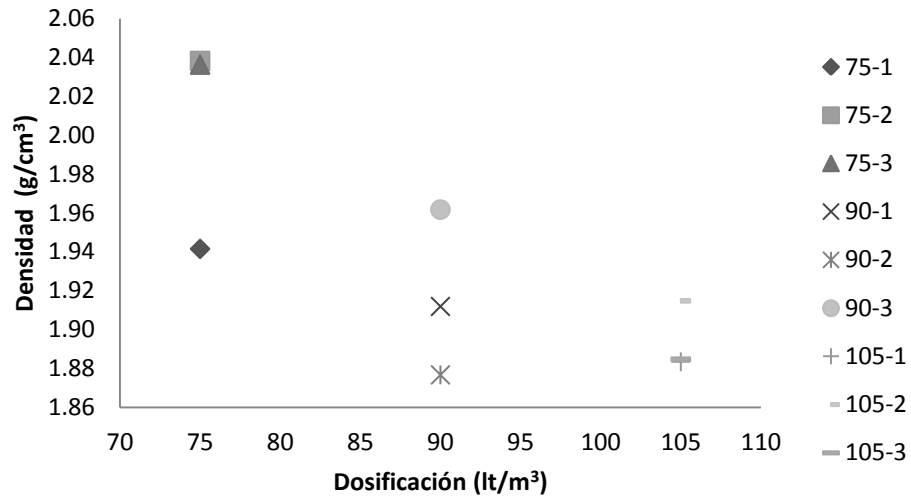
*Fuente: Elaboración Propia (2011).*

### 5.4 DENSIDAD

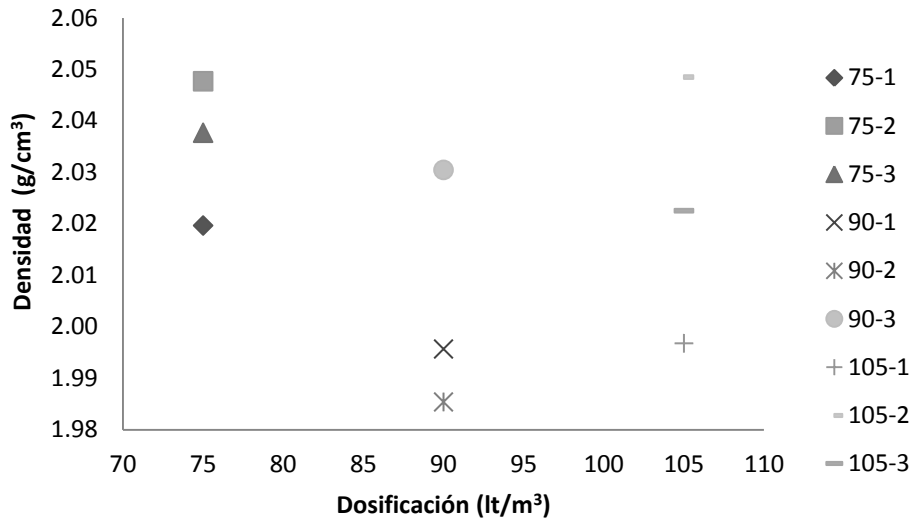
La evaluación de densidad se adelantó tanto para el proceso de compactación estática como para compactación dinámica, con cada uno de los tres (3) tipos de R.A.P. y cada una de las dosificaciones de Emulsión. A continuación se presentan los datos obtenidos junto con un análisis detallado del comportamiento de los valores (tendencias).

#### 5.4.1 COMPACTACIÓN ESTÁTICA

Los resultados de densidad de los tres (3) tipos de R.A.P. implementando el método de compactación estática son los siguientes, presentados en las figuras 5, 6 y 7.

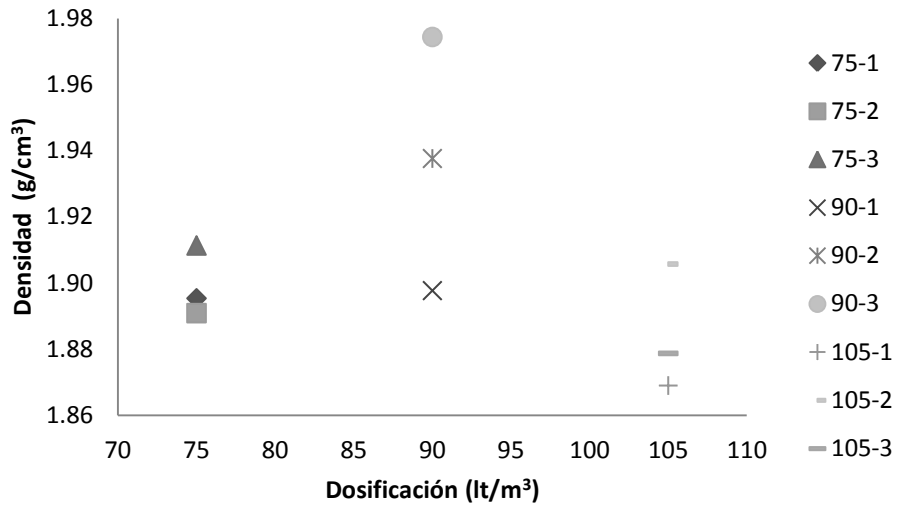


**Figura 5.** Resultados de densidad R.A.P Tipo 1 a diferentes dosificaciones en compactación estática. Fuente: Elaboración propia (2011).



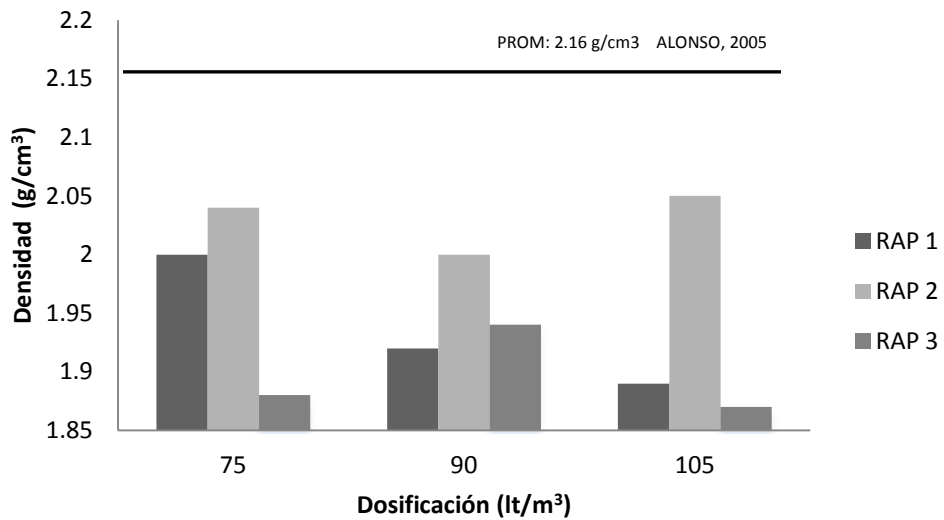
**Figura 6.** Resultados de densidad R.A.P Tipo 2 a diferentes dosificaciones en compactación estática. Fuente: Elaboración propia (2011).





**Figura 7.** Resultados de densidad R.A.P Tipo 3 a diferentes dosificaciones en compactación estática.  
Fuente: Elaboración propia (2011).

A partir de la valoración individual por tipo de muestra, se calcularon los resultados de densidad promedio para cada tipo de R.A.P. que se ven reflejados en la figura 8.



**Figura 8.** Comparación de Densidades promedio compactación estática.  
Fuente: Elaboración propia (2011).

Para todos los casos de dosificación se observa que la muestra del R.A.P 2 tiene valores superiores de densidad.

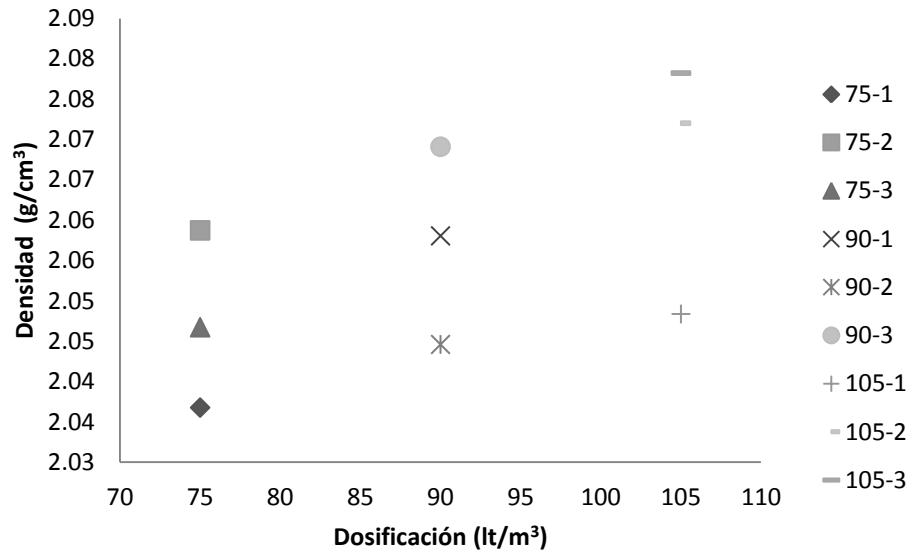
La dosificación de 75 litros para el tipo de R.A.P 1 y 2 es la que presentó mayores valores. Dicho fenómeno soportado en lo siguiente:

- ✓ Tiempo de rompimiento 2 semanas
- ✓ A mayor cantidad de agua mayor cantidad de vacíos
- ✓ A mayor dosificación mayor cantidad de agua

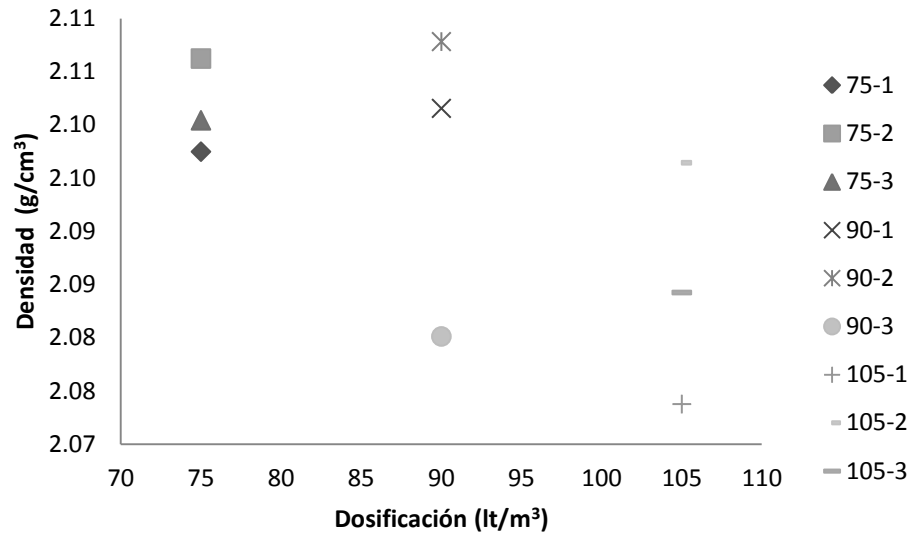
Lo que llevó a concluir que a mayores dosificaciones de emulsión menores valores de densidad, sin embargo, un cambio en la tendencia ocurre en el R.A.P 3 en donde la dosificación de 90 lt es aquella que resulta ser superior.

#### 5.4.2 COMPACTACIÓN DINÁMICA

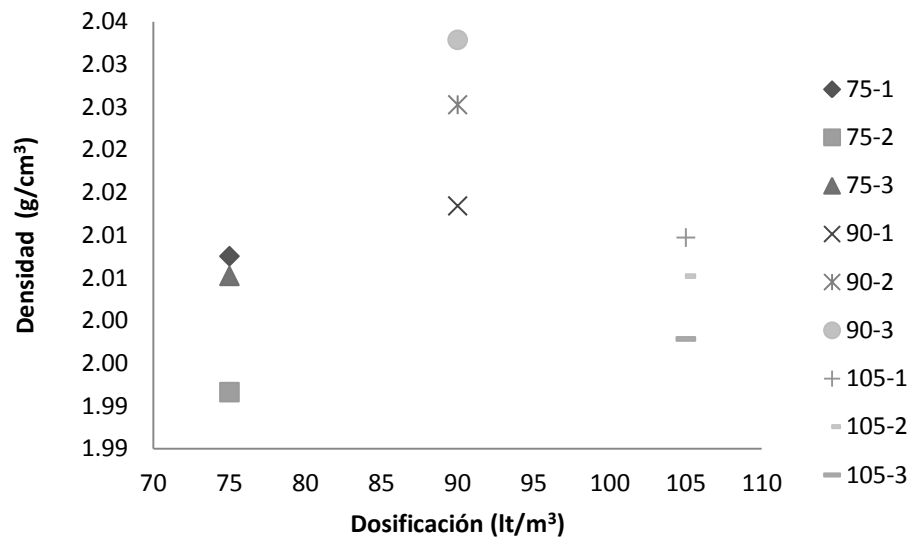
Los resultados de densidad de los tres (3) tipos de R.A.P. implementando el método de Compactación dinámica, se muestran en las figuras 9, 10 y 11.



**Figura 9.** Resultados de densidad R.A.P Tipo 1 a diferentes dosificaciones en compactación dinámica. Fuente: Elaboración propia (2011).

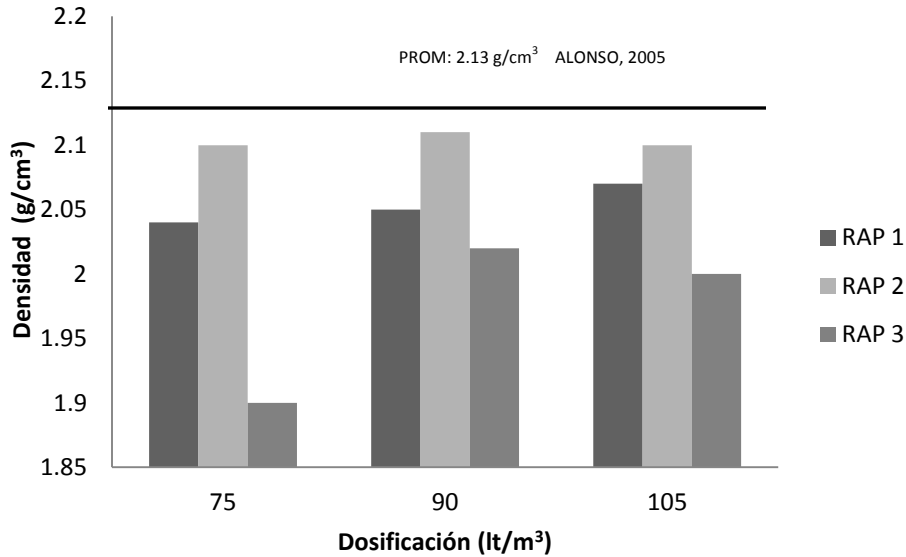


**Figura 10.** Resultados de densidad R.A.P Tipo 2 a diferentes dosificaciones en compactación dinámica.  
Fuente: Elaboración propia (2011).



**Figura 11.** Resultados de densidad R.A.P Tipo 3 a diferentes dosificaciones en compactación dinámica.  
Fuente: Elaboración propia (2011).

Al igual que en la compactación Estática, se calcularon los resultados de densidad promedio para cada tipo de R.A.P., valores reflejados en la figura 12.



**Figura 12.** Comparación de densidades promedios Compactación Dinámica.  
Fuente: Elaboración propia (2011)

Para cada tipo de R.A.P existe una dosificación que genera los mayores valores de densidad de la siguiente manera:

- ✓ R.A.P 1, la mayor densidad se da con dosificación de 105 lt
- ✓ R.A.P 2, la mayor densidad se da con dosificación de 75 lt
- ✓ R.A.P 3, la mayor densidad se da con dosificación de 90 lt

Se pierde el concepto de la generación de mayor cantidad de vacíos por mayor cantidad de agua, tomando en cuenta que para el R.A.P tipo 1 se obtuvo una mayor densidad con la dosificación alta (105 litros), lo que genera una oposición a la hipótesis que expresa que a mayor cantidad de emulsión hay mayor cantidad de agua y por ende mayor cantidad de vacíos. Dicho fenómeno se explica al tener en cuenta que la gradación del R.A.P tipo 1 presenta una mayor superficie específica, por ende la emulsión tiene mayores áreas de adherencia con los agregados y a su vez más opciones de contacto con el oxígeno lo que genera altas velocidades de rompimiento, reduciendo la cantidad de agua potencialmente retirada de la emulsión.

Por otra parte se observa que en todas las dosificaciones, el R.A.P tipo 2 se constituye como el de mejor respuesta. De acuerdo a los valores obtenidos se conserva la secuencia R.A.P 2, 1 y 3 para las tres dosificaciones.

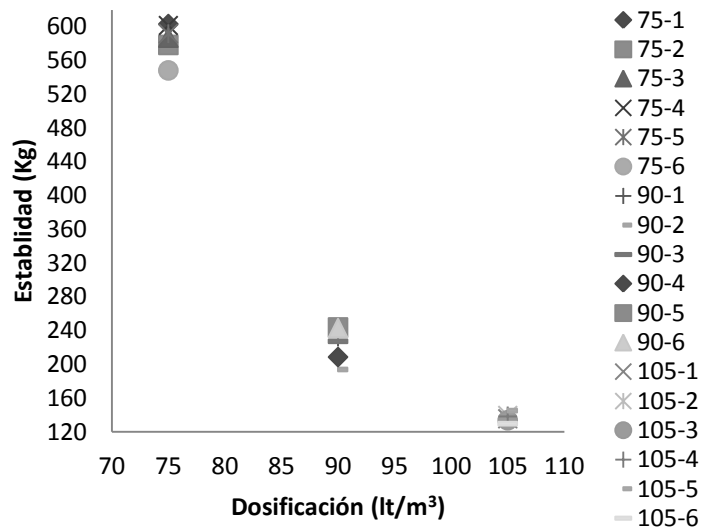
## 5.5 ESTABILIDAD – FLUJO

El análisis de estabilidad - flujo se adelantó para probetas elaboradas con método de compactación estática y dinámica, observando de forma individual y promedio cada uno de los parámetros.

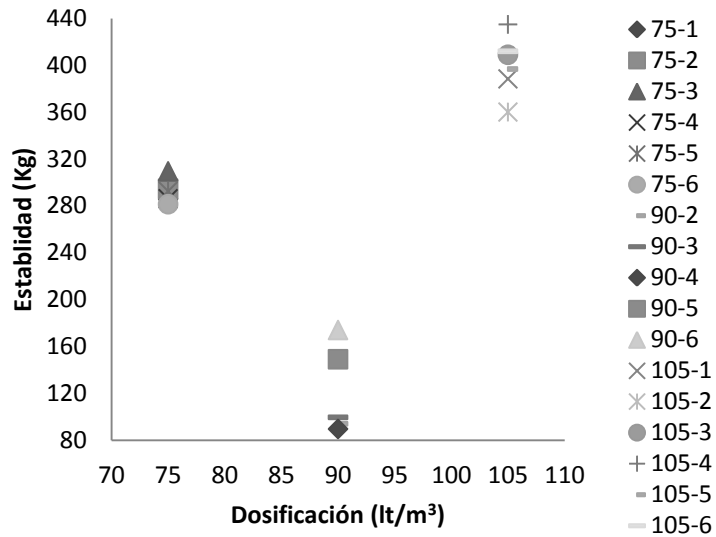
### 5.5.1 COMPACTACIÓN ESTÁTICA

#### 5.5.1.1 ESTABILIDAD

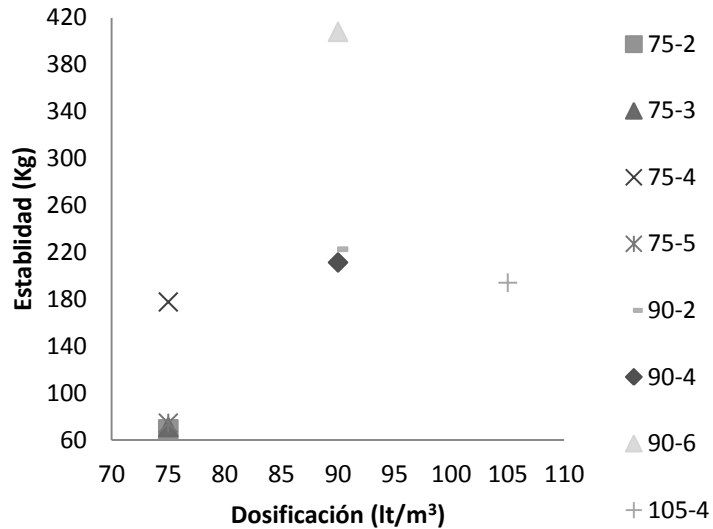
Los resultados de estabilidad como carga máxima al momento de la falla se muestran a continuación de forma individual y promedio, en la figuras 13, 14, 15 y 16.



**Figura 13.** Estabilidad en Kg para R.A.P tipo 1 a diferentes dosificaciones de emulsión.  
Fuente: Elaboración propia (2011).



**Figura 14.** Estabilidad en Kg para R.A.P tipo 2 a diferentes dosificaciones de emulsión.  
Fuente: Elaboración propia (2011).

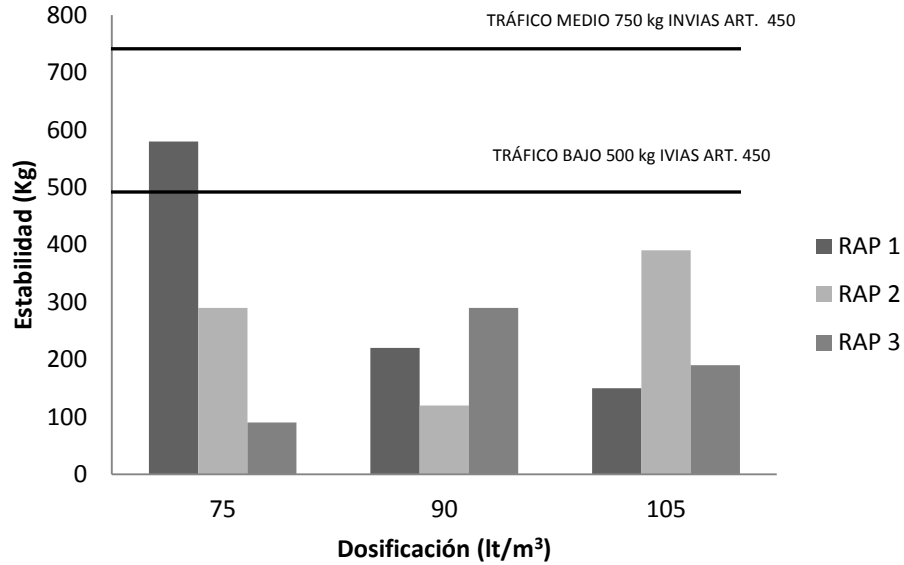


**Figura 15.** Estabilidad en Kg para R.A.P tipo 3 a diferentes dosificaciones de emulsión.  
Fuente: Elaboración propia (2011).

Aquellas probetas que no se muestran en las figuras de resultados individuales, fueron aquellas que presentaron un deterioro elevado previo a la ejecución del

ensayo, considerando el tiempo de inmersión y la temperatura que exige el procedimiento de la norma respectiva, razón por cual no se consideraron aptas.

A partir de la valoración individual, se obtuvieron entonces los resultados promedios de estabilidad.



**Figura 16.** Comparación de estabilidades promedio para los tres tipos de R.A.P.  
Fuente: Elaboración Propia (2011)

5.5.1.2 FLUJO

Los resultados de flujo como deformación máxima al momento de la falla se muestran a continuación de forma individual y promedio en las figuras 17, 18, 19 y 20.

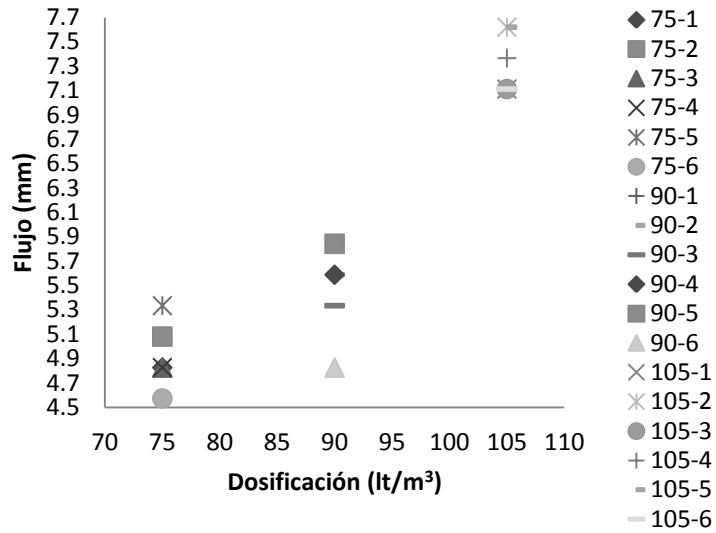


Figura 17. Flujo en mm R.A.P Tipo 1 para diferentes dosificaciones.  
Fuente: Elaboración propia (2011).

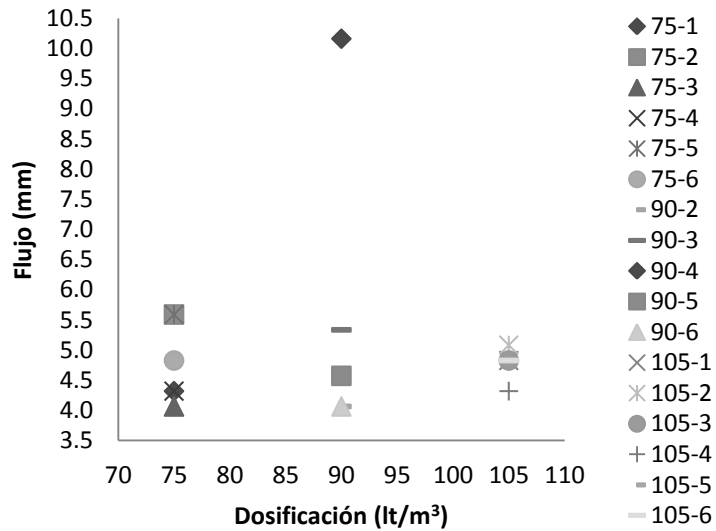
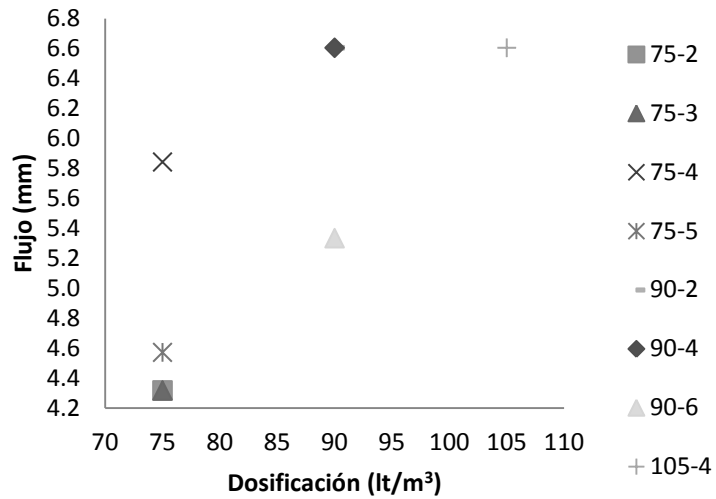


Figura 18. Flujo en mm R.A.P Tipo 2 para diferentes dosificaciones.  
Fuente: Elaboración propia (2011).

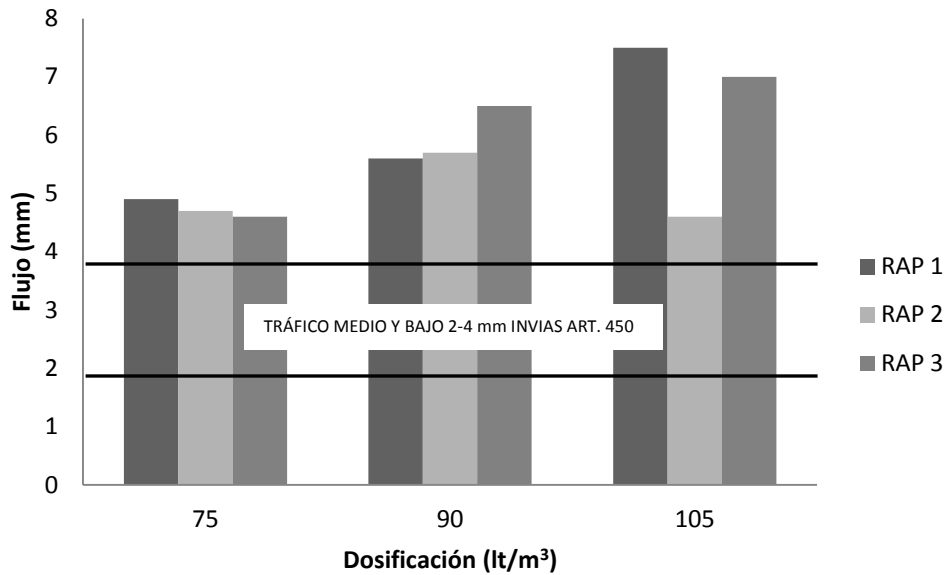




**Figura 19.** Flujo en mm R.A.P Tipo 3 para diferentes dosificaciones.  
Fuente: Elaboración propia (2011).

Resulta evidente que aquellas probetas que fueron descartadas por la valoración de la estabilidad, tampoco fueron tenidas en cuenta para el flujo, considerando que estos parámetros se evalúan de forma simultánea sobre el mismo espécimen.

Los valores promedio de flujo para las probetas compactadas estáticamente, se presentan a continuación:



**Figura 20.** Comparación de flujos promedio para los tres tipos de R.A.P.

Fuente: Elaboración propia (2011).

No existe una tendencia general que sea clara para el comportamiento de estabilidad y flujo respecto de las 3 dosificaciones de emulsión asfáltica y de los 3 tipos de R.A.P.

La única dosificación que presenta un comportamiento algo regular en ambos parámetros es la de 75 lt, la cual muestra que:

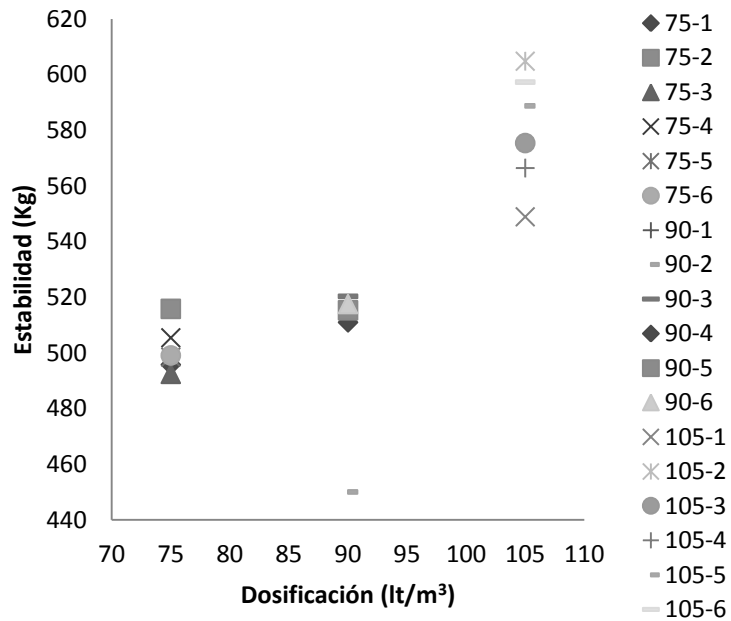
- ✓ A medida que la granulometría del R.A.P es fina, mayores son sus valores de estabilidad
- ✓ A medida que la granulometría del R.A.P es más gruesa, menores son sus valores de flujo
- ✓ La mayor estabilidad la presenta el R.A.P tipo 1 para una dosificación de 75 lt.
- ✓ El menor flujo lo presenta el R.A.P tipo 3 para una dosificación de 75 lt.

El comportamiento de las demás dosificaciones resulta ser bastante irregular tanto para estabilidad como para flujo.

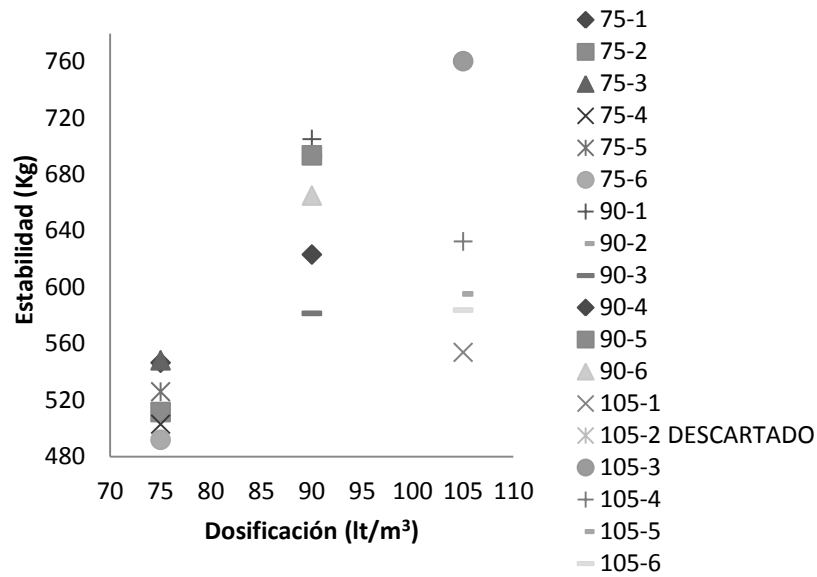
## 5.5.2 COMPACTACION DINÁMICA

### 5.5.2.1 ESTABILIDAD

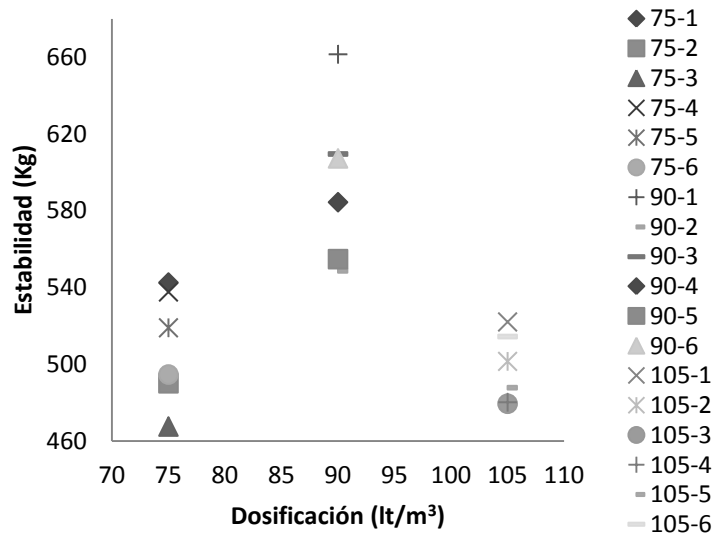
Los resultados de estabilidad como carga máxima al momento de la falla se muestran a continuación de forma individual y promedio, presentados los resultados en las figuras 21, 22, 23 y 24.



**Figura 21.** Estabilidad en Kg para R.A.P tipo 1 a diferentes dosificaciones de emulsión.  
Fuente: Elaboración propia (2011).

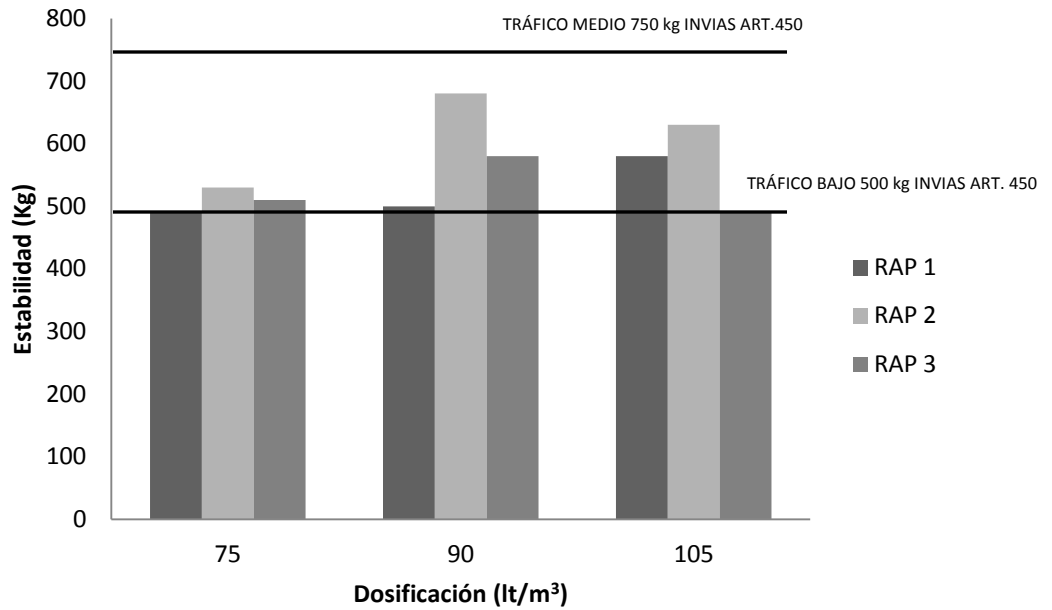


**Figura 22.** Estabilidad en Kg para R.A.P tipo 2 a diferentes dosificaciones de emulsión.  
Fuente: Elaboración propia (2011).



**Figura 23.** Estabilidad en Kg para R.A.P tipo 3 a diferentes dosificaciones de emulsión.  
Fuente: Elaboración propia (2011).

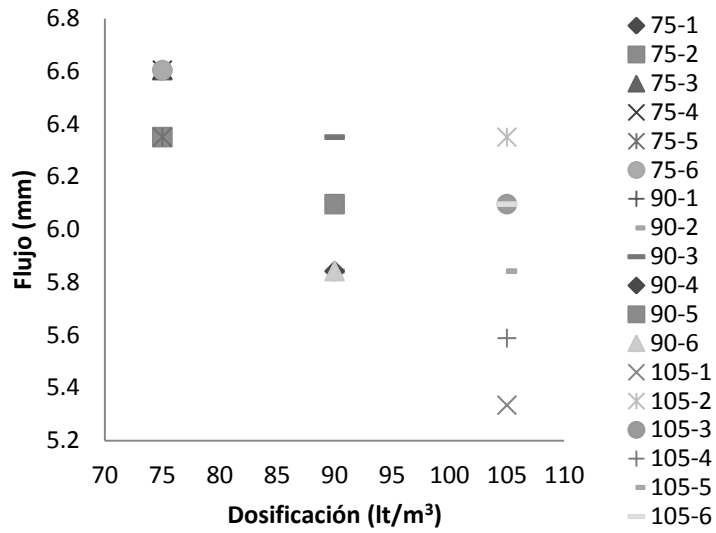
En este tipo de compactación también se presentó descarte de probetas, considerando el deterioro presentado al momento de iniciar el ensayo. La valoración promedio se muestra a continuación:



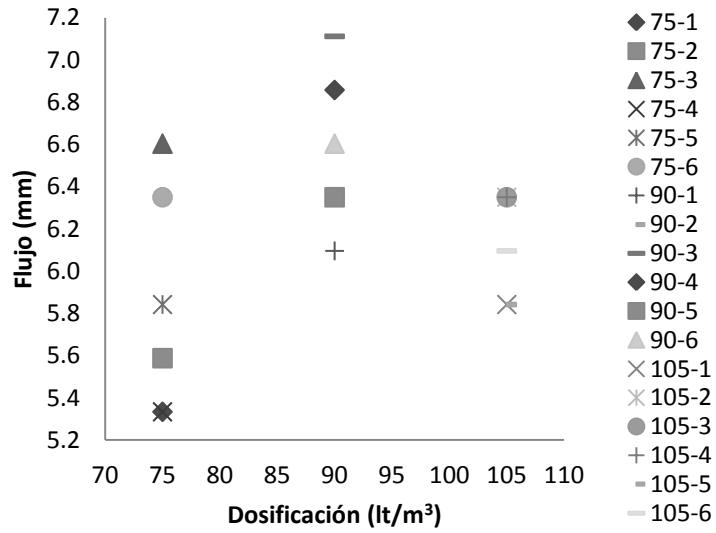
**Figura 24.** Comparación Estabilidades promedio para los tres (3) tipos de R.A.P.  
Fuente: Elaboración propia (2011).

### 5.5.2.2 FLUJO

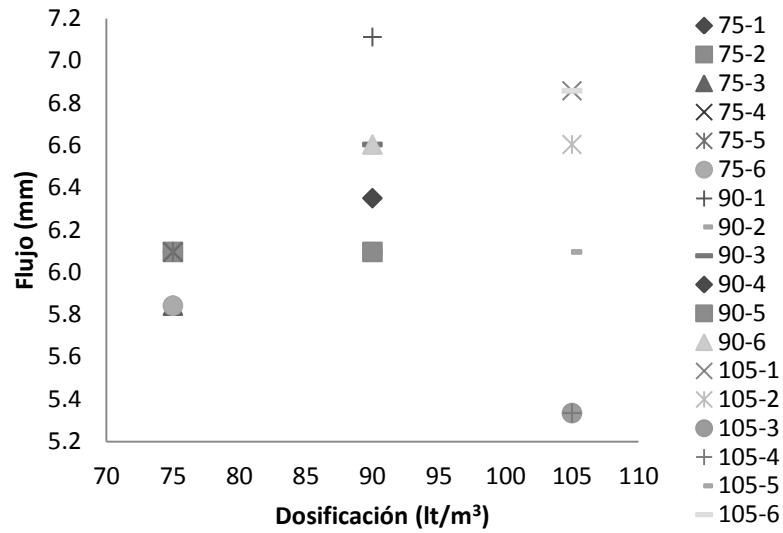
Los resultados de flujo como deformación máxima al momento de la falla se muestran a continuación de forma individual y promedio, en las figuras 25, 26, 27 y 28.



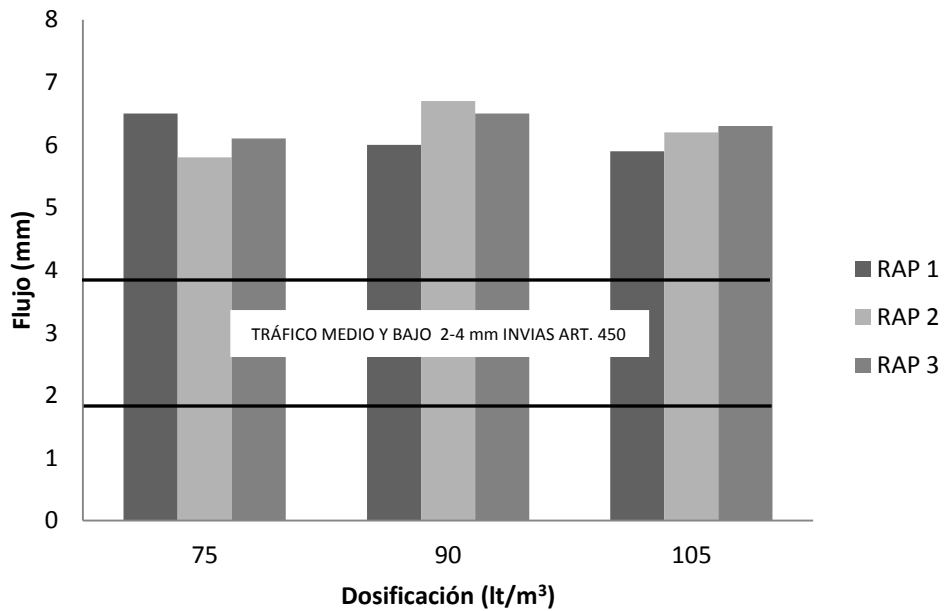
**Figura 25.** Flujo en mm R.A.P Tipo 1 para diferentes dosificaciones.  
Fuente: Elaboración propia (2011).



**Figura 26.** Flujo en mm R.A.P Tipo 2 para diferentes dosificaciones.  
Fuente: Elaboración propia (2011).



**Figura 27.** Flujo en mm R.A.P Tipo 3 para diferentes dosificaciones.  
Fuente: Elaboración propia (2011).



**Figura 28.** Comparación de Flujos promedio para los tres (3) tipos de R.A.P.  
Fuente: Elaboración propia (2011).

En la estabilidad se presenta la tendencia del R.A.P 2 a tener los mayores valores para las tres dosificaciones.

En este ensayo el R.A.P 2 se constituye como el de mejor comportamiento soportado en:

- ✓ La mayor estabilidad la presenta el R.A.P tipo 2 a una dosificación de 90 lt.
- ✓ El menor flujo lo presenta el R.A.P tipo 2 a una Dosificación de 75 lt.

## **5.6 INMERSION – COMPRESIÓN**

Los resultados presentados a continuación reflejan la resistencia a la compresión de probetas elaboradas por métodos de compactación estática y dinámica ante condiciones de rompimiento de la emulsión al aire y ante condiciones de inmersión prolongada. En este ensayo se evaluaron únicamente aquellas dosificaciones que presentaron mejor desempeño en el ensayo de estabilidad - flujo.

### **5.6.1 COMPACTACIÓN ESTÁTICA**

Los resultados promedio ante la evaluación de inmersión compresión son los evidenciados en la tabla 41.



**Tabla 41.** Resultados de Inmersión – Compresión (Estática).

| RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN PARA CONDICIONES DE ROMPIMIENTO EN AIRE Y AGUA (COMPACTACIÓN ESTÁTICA) |               |                      |   |   |   |  |  |
|--|---------------|----------------------|---|---|---|--|--|
| PROBETA<br>NÚMERO  | R.A.P<br>TIPO | DOSIFICACIÓN<br>(lt) | Resistencia a<br>la compresión<br>(Kg) AL AIRE<br>PROM. | Resistencia a<br>la compresión<br>(Kg) EN<br>INMERSIÓN<br>PROM. | RESISTENCIA<br>CONSERVADA<br>PROMEDIO (%) | Esfuerzo<br>Compresión<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) AL<br>AIRE PROM. | Esfuerzo<br>Compresión<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) EN<br>INMERSIÓN<br>PROM. |
| 1  | 1             | 75                   |   |   |   |  |  |
| 2  | 1             | 75                   |   |   |   |  |  |
| 3  | 1             | 75                   |   |   |   |  |  |
| 4  | 1             | 75                   | 1325  | 0   | 0   | 16.87  | 0  |
| 5  | 1             | 75                   |   |   |   |  |  |
| 6  | 1             | 75                   |   |   |   |  |  |
| 1  | 2             | 90                   |   |   |   |  |  |
| 2  | 2             | 90                   |   |   |   |  |  |
| 3  | 2             | 90                   |   |   |   |  |  |
| 4  | 2             | 90                   | 1735  | 273.33  | 0.16                                      | 22.09  | 3.48   |
| 5  | 2             | 90                   |   |   |   |  |  |
| 6  | 2             | 90                   |   |   |   |  |  |

*Fuente: Elaboración Propia (2011).*

El R.A.P 2 con una dosificación de 90 lt presenta el mayor grado de resistencia a la compresión en la condición de rompimiento al aire.

Se plantea que la compactación estática no genera probetas estables para la ejecución de este ensayo, considerando:

- ✓ Los valores de resistencia bajo Rompimiento en inmersión son supremamente bajos, para el caso del R.A.P 2 con dosificación de 90 lt.
- ✓ Las probetas de R.A.P 1 con dosificación 75 lt se destruyeron en el baño previo a la colocación en la Prensa.

## 5.6.2 COMPACTACIÓN DINÁMICA

Los resultados promedio ante la evaluación de inmersión compresión son los evidenciados a continuación, en la tabla 42.

**Tabla 42.** Resultados de Inmersión – Compresión (Dinámico)

| RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN PARA CONDICIONES DE ROMPIMIENTO EN AIRE Y AGUA (COMPACTACIÓN DINÁMICA) |            |                   |  |   |                                     |  |   |
|--|------------|-------------------|--|---|-------------------------------------|--|---|
| PROBETA NÚMERO   | R.A.P TIPO | DOSIFICACIÓN (lt) | Resistencia a la compresión (Kg) AL AIRE PROM. | Resistencia a la compresión (Kg) EN INMERSIÓN PROM. | RESISTENCIA CONSERVADA PROMEDIO (%) | Esfuerzo Compresión (kg/cm2) AL AIRE PROM. | Esfuerzo Compresión (kg/cm2) EN INMERSIÓN PROM. |
| 1  | 1          | 105               |  |   |                                     |  |   |
| 2  | 1          | 105               |  |   |                                     |  |   |
| 3  | 1          | 105               |  |   |                                     |  |   |
| 4  | 1          | 105               | 1930.67  | 891.67  | 0.46                                | 24.58                                      | 11.35   |
| 5  | 1          | 105               |  |   |                                     |  |   |
| 6  | 1          | 105               |  |   |                                     |  |   |
| 1  | 2          | 90                |  |   |                                     |  |   |
| 2  | 2          | 90                |  |   |                                     |  |   |
| 3  | 2          | 90                |  |   |                                     |  |   |
| 4  | 2          | 90                | 2756.67  | 949.17  | 0.34                                | 35.1                                       | 12.09   |
| 5  | 2          | 90                |  |   |                                     |  |   |
| 6  | 2          | 90                |  |   |                                     |  |   |
| 1  | 3          | 90                |  |   |                                     |  |   |
| 2  | 3          | 90                |  |   |                                     |  |   |
| 3  | 3          | 90                |  |   |                                     |  |   |
| 4  | 3          | 90                | 1598.17  | 1073  | 0.67                                | 20.35                                      | 13.66   |
| 5  | 3          | 90                |  |   |                                     |  |   |
| 6  | 3          | 90                |  |   |                                     |  |   |

*Fuente: Elaboración Propia (2011).*

El R.A.P 2 con una dosificación de 90 lt presenta el mayor grado de resistencia a la compresión en la condición de rompimiento al aire.

El R.A.P 3 con una dosificación de 90 lt presenta el mayor grado de resistencia a la compresión en la condición de rompimiento en inmersión.

Existe mayor dispersión en los datos con rompimiento al aire que en condición de inmersión, lo que indica que el R.A.P. estabilizado presenta un límite de resistencia independientemente de las dosificaciones utilizadas.

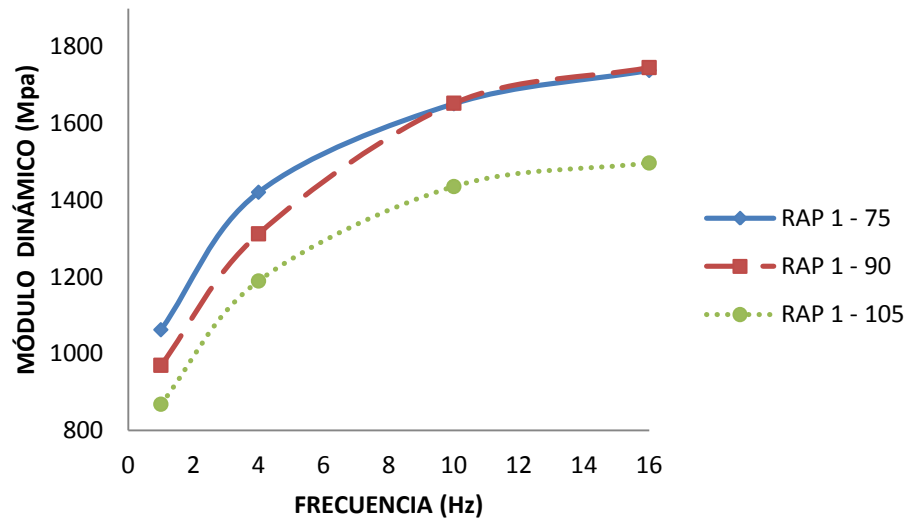
En la condición de inmersión, la resistencia aumenta en la medida que la granulometría se vuelve más gruesa (la vulnerabilidad radica en la matriz).

## **5.7 MÓDULOS DINÁMICOS**

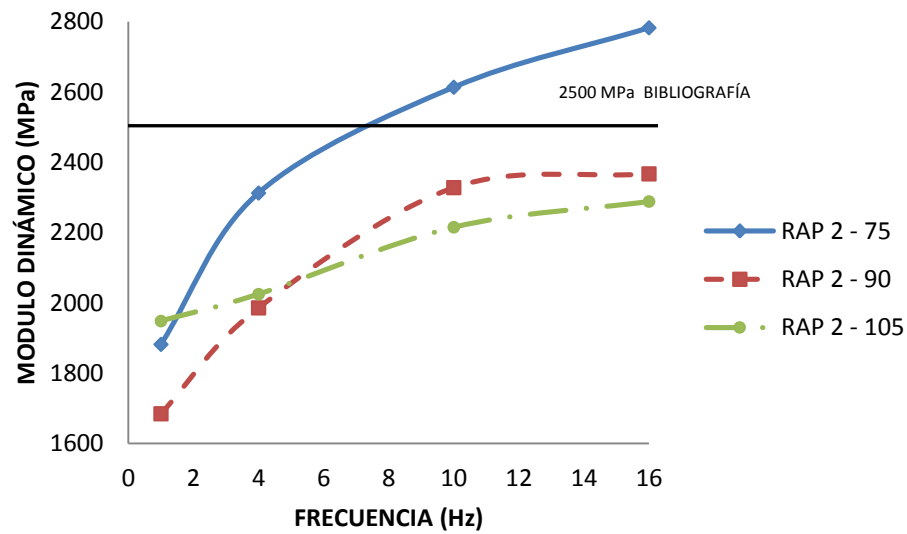
La evaluación de módulos dinámicos se presenta por cada uno de los tipos de R.A.P. en función de las diferentes dosificaciones de emulsión asfáltica y dentro de un rango de frecuencias comúnmente aplicado y sugerido por la normativa respectiva. Figuras 29, 30 y 31.

Cabe la pena resaltar que estos son valores representativos para estabilización con 100% de R.A.P, es decir, sin aporte de materiales granulares que ajusten a granulometrías y en frío.

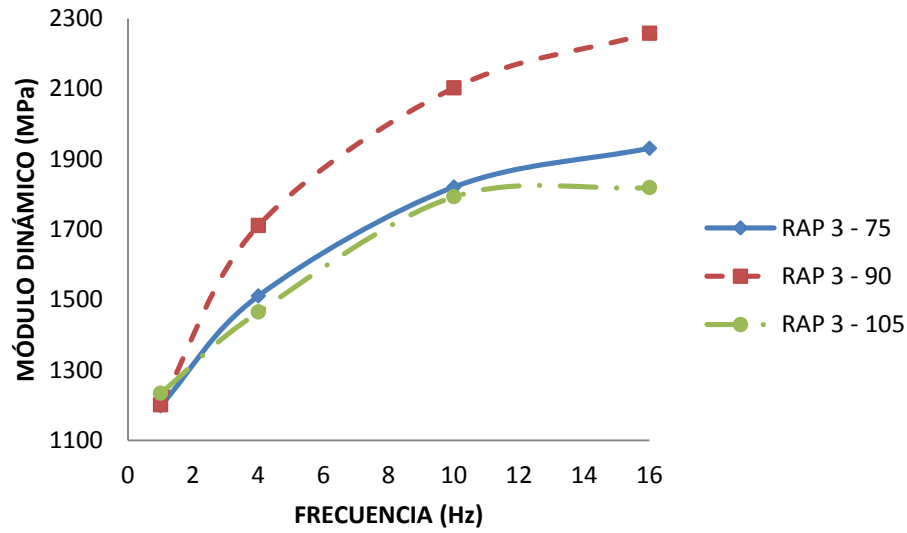
Finalmente se presenta un consolidado general en la figura 32. La elaboración de las probetas se limitó a la compactación dinámica.



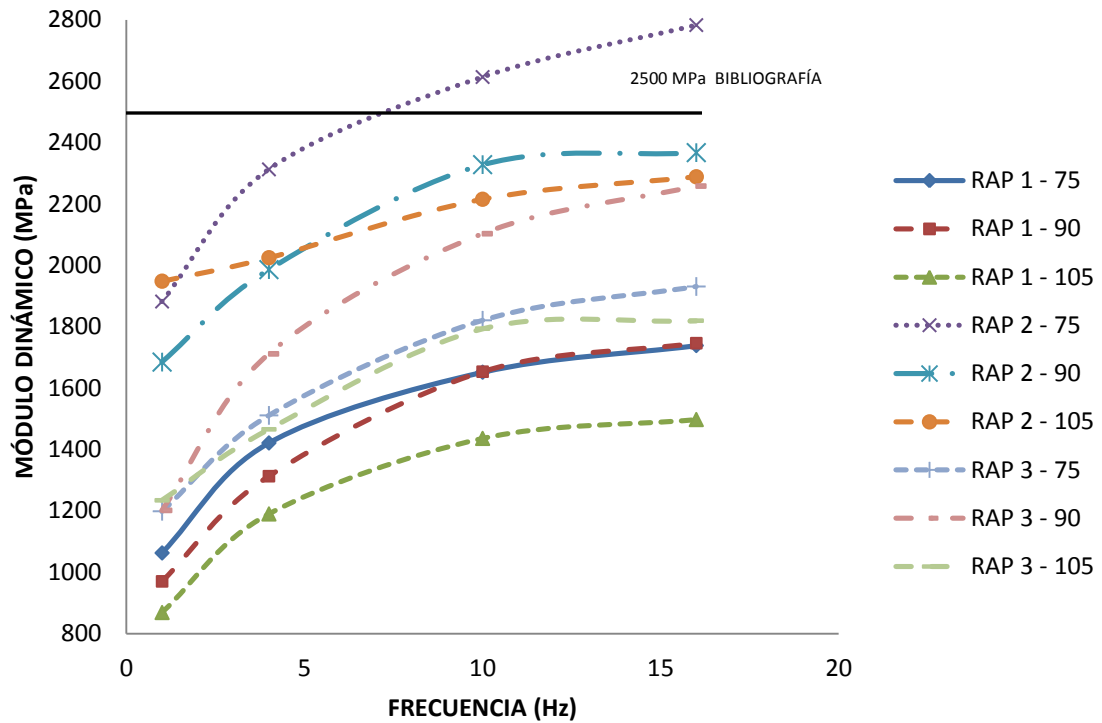
**Figura 29.** Evaluación del módulo dinámico en función de la dosificación R.A.P Tipo 1.  
Fuente: Elaboración propia (2011).



**Figura 30.** Evaluación del módulo dinámico en función de la dosificación R.A.P Tipo 2.  
Fuente: Elaboración propia (2011).



**Figura 31.** Evaluación del módulo dinámico en función de la dosificación R.A.P Tipo 3.  
Fuente: Elaboración propia (2011).



**Figura 32.** Consolidado Evaluación del módulo dinámico en función de la dosificación y los tres (3) tipos de R.A.P.  
Fuente: Elaboración propia (2011).

En orden decreciente se evidencia un mejor comportamiento del R.A.P. tipo 2, seguido del tipo 3 y finalmente el tipo 1. Para los tres casos se presenta una tendencia convencional de materiales granulares, que indica que a mayor frecuencia hay mayores valores de módulo. Particularmente el R.A.P. tipo 2 continúa presentando la mejor respuesta.

## 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Dando cumplimiento estricto a los objetivos planteados, se propone la siguiente matriz que refleja los resultados de la evaluación hecha al material estabilizado dando un estándar de calificación del mismo. Se tiene la tabla 43, mostrando la evaluación de los ensayos desarrollados.

**Tabla 43.** Matriz de Evaluación de respuestas mecánicas.

| MATRIZ DE EVALUACIÓN DE RESPUESTAS MECÁNICAS Y DINÁMICAS |   |                                     |              |                      |                              |                               |                      |                                    |   |                               |                      |                               |                             |                                     |   |
|--|---|-------------------------------------|--------------|----------------------|------------------------------|-------------------------------|----------------------|------------------------------------|---|-------------------------------|----------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|---|
| CONDICIONES DE ELABORACIÓN                               |   | DENSIDAD PROMEDIO g/cm <sup>3</sup> |              | ESTABILIDAD kg       |                              |                               | FLUJO mm             |                                    | INMERSIÓN COMPRESIÓN kg/cm <sup>2</sup> |                               |                      |                               | MÓDULO DINÁMICO Mpa (10 Hz) |                                     |   |
| COMPACTACIÓN   | R.A.P TIPO DOSIFICACIÓN lt/m <sup>3</sup> | RESULTADOS OBTENIDOS                | ALONSO, 2005 | RESULTADOS OBTENIDOS | INVIAS ART. 450 TRÁFICO BAJO | INVIAS ART. 450 TRÁFICO MEDIO | RESULTADOS OBTENIDOS | INVIAS ART. 450 TRÁFICO BAJO-MEDIO | RESULTADOS OBTENIDOS                    | ROMPIMIENTO EN AIRE INV E-738 | RESULTADOS OBTENIDOS | ROMPIMIENTO EN AIRE INV E-738 | RESULTADOS OBTENIDOS        | ALONSO, 2005 POTTI, 2004 ATEB, 2004 |   |
| ESTÁTICA   | R.A.P 1                                   | 75                                  | 2.01         | 584.91               | 500                          | 750                           | 4.91                 | 2 a 4                              | 16.87                                   | 20                            | 0                    | 15                            | -                           | 2500                                |   |
|  |   | 90                                  | 1.92         | 224.70               |                              |                               | 5.50                 |                                    | +                                       |                               | +                    |                               | -                           |                                     |   |
|  |   | 105                                 | 1.89         | 136.88               |                              |                               | 7.32                 |                                    | +                                       |                               | +                    |                               | -                           |                                     |   |
|  | R.A.P 2                                   | 75                                  | 2.04         | 291.65               |                              |                               | 4.78                 |                                    | +                                       |                               | +                    |                               | -                           |                                     |   |
|  |   | 90                                  | 2.00         | 121.32               |                              |                               | 5.64                 |                                    | 22.09                                   |                               | 3.48                 |                               | 15                          |                                     | - |
|  |   | 105                                 | 2.02         | 400.08               |                              |                               | 4.78                 |                                    | +                                       |                               | +                    |                               | -                           |                                     |   |
|  | R.A.P 3                                   | 75                                  | 1.90         | 98.01                |                              |                               | 4.76                 |                                    | +                                       |                               | +                    |                               | -                           |                                     |   |
|  |   | 90                                  | 1.94         | 280.64               |                              |                               | 6.18                 |                                    | +                                       |                               | +                    |                               | -                           |                                     |   |
|  |   | 105                                 | 1.88         | 194.06               |                              |                               | 6.60                 |                                    | +                                       |                               | +                    |                               | -                           |                                     |   |
| DINÁMICA   | R.A.P 1                                   | 75                                  | 2.05         | 501.20               | 500                          | 750                           | 6.52                 | 2 a 4                              | +                                       | 20                            | +                    | 15                            | 1651.46                     | 2500                                |   |
|  |   | 90                                  | 2.06         | 505.35               |                              |                               | 5.97                 |                                    | +                                       |                               | +                    |                               | 1652.98                     |                                     |   |
|  |   | 105                                 | 2.07         | 580.27               |                              |                               | 5.88                 |                                    | 24.58                                   |                               | 11.35                |                               | 1435.71                     |                                     |   |
|  | R.A.P 2                                   | 75                                  | 2.10         | 521.12               |                              |                               | 5.84                 |                                    | +                                       |                               | +                    |                               | 2613.22                     |                                     |   |
|  |   | 90                                  | 2.10         | 660.33               |                              |                               | 6.56                 |                                    | 35.10                                   |                               | 12.09                |                               | 2327.64                     |                                     |   |
|  |   | 105                                 | 2.08         | 625.15               |                              |                               | 6.14                 |                                    | +                                       |                               | +                    |                               | 2214.98                     |                                     |   |
|  | R.A.P 3                                   | 75                                  | 2.00         | 508.59               |                              |                               | 6.01                 |                                    | +                                       |                               | +                    |                               | 1820.44                     |                                     |   |
|  |   | 90                                  | 2.02         | 594.38               |                              |                               | 6.48                 |                                    | 20.35                                   |                               | 13.66                |                               | 2102.67                     |                                     |   |
|  |   | 105                                 | 2.00         | 497.57               |                              |                               | 6.18                 |                                    | +                                       |                               | +                    |                               | 1793.14                     |                                     |   |

+ Solamente se evaluaron en Inmersión Compresión aquellas probetas con el mejor desempeño en Estabilidad flujo, para cada tipo de R.A.P. Las probetas que se deterioraron considerablemente tras el tiempo de inmersión (pérdida de partículas en las caras planas), tampoco fueron tenidas en cuenta.

- La Evaluación de Módulos Dinámicos se restringió a la compactación Giratoria considerando que las únicas referencias existentes (puntos de comparación) así lo han trabajado, además las probetas compactadas estáticamente no proporcionan la regularidad en las caras planas, por lo tanto no son recomendables en la ejecución del ensayo.

Fuente: Elaboración propia (2011).

## **6.1 GRANULOMETRÍA**

En tamaños menores a 0.6 mm la distribución granulométrica es bastante similar, lo que indica que la distribución por debajo de ese tamiz es la que presentaba originalmente la mezcla asfáltica que fue objeto del fresado, fenómeno que se entiende ya que el proceso de fresado concentra la trituración en las partículas mayor tamaño, mientras que los finos que componen la matriz simplemente se disgregan y no experimentan los impactos del tambor.

De acuerdo a lo anterior, se explica el por qué las distribuciones granulométricas entre el tamiz 200 y el de 2.36 mm, si cumplen con los husos granulométricos propuestos en el Anexo 2 de comparaciones granulométricas (las exigencias de una mezcla asfáltica son mayores a las de un material granular de relleno), lo que hace nuevamente evidente que el incumplimiento se da en los tamaños grandes, creándose la duda de si el efecto de impacto que genera el tambor de una fresadora convencional no es suficiente para reducir las partículas o por lo menos para separar plenamente el material asfáltico endurecido de las paredes del agregado (considerando que el asfalto endurecido alrededor de los granulares, genera un aumento en el tamaño de dicha partícula).

Se explica la presencia de tres tamaños máximos diferentes ya que las profundidades en la actividad de fresado fueron cambiantes, lo que implica que las puntas de desgarramiento indujeron esfuerzos diferentes sobre las partículas de mayor tamaño que finalmente son las absorben el impacto.

Al comparar las granulometrías de trabajo con las demás fuentes (Anexo 2), se observa que en ningún caso cumple estrictamente con ninguno de los husos ya que el R.A.P se está obteniendo a partir de la generación de esfuerzos sobre un material compacto, el cual intentará disiparlos por los planos más débiles, sin que haya regularidad al momento de la extracción de material, fenómeno parcialmente similar a la descompresión que se presenta en la explotación de cantera.



De acuerdo con la comparación del Anexo 2, se observa que el R.A.P. tipo 3 presenta la mayor adaptación granulométrica, particularmente en casos de Sub-base granular, base granular y base estabilizada con emulsión asfáltica, sin embargo, se reitera que no es un cumplimiento total. Esto indica que aunque la normativa da un aval parcial a la granulometría más gruesa, no se contempla la susceptibilidad al agua por efecto de mayores vacíos en la mezcla.

## **6.2 ÍNDICES DE ÁREAS EQUIVALENTES**

Consiste en la valoración porcentual del grado de ajuste entre las áreas bajo la curva que presenta cada tipo de RAP y el área bajo la curva que representa la línea de máxima densidad para dicha muestra en función del tamaño máximo. El porcentaje calculado equivale a la relación,

$$\text{Índice de Áreas Equivalentes} = ((\text{Área Original} / \text{Área Máxima Densidad}) * 100)$$

Las áreas originales y de máxima densidad, son calculadas como la sumatoria de cada una de las áreas representativas de los tamaños de tamiz<sup>0.45</sup> y los porcentajes pasa para dicho tamaño de abertura y se representa de la siguiente forma:

$$\text{Áreas Individuales} = ((\% \text{Pasa } (i) * \text{Tamiz } (i)^{0.45}) / 2)$$

Donde el subíndice (i) hace referencia al Tamaño de Tamiz

Los valores de distribución real y de máxima densidad obtenidos son los representados en la tabla 44.

**Tabla 44.** Distribución Granulométrica reales y de máximas densidades para cada tipo de R.A.P.

| TAMIZ |            | DISTRIBUCIÓN REAL |        |         | DISTRIBUCIÓN MÁXIMA DENSIDAD |        |         |
|-------|------------|-------------------|--------|---------|------------------------------|--------|---------|
| (mm)  | (T) ^ 0.45 | RAP 1             | RAP 2  | RAP 3   | RAP 1                        | RAP 2  | RAP 3   |
| 37.5  | 5.10874317 |                   |        | 100.00% |                              |        | 100.00% |
| 25    | 4.25669961 |                   |        | 93.61%  |                              |        | 83.32%  |
| 19    | 3.7621761  |                   | 98.98% | 86.65%  |                              | 98.98% | 73.64%  |
| 12.5  | 3.11608651 |                   | 88.03% | 74.19%  |                              | 81.98% | 61.00%  |
| 9.5   | 2.75407411 | 99.36%            | 79.24% | 64.48%  | 99.36%                       | 72.46% | 53.91%  |
| 4.75  | 2.01610025 | 64.78%            | 57.81% | 43.44%  | 72.74%                       | 53.04% | 39.46%  |
| 2.36  | 1.47166988 | 36.43%            | 35.50% | 27.30%  | 53.10%                       | 38.72% | 28.81%  |
| 1.18  | 1.07732541 | 26.46%            | 26.51% | 21.48%  | 38.87%                       | 28.34% | 21.09%  |
| 0.6   | 0.79463568 | 17.74%            | 18.07% | 15.94%  | 28.67%                       | 20.91% | 15.55%  |
| 0.3   | 0.58170737 | 10.37%            | 12.10% | 9.69%   | 20.99%                       | 15.30% | 11.39%  |
| 0.15  | 0.42583472 | 4.95%             | 7.36%  | 4.15%   | 15.36%                       | 11.20% | 8.34%   |
| 0.075 | 0.31172926 | 1.84%             | 3.93%  | 1.53%   | 11.25%                       | 8.20%  | 6.10%   |

Fuente: Elaboración propia (2011).

A partir de los cuales se adelanta el cálculo de los índices de áreas equivalentes para los tres tipos de R.A.P. dados en la tabla 45.

**Tabla 45.** Cálculo de índices de áreas equivalentes para cada tipo de R.A.P

| RAP 1                         |              | RAP 2   |              | RAP 3   |              |
|-------------------------------|--------------|---------|--------------|---------|--------------|
| REAL                          | MAX DENSIDAD | REAL    | MAX DENSIDAD | REAL    | MAX DENSIDAD |
|                               |              |         |              | 2.55    | 2.55         |
|                               |              |         |              | 1.99    | 1.77         |
|                               |              | 1.86    | 1.86         | 1.63    | 1.39         |
|                               |              | 1.37    | 1.28         | 1.16    | 0.95         |
| 1.37                          | 1.37         | 1.09    | 1.00         | 0.89    | 0.74         |
| 0.65                          | 0.73         | 0.58    | 0.53         | 0.44    | 0.40         |
| 0.27                          | 0.39         | 0.26    | 0.28         | 0.20    | 0.21         |
| 0.14                          | 0.21         | 0.14    | 0.15         | 0.12    | 0.11         |
| 0.07                          | 0.11         | 0.07    | 0.08         | 0.06    | 0.06         |
| 0.03                          | 0.06         | 0.04    | 0.04         | 0.03    | 0.03         |
| 0.01                          | 0.03         | 0.02    | 0.02         | 0.01    | 0.02         |
| 0.00                          | 0.02         | 0.01    | 0.01         | 0.00    | 0.01         |
| Σ                             |              |         |              |         |              |
| 2.55                          | 2.93         | 5.44    | 5.27         | 9.08    | 8.25         |
| Índices de Áreas equivalentes |              |         |              |         |              |
| 86.99%                        |              | 103.16% |              | 110.02% |              |

Fuente: Elaboración propia (2011).

Se plantea entonces que un índice cercano al 100%, representa mejores ajustes a las distribuciones granulométricas de máxima densidad, y por el contrario un porcentaje alejado del 100% ya sea por exceso o por defecto, presentará distanciamiento de la máxima densidad por efecto de la variación porcentual de tamaños. Una curva por encima o por debajo de la línea de máxima densidad en determinado tamaño de tamiz, significa un mayor o menor contenido de partículas en el tamiz respectivo.

A partir de lo anterior se observa que la distribución granulométrica que mayor ajuste presenta resulta ser la de R.A.P. tipo 2, con un 3.16 % de distanciamiento de la línea de máxima densidad, seguida por el R.A.P. tipo 3 con un 10.02%, y con mayor grado de distanciamiento se encuentra la Distribución R.A.P. tipo 1 con un 13.01%. Esta tendencia resulta ser coherente con los resultados de los demás ensayos de laboratorio adelantados.

### **6.3 ÍNDICE DE ENVUELTA**

Por otra parte y con el fin de analizar los contenidos de emulsión y su relación con la distribución granulométrica se propuso el cálculo del índice de envuelta, el cual se entiende como la relación que existe entre la dosificación de emulsión asfáltica en litros y la distribución granulométrica que presenta cada tipo de R.A.P. en términos de % Pasa. El cálculo del índice se expresa de la siguiente forma.

$$\text{Índice de Envuelta} = 1 / (\text{Porcentaje Pasa } [i,j] / \text{Dosificación en litros})$$

Donde el subíndice i refleja el tamaño del Tamiz  $\wedge 0.45$ , j refleja el tipo de R.A.P.

El índice de envuelta es directamente proporcional al contenido de emulsión (cuando se toma como referencia el mismo tipo de R.A.P y el mismo tamaño de tamiz), y generalmente aumenta en la medida que aumenta el tamaño del R.A.P (para una misma Dosificación en litros y un mismo tamaño de Tamiz), sin embargo el comportamiento está supeditado a los “porcentaje pasa” de cada tamaño de tamiz  $\wedge 0.45$ . Las presentes conclusiones están extraídas de los resultados de índice de envuelta reflejados en la tabla 46

El índice de envuelta general para determinado tipo de R.A.P., se entenderá como la sumatoria de los índices de envuelta individuales para cada tamaño de tamiz a la potencia 0.45.

$$\text{Índice de Envuelta General} = \sum \text{índice de envuelta individuales } \{i,j\}$$

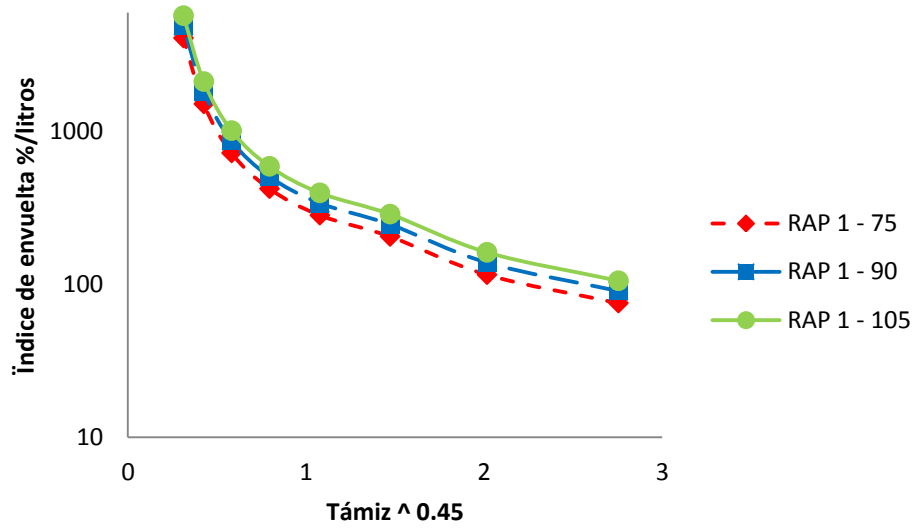
Donde el subíndice i refleja la dosificación, j refleja el tipo de R.A.P.

**Tabla 46.** Índices de envuelta para cada uno de los tipos de R.A.P.

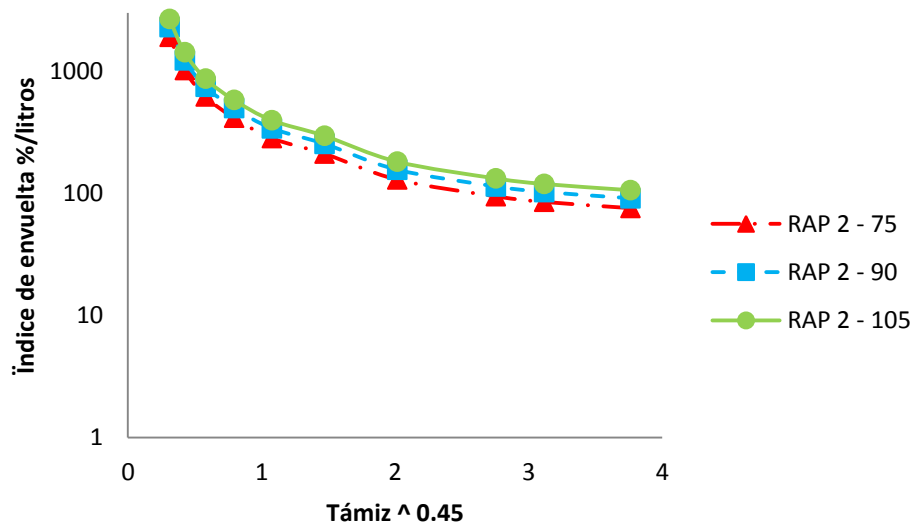
| Tamiz $\wedge 0.45$        | DOSIFICACIÓN (lt) |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------------------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                            | 75                |       |       | 90    |       |       | 105   |       |       |
|                            | RAP 1             | RAP 2 | RAP 3 | RAP 1 | RAP 2 | RAP 3 | RAP 1 | RAP 2 | RAP 3 |
| 5.109                      |                   |       | 75    |       |       | 90    |       |       | 105   |
| 4.257                      |                   |       | 80    |       |       | 96    |       |       | 112   |
| 3.762                      |                   | 76    | 87    |       | 91    | 104   |       | 106   | 121   |
| 3.116                      |                   | 85    | 101   |       | 102   | 121   |       | 119   | 142   |
| 2.754                      | 75                | 95    | 116   | 91    | 114   | 140   | 106   | 133   | 163   |
| 2.016                      | 116               | 130   | 173   | 139   | 156   | 207   | 162   | 182   | 242   |
| 1.472                      | 206               | 211   | 275   | 247   | 254   | 330   | 288   | 296   | 385   |
| 1.077                      | 283               | 283   | 349   | 340   | 339   | 419   | 397   | 396   | 489   |
| 0.795                      | 423               | 415   | 471   | 507   | 498   | 565   | 592   | 581   | 659   |
| 0.582                      | 723               | 620   | 774   | 868   | 744   | 928   | 1013  | 867   | 1083  |
| 0.426                      | 1514              | 1019  | 1808  | 1817  | 1223  | 2169  | 2120  | 1427  | 2531  |
| 0.312                      | 4081              | 1907  | 4889  | 4897  | 2288  | 5867  | 5713  | 2669  | 6845  |
| Índice de Envuelta general | $\Sigma$          |       |       |       |       |       |       |       |       |
|                            | 7422              | 4840  | 9197  | 8906  | 5808  | 11036 | 10391 | 6776  | 12876 |

Fuente: *Elaboración propia (2011).*

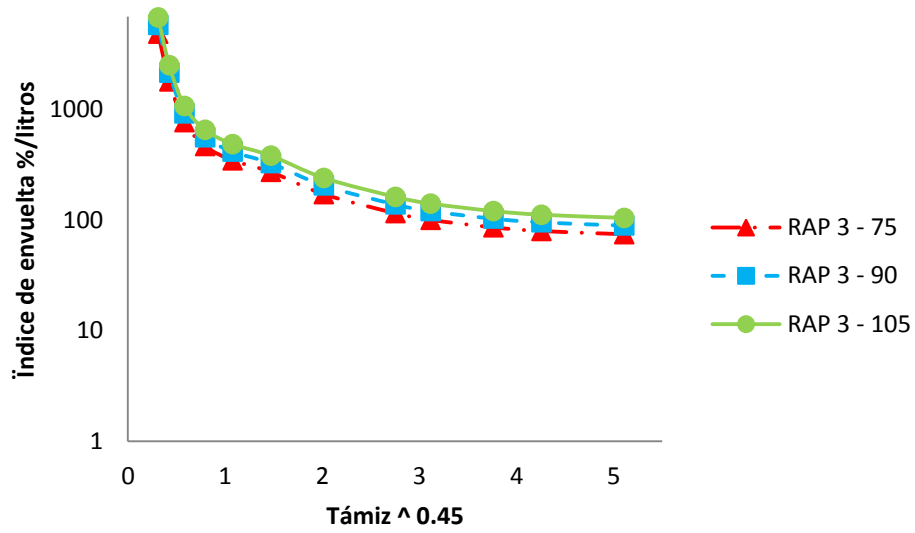
Por otra parte, las tendencias del índice de envuelta en términos del tipo de R.A.P. son mostradas en las figuras 33, 34 y 35; y en términos del contenido de emulsión, se ven representadas en las figuras 36, 37 y 38.



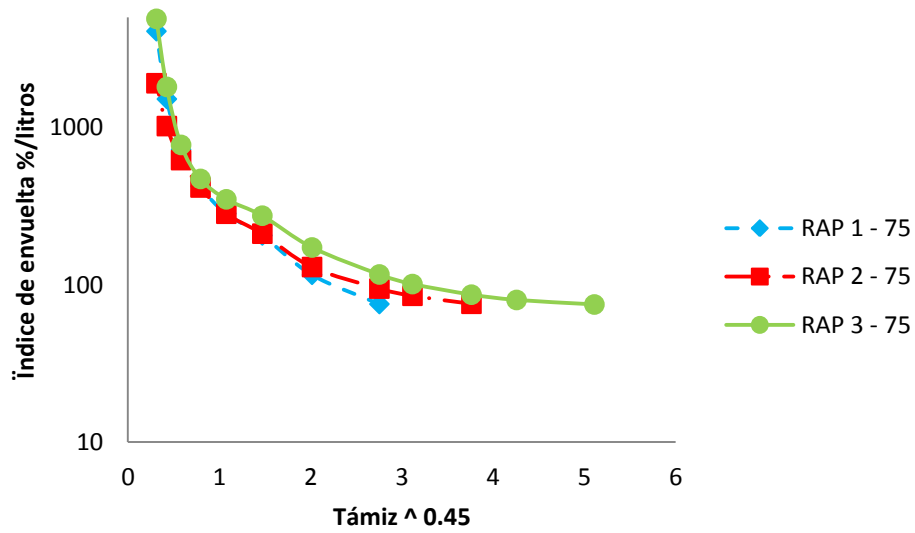
**Figura 33.** Condiciones de envuelta R.A.P. Tipo 1  
Fuente: Elaboración propia (2011).



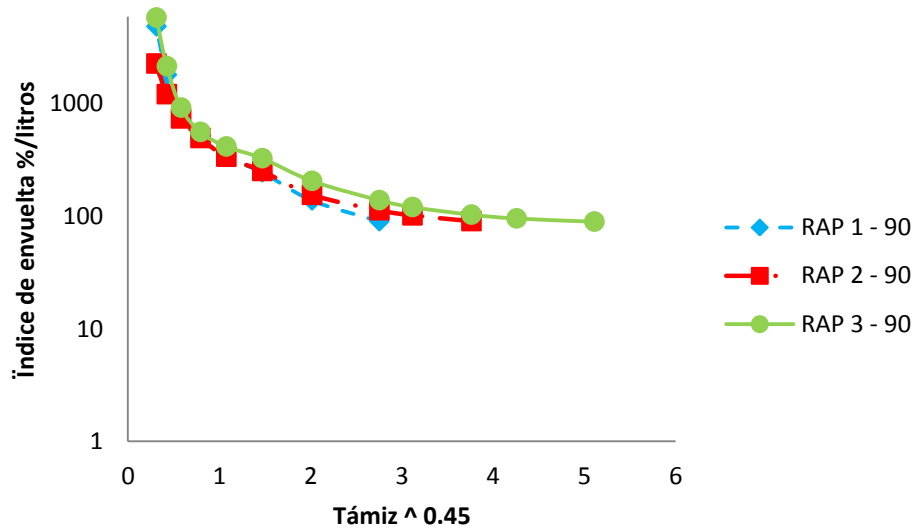
**Figura 34.** Condiciones de envuelta R.A.P. Tipo 2  
Fuente: Elaboración propia (2011).



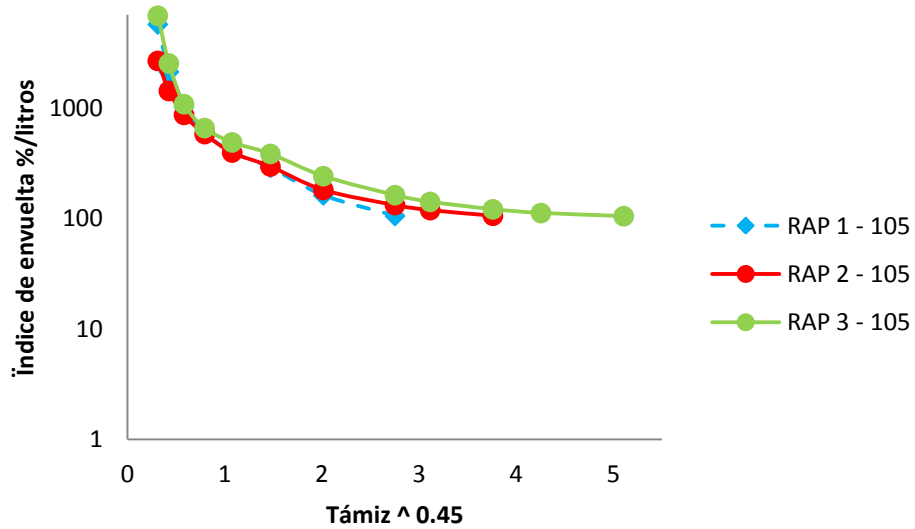
**Figura 35.** Condiciones de envuelta R.A.P. Tipo 3  
Fuente: Elaboración propia (2011).



**Figura 36.** Condiciones de envuelta dosificación de 75 lt/m³  
Fuente: Elaboración propia (2011).



**Figura 37.** Condiciones de envuelta dosificación de 90 lt/m³  
Fuente: Elaboración propia (2011).



**Figura 38.** Condiciones de envuelta dosificación de 105 lt/m³  
Fuente: Elaboración propia (2011).

Se observa un comportamiento particularizado que indica que los índices de envuelta son mayores en la medida que la granulometría es más fina, independientemente del tipo de R.A.P. y del contenido de emulsión, esto se ve reflejado en las altas pendientes de las curvas para tamaños inferiores a los 0.6 mm.

El mayor cambio de pendiente se observa entre los tamices de 0.6 y 2.36 mm, pasando de una asíntota casi vertical (valor máximo de envuelta), a una asíntota casi completamente horizontal tendiente a cero. Lo anterior se entiende como la menor capacidad de envuelta que puede llegar a tener una partícula, ya sea por efecto de una menor superficie específica, en la medida que aumenta el tamaño, o por efecto del recubrimiento asfáltico que no permite la absorción de la emulsión en el caso del R.A.P.

Los resultados obtenidos reflejan el comportamiento propio del RAP, el cual expresa una alta cantidad de emulsión absorbida en los tamaños finos. A partir de esto se puede entender el efecto de una mayor o menor manejabilidad de una mezcla de materiales granulares según sean las condiciones de humectación de la matriz.

Un cambio tan brusco en el índice de envoltura, se justifica en que las partículas a partir de los 0.6 mm resultan ser de tamaño significativo como para tener un recubrimiento total de asfalto envejecido, lo que hace que haya menos capacidad de absorción de emulsión y por ende el índice de envoltura tiende a reducirse.

Las asíntotas se entienden de la siguiente manera: La vertical se explica en que el tamiz de 0.075 mm es el de menor tamaño analizado, por ende el comportamiento está supeditado a dicho valor. Por otra parte tamaños menores tenderían a tener superficies específicas grandes, lo que incurriría en aumentos desmesurados del índice de envoltura y siempre tendientes a un tamaño muy cercano a cero, matemáticamente se entiende este comportamiento, por la naturaleza de la fórmula de cálculo del índice.

La asíntota horizontal se entiende como la menor capacidad de absorción de emulsión que puede presentar una partícula, esto asociado a que en la medida que menor superficie específica se tenga, menor contenido de absorción de emulsión habrá. Lo anterior entendido en que una mezcla puede llegar a tener



superficies específicas bajas en la medida que los tamaños máximos aumenta, pero jamás pueden llegar a ser cero.

Para todas las gráficas se observa que los rangos de transición de la curva del índice de absorción son muy similares, lo que indica que las condiciones de relación entre dosificación y % pasa son bastante regulares entre los 0.6 y 2.36 mm, y que las variaciones del comportamiento entre un diseño y otro, radican en los tamaños mayores a 2.36 o menores a 0.06 mm.

Para todos los contenidos de emulsión, El R.A.P. tipo 2 resulto ser el de menor índice de envuelta.

Para los tres tipos de R.A.P., la dosificación de 75 lt es la que menor índice de envuelta presentó.

## **6.4 EMULSIÓN ASFÁLTICA**

Los resultados obtenidos en los ensayos de caracterización de la emulsión asfáltica, no presentaron ningún comportamiento diferente a los esperados, aun cuando se utilizaron tres muestras diferentes, en función de la programación de elaboración de probetas, respecto de la bibliografía consultada se puede concluir que en la mayoría de los países europeos, la estabilización se adelanta con emulsiones de asfalto residual de penetración cercana a las 200 decimas de milímetro a diferencia del asfalto implementado en la presente investigación de cuya penetración está entre 80 y 100 décimas de milímetro. La concentración de la emulsión 60 - 40 es coherente con los demás estudios adelantados.

## **6.5 HUMEDADES**

Resultan bastante bajas ya que más del 70% de las caras de las partículas están recubiertas por asfalto, el cual actúa como impermeabilizante, lo que reduce significativamente la capacidad de absorción de agua , además esto permite que

el agua corra bastante rápido por las paredes de las partículas, y al no haber retención del líquido, la evaporación se acelera.

Considerando que los valores de humedad fueron tomados en muestras que sufrieron exposición a lluvia en las 24 horas previas al ensayo, se reitera la fácil evacuación del agua. Teniendo en cuenta la rápida circulación del líquido hacia el fondo de los acopios o de las capas cuando el material se extiende en obra, dado que no se adelanta de forma simultánea la estabilización, es decir sin mezcla de emulsión, el R.A.P. puede comportarse como un material de filtro lo cual sería bastante contraproducente si las subrasantes presentan propiedades de alta plasticidad o de potenciales de expansión.

En caso de estar estabilizado, se esperaría entonces que si hay concentración de agua en el fondo de las capas, se presenten fisuras en la mezcla las cuales iniciarían en el fondo y se reflejaría a la superficie, caso que sería crítico si el material es instalado como carpeta de rodadura en donde la concentración de esfuerzos daría mayor, acelerando la continuidad de dichas fisuras, mientras que si el material es colocado a profundidad, habría una mayor disipación, incluso si se habla de una mezcla gruesa por ejemplo R.A.P tipo 3, la continuidad de la fisura podría ser restringida.

Aun cuando hay porcentajes significativos de matriz, es decir de materiales finos que tienen mayor potencial de retención de agua, no se presentan altos grados de retención del líquido, lo que lleva a pensar que el recubrimiento se da de igual forma en finos y gruesos.

## **6.6 DENSIDADES**

Primeramente y en comparación con las demás fuentes citadas, se observa que en este trabajo se encontraron mayores valores de densidad en probetas elaboradas con método de compactación dinámica, caso contrario a lo encontrado

por Alonso (2005), quien encontró mayores magnitudes en probetas elaboradas con compactación estática. De acuerdo a la descripción generalizada del funcionamiento de amasado del compactador giratorio, resulta evidente que el mayor acomodamiento de las partículas genera mayor densidad en las probetas. Se aclara que para el presente trabajo de investigación se planteo un equivalente entre el número de golpes por cara para la compactación estática y el numero de giros de compactación en función del tráfico esperado, queda entonces la duda sobre cuál fue el numero de giros implementado por la fuente (Alonso, 2005).

En comparación de órdenes de magnitud, los valores de densidad obtenidos resultan ser menores respecto de los ensayos adelantados por Alonso (2005), sin embargo, se encuentran en órdenes de magnitud coherentes y relativamente cercanos, quedando nuevamente la inquietud sobre cuáles fueron los esfuerzos a los cuales se vieron sometidas las probetas de este autor

Respecto a la densidad, se encontró en todos los casos de dosificación y tipo de compactación, que el R.A.P tipo 2 registra los mayores valores de densidad , lo cual se sustenta en el hecho que una gradación intermedia al tener mayor continuidad en los tamaños de las partículas, presenta una compensación de los vacios que dejan aquellas de mayor tamaño por medio de la matriz fina, sin embargo si esto fuera completamente cierto, podría pensarse que la granulometría más finas tendría menos vacios, sin embargo para un mismo volumen, una solo partícula gruesa será más densa que un grupo de partículas finas, ya que no ha presentado esfuerzos de expansión.

Como comportamiento general se observo que los valores de densidad obtenidos en probetas elaboradas por medio de compactación giratoria presentan una mayor concentración, considerando la dispersión que presentaron las probetas elaboradas estáticamente, es decir que el medio giratorio conlleva las muestras hacia un mismo, lo cual es compresible ya que este equipo tiende a congrega las

muestra al 98% de la gravedad específica máxima teórica, magnitud que en todos los casos fue alcanzada.

Algunas Tendencias observadas en ambos casos de compactación son:

- ✓ Los mayores valores de densidad en R.A.P tipo 2 se obtiene con dosificación de 75 lt: una gradación bien distribuida conlleva a que la matriz fina que es la que presenta mayor absorción de líquidos, se distribuya de forma homogénea alrededor de las partículas de mayor tamaño, es decir la matriz tendrá mayor manejabilidad, llenando todos los espacios entre partículas gruesas y la emulsión compensara los vacios en la partículas finas
- ✓ Los mayores valores de densidad en R.A.P tipo 3 se obtiene con dosificación de 90 lt: Siendo la granulometría del R.A.P 3 gruesa, requerirá una mayor cantidad de fluidos que se internen en los vacios que no son compensados totalmente por la matriz fina, por eso se observa el aumento a 90 litros.

Inicialmente se propone una hipótesis que indica que habrá menores valores de densidad en la medida que sea aplicada una dosificación de emulsión mayor, ya que para cualquier mezcla en frio, el agua presente en la emulsión nunca se desprende en su totalidad del asfalto residual así el tiempo de rompimiento sea muy prolongado, lo anterior considerando que la densidad del agua resulta ser menor que la de los agregados pétreos. Por otra parte se plantea que en la medida que hay mayor cantidad de emulsión, el agua presente buscará rutas de evacuación del agua y los caminos por los cuales busca su salida de la mezcla quedaran en forma de vacios, lo cual resulta más crítico en términos de densidad.

En contraposición a las hipótesis anteriores se dieron los resultados del R.A.P tipo 1 el cual obtuvo una mayor densidad con la dosificación más alta (105 litros), sin embargo dicho fenómeno se explica al tener en cuenta que la gradación del R.A.P

tipo 1 presenta una mayor superficie específica, por ende la emulsión tiene mayores áreas de adherencia con los agregados y a su vez más opciones de contacto con el oxígeno lo que genera altas velocidades de rompimiento, reduciendo la cantidad de agua potencialmente retirada de la emulsión.

## **6.7 ESTABILIDAD – FLUJO**

El análisis de la respuesta mecánica de estos parámetros se concentró en la capacidad que tiene la matriz de materiales finos a resistir esfuerzos, considerando que las partículas de mayor tamaño presentan mayor capacidad ante la falla en términos de estabilidad y menores deformaciones en términos de flujo, esto sumado a que el contenido de materiales asfálticos se ve aumentado ya que en la mezcla se encuentra los porcentajes de asfalto del R.A.P. (envejecido) y el porcentaje de asfalto residual proveniente de la emulsión (joven). Se resalta entonces que el ensayo se adelanta en condiciones desfavorables para el ligante, ya que hay un alza de temperatura elevada (60 ° C durante 30 minutos), por ende la resistencia de las probetas será dependiente de la respuesta del asfalto ante dicho aumento térmico.

Se reitera que el uso del material estabilizado esta sugerido para tráficos medios y bajos, como base en mezclas asfálticas en caliente o como material granular de relleno considerando los resultados obtenidos en el presente trabajo.

Para los casos de estabilidad mínima requerida para tráfico bajo, dan cumplimiento las siguientes dosificaciones:

- ✓ R.A.P 1 con 75 lt de emulsión (compactación estática): Una granulometría fina con un porcentaje de emulsión suficiente que llene los vacios restantes, permite obtener probetas suficientemente cerradas que eviten el ingreso de agua (condiciones propia del ensayo: Inmersión por 30 minutos), además de un bajo contenido de emulsión que la hace menos susceptible al calor

elevado (condiciones propias del ensayo: 60°C). Por otra parte el efecto del tipo de compactación influye ya que la trabazón de agregados permite que se desarrolle una mayor fricción la cual se compara a la aplicación del esfuerzo de la prensa Marshall.

- ✓ Todas las dosificaciones de compactación dinámica excepto el R.A.P 3 con 105 lt de emulsión: Resulta esperado, ya que al tener mayores densidades, las partículas de las probetas pueden transmitir de mejor manera los esfuerzos, haciendo que la falla sea más tardía y por ende la resistencia a la falla sea mayor. Se explica que la granulometría más gruesa de todas, la de R.A.P 3, con la dosificación más alta de 105 lt/m<sup>3</sup>, haya fallado, ya que por las condiciones propias del ensayo, se presenta un alto ingreso de agua y una alta afectación sobre el material asfáltico, el cual se ve reblandecido.

Para tráfico medio, ninguna de las dosificaciones cumple por estabilidad, tomando en cuenta que los rango de aceptación resultan ser más exigentes que para tráfico bajo.

Para los criterios de flujo ninguna dosificación es apta, ya sea por compactación estática o dinámica, siendo la segunda la que mayores valores registra.

Particularmente se encontró que a mayores contenidos de emulsión, se presentaron mayores valores de flujo, esto corrobora que las condiciones de alta temperatura afectan las propiedades del asfalto permitiendo entonces mayores deformaciones, por efecto del comportamiento termoplástico de dicho material.

Se entiende que los mayores valores de flujo se presenten en la compactación giratoria, ya que este tipo de compactación lo que genera es un alto ordenamiento de las partículas, que lleva a la formación de planos alineados a través de los cuales la resistencia es mínima, a diferencia de la compactación estática en la cual las partículas son objeto de esfuerzos friccionantes al momento de la

densificación, los cuales son equivalentes y opuestos cuando se aplican los esfuerzos de falla de la prensa Marshall.

Resulta evidente que ante valores de flujos altos, la relación estabilidad/flujo no estará dentro de los rangos de admisibilidad.

La principal relación entre los resultados de densidad y el ensayo de estabilidad - flujo, se concentra en el análisis del R.A.P tipo 2, el cual presentó los mayores valores de densidad para los dos tipos de compactación y mayor valor de estabilidad y menor flujo para el caso de compactación dinámica, reiterando el efecto que tiene una granulometría intermedia ante las sollicitaciones mecánicas

En ninguno de los dos tipos de compactación se presentan patrones de comportamiento definidos respecto del flujo, salvo para el caso de la estabilidad por compactación dinámica en donde hay una prevalencia del R.A.P tipo 2 como el de mayor valor para cualquier dosificación.

A pesar que el flujo resulta ser mayor en las probetas elaboradas con compactador giratorio, los valores de estabilidad resultaron ser igualmente mayores, lo que demuestra que los planos por los cuales fallan las probetas elaboradas por este medio de compactación permiten el desplazamiento hasta un punto en el cual la adherencia generada por el ligante restringe el desplazamiento de forma tal que hay un aumento en la resistencia, caso contrario al presentado en las partículas de las probetas elaboradas con compactación estática, en donde la fricción de las angulosidades genera una restricción al movimiento, pero la resistencia se ve condicionada a la capacidad de dichas partículas. Puede entonces pensarse que las probetas elaboradas de forma giratoria tienen un comportamiento dúctil sobre los planos de acomodamiento de las partículas hasta el punto en que actúa la capacidad de adherencia del ligante, mientras que las probetas elaboradas estáticamente presentan un comportamiento frágil, hasta el momento en que las angulosidades de las partículas fallan.

Complementando lo anterior, se encontró que hay mayor convergencia en los datos de flujo para la compactación dinámica, aunque el promedio de flujos es menor en compactación estática. Al igual que en el caso de las densidad, se muestra que la compactación giratoria proporciona especímenes homogéneos por el efecto de acomodamiento de las partículas.

A partir de los resultados obtenidos, se descarta la utilización del material de fresado estabilizado con emulsión asfáltica para tráficos medios, ya que ni por estabilidad ni por flujo resulta ser competente.

Para el caso de tráficos bajos se incumple con el criterio de aceptación por flujo, pero de acuerdo a la literatura consultada, esto podría ser controlado con la adición de algún cementante en dosificaciones que varían entre el 0.5% (POTTI, 2004) y el 1%(NEEDHAM, 2000) hasta 3% (ALONSO, 2005) dando validez al criterio de que una dosificación de cementante baja podrá controlar la deformación, pero valores mayores del cementante generarán una respuesta irregular en la estabilidad y en los módulos, según lo expresan los mismos autores.

## **6.8 INMERSIÓN COMPRESIÓN**

Según el INSTITUTO NACIONAL DE VIAS INVIAS (2007), en el caso de reciclados con emulsión asfáltica, se utilizará para el diseño de la mezcla el ensayo de inmersión – compresión (anexo A de la norma INV E – 738), aplicándose los siguientes criterios como guías para la selección del contenido óptimo de ligante en la mezcla reciclada:

- ✓ Resistencia de probetas curadas en seco (mínima): 20 kg/cm<sup>2</sup>
- ✓ Resistencia conservada tras curado húmedo (mínima): 75 %

Para esta Investigación, en la condición de rompimiento en aire (curadas en seco), las probetas que cumplieron con el requerimiento de la Norma son:



- ✓ R.A.P 2 – 90 lt (Compactación Estática)
- ✓ R.A.P 1 - 105 lt (Compactación Dinámica)
- ✓ R.A.P 2 - 90 lt (Compactación Dinámica)
- ✓ R.A.P 3 - 90 lt (Compactación Dinámica)

Nuevamente se observa que la granulometría del R.A.P 2 es aquella que mejores resultados presenta, aun cuando no hay cumplimiento estricto con la norma.

Además se relaciona la importancia de la densidad en el comportamiento de los demás ensayos adelantados, ya que las probetas elaboradas con medio giratorio presentan mejor desempeño en la resistencia tras curado seco.

Ya sea para compactación estática o dinámica, una dosificación intermedia de 90 lt resultó ser la más idónea, ya que ésta otorga una manejabilidad suficiente de la matriz fina, lo cual asegura una correcta envuelta de las partículas de mayor tamaño, sin embargo dicha dosificación no resulta ser tan alta como para que el contenido de asfalto residual sea exagerado considerando las desventajas que conlleva un contenido de ligante elevado.

Se resalta entonces que en el caso de la evaluación de la resistencia, la mayor cantidad de los esfuerzos es absorbida por las partículas de mayor tamaño, y en este caso particular de estabilización, por la interfase entre el asfalto envejecido y la matriz de finos con asfalto residual (joven).

Para la condición de rompimiento en inmersión, ninguna de las probetas cumplió con el criterio de resistencia conservada, lo que demuestra la alta susceptibilidad del material ante el agua. Será entonces necesario pensar en una solución en el proceso constructivo que permita controlar de forma total el flujo de líquidos alrededor del material estabilizado. Lo anterior justificado en que la matriz de materiales finos presenta reblandecimiento tras los catorce días de inmersión que debe tolerar según las condiciones propias del ensayo. Se justifica la mayor

afectación en la matriz, ya que los materiales granulares de mayor tamaño, se encuentran impermeabilizados en su mayoría por la capa de asfalto envejecido.

Por otra parte se plantea que si hay ingreso de agua en la probeta y se adelanta el ensayo de compresión sin permitir la salida del líquido, el agua presente puede desarrollar esfuerzos que aceleran el desprendimiento de las partículas y más aun si se considera que el ensayo se adelanta sin ninguna condición de confinamiento.

Tomando en cuenta la posibilidad de agregar cierto porcentaje de cementante para control del flujo, quedaría expuesta la posibilidad de un aumento en la resistencia conservada. (POTTI, 1999)

Según el Artículo 461 INV-2007, se deberá proponer una especificación particular si resulta necesario agregar algún mejorador a la emulsión asfáltica.

Finalmente, y en concordancia a las fuentes citadas (tabla 19), se observa que los porcentajes de resistencia conservada y las magnitudes de resistencia a la compresión son similares a los de la normativa colombiana y para cualquiera de ellas se está presentando incumplimiento en los rangos de evaluación.

Existe mayor dispersión en los datos cuando las probetas son evaluadas tras curado seco, lo que indica que el R.A.P. estabilizado presenta un límite de resistencia independientemente de las dosificaciones y las granulometrías utilizadas.

En la condición de inmersión, la resistencia aumenta en la medida que la granulometría se vuelve más gruesa, confirmando una vez más que la vulnerabilidad radica en la matriz, y que los mayores esfuerzos son absorbidos por las partículas de mayor tamaño.

## **6.9 MÓDULO DINÁMICO**

De acuerdo al patrón general evidenciado en la evaluación de módulos para los tres tipos de R.A.P. y las tres dosificaciones se observan algunas tendencias:

- ✓ A mayor contenido de emulsión asfáltica, menores valores de módulo dinámico: Son las partículas de agregados aquellas que absorben la mayor cantidad de esfuerzos, al reemplazarlas por ligante, la respuesta se concentra en un menor número de partículas, y la resistencia a la deformación resulta ser menor.
- ✓ Las mejores respuestas las presenta el R.A.P 2, seguido de R.A.P 3 y finalmente el R.A.P 1. Una mezcla con buena densidad podrá distribuir mejor los esfuerzos y a su vez proporcionar una mayor resistencia a la deformación, como es el caso del R.A.P. tipo 2. Por otra parte una mezcla con partículas más grandes, concentra la resistencia a la deformación haciéndola más resistente (R.A.P. tipo 3), que una mezcla muy fina, que aunque tenga buena disipación, no presenta la resistencia suficiente para oponerse a la deformación.

Tiene entonces mejor resultado una mezcla gruesa que una mezcla fina, comparando el R.A.P 1 y el R.A.P 3, esto debido a que las partículas más gruesas son aquellas que reciben los esfuerzos

Las fuentes analizadas, expresan que para capas recicladas con emulsión, es frecuente admitir valores de módulo de:

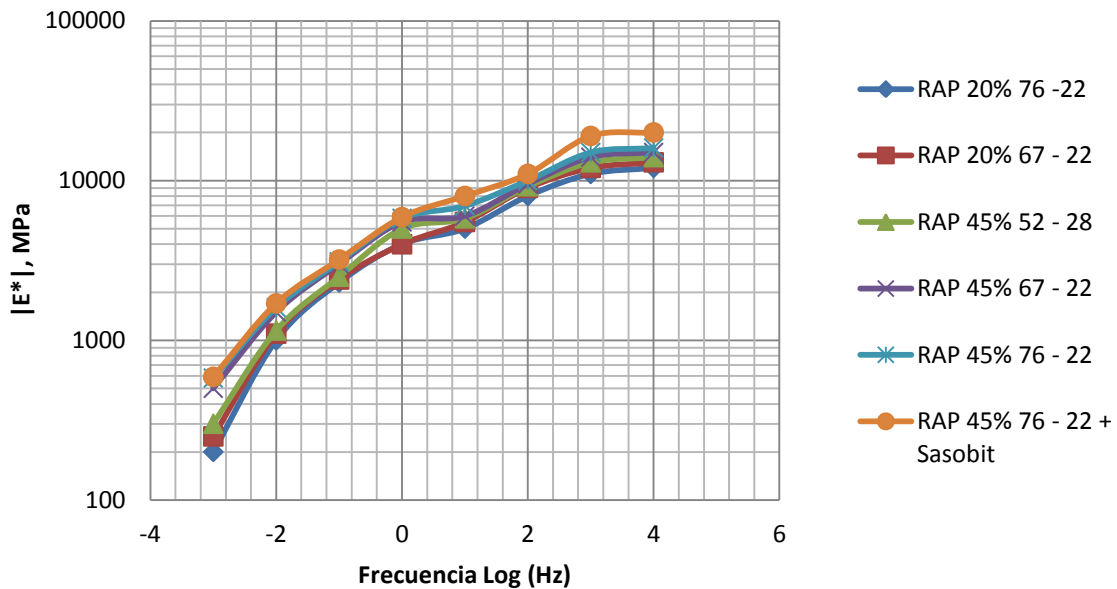
- ✓ Entre 2500 MPa. Y 4000 MPa. (Alonso, 2005).
- ✓ 2500 MPa a 20°C, de acuerdo con la norma Andaluza). (Potti, 1999).

En la presente investigación la única mezcla que alcanzó valores de módulos iguales o superiores a los rango previamente sugeridos, fue la de R.A.P tipo 2 con

75 litros a 10 y 16 Hz, lo que indica nuevamente que la granulometría intermedia es la de mejor desempeño, corroborando la influencia de la densidad.

La mayor cantidad de valores se encuentran concentrados en el tipo de reciclados I y II, sin embargo, la naturaleza del material estudiado corresponde reciclado tipo III (100% R.A.P., sin adición de materiales granulares que ajusten a curvas granulométricas). Sin embargo, cabe la pena resaltar que el material producto del proceso de fresado de capas asfálticas presenta caras sin recubrimiento de material asfáltico lo cual genera cierto porcentaje de arenas y finos por efecto del desgarre, lo que podría proporcionar un aumento en las partículas que ajustan las granulometrías y por ende considerarse como adición en menor escala.

Como comparación adicional se presentan los valores convencionales de módulo dinámico obtenido de la estabilización en caliente.



**Figura 39.** Magnitudes de Módulos Dinámicos sugeridos para R.A.P. estabilizado en Caliente.  
Fuente: West (2008)

Es evidente la diferencia en la magnitud de los valores de módulo dinámico cuando la estabilización se realiza en caliente y con asfalto. Se hace la respectiva

aclaración considerando que una buena parte de las fuentes encontradas persisten en la realización de la mezcla con altos consumos energéticos y con aporte de materiales granulares. El análisis en caliente se basa en el comportamiento del asfalto envejecido y el asfalto de aporte.

Los valores de módulos obtenidos con el R.A.P. estabilizado en frío resultan ser comparativamente mayores a los de una capa de materiales granulares implementados como sub-base o base granular, pero son inferiores a los resultados de R.A.P. estabilizado con emulsión asfáltica en otras investigaciones, por ende y en términos de módulos se propone que el material sea utilizado como capa granular de relleno, lo que representa un factor de seguridad significativo y una posible reducción de espesores cuando se adelanten los respectivos cálculos y diseños.

## **6.10 COMPORTAMIENTOS DEL ÍNDICE DE ENVOLTURA Y LOS DEMÁS PARÁMETROS EVALUADOS**

Con el fin de relacionar los resultados obtenidos en los diferentes ensayos con las características granulométricas y el contenido de emulsión a través del índice de envoltura, se presentan las figuras 40, 41 en las cuales se observa la variación de la respuesta mecánica o dinámica que tiene cada tipo de R.A.P en función de la dosificación.

Se toma como partida el hecho que el R.A.P. tipo 2 presenta los menores valores de índice de envoltura, para cualquier dosificación y para cualquier ensayo realizado

DENSIDAD

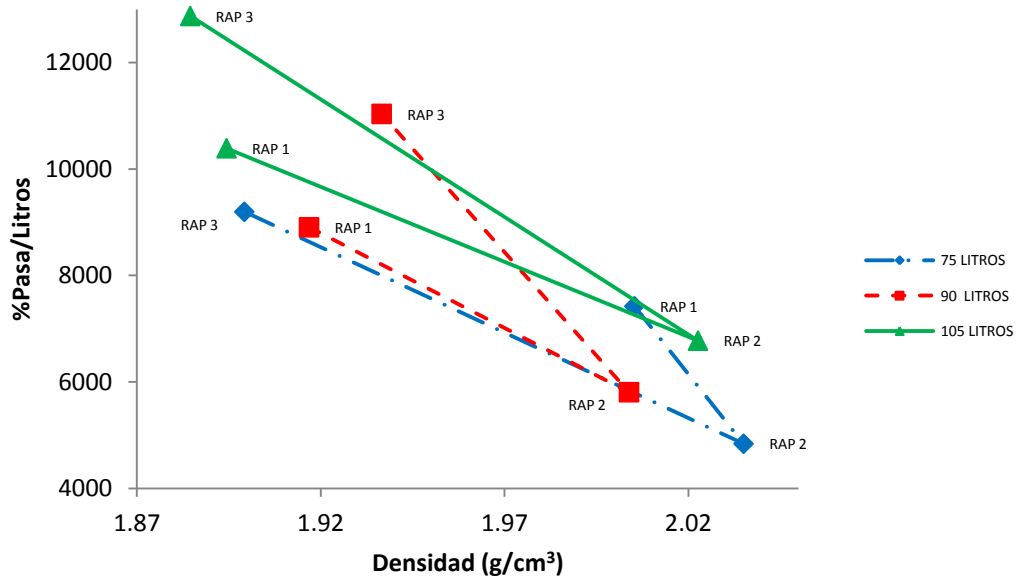


Figura 40. Comportamiento del índice de envuelta y la densidad – compactación estática.  
Fuente: Elaboración propia (2011).

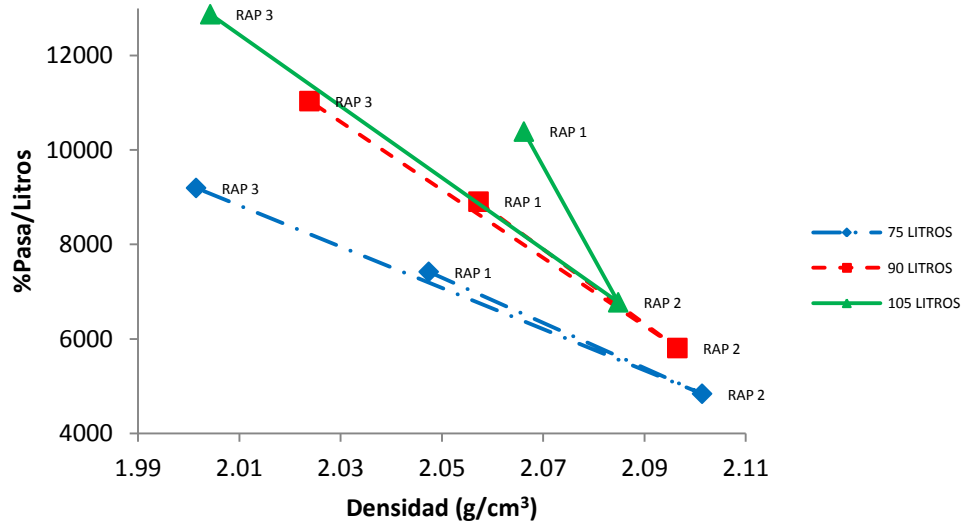
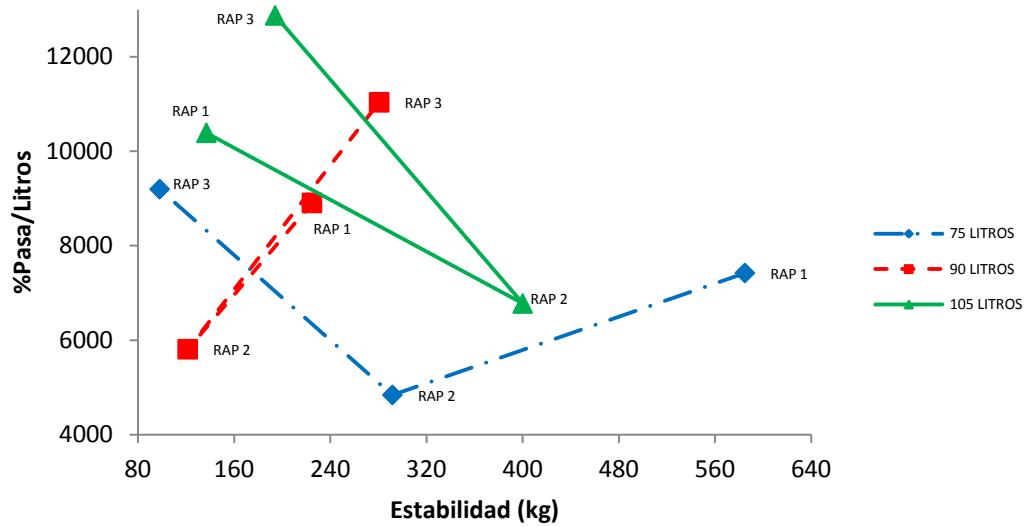
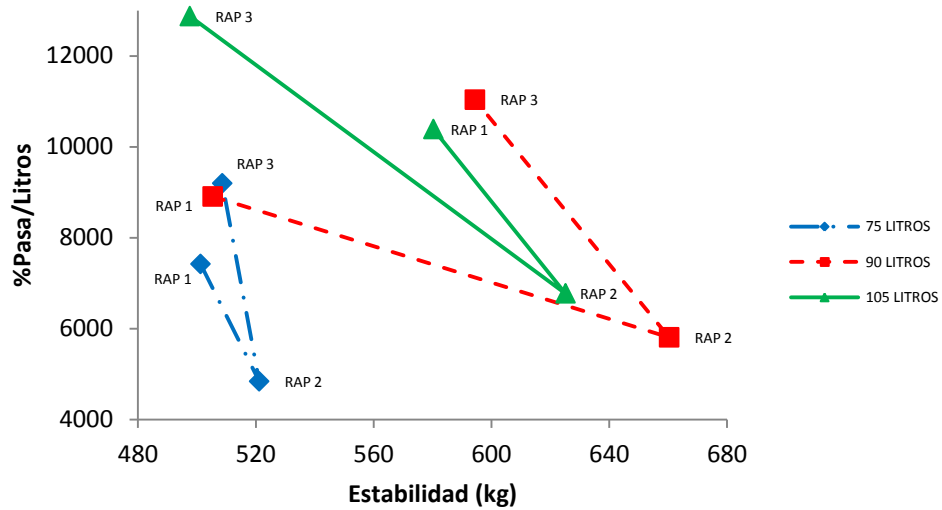


Figura 41. Comportamiento del índice de envuelta densidad – compactación dinámica.  
Fuente: Elaboración propia (2011).

Hay un comportamiento claro que demuestra que hay mayores valores de densidad en la medida que el índice de envoltura disminuye, esta relación aplica para todas las dosificaciones. Particularmente se observa que el R.A.P tipo 2 es aquel que mayores valores de densidad presenta y de acuerdo a lo anterior, menores valores de índice.

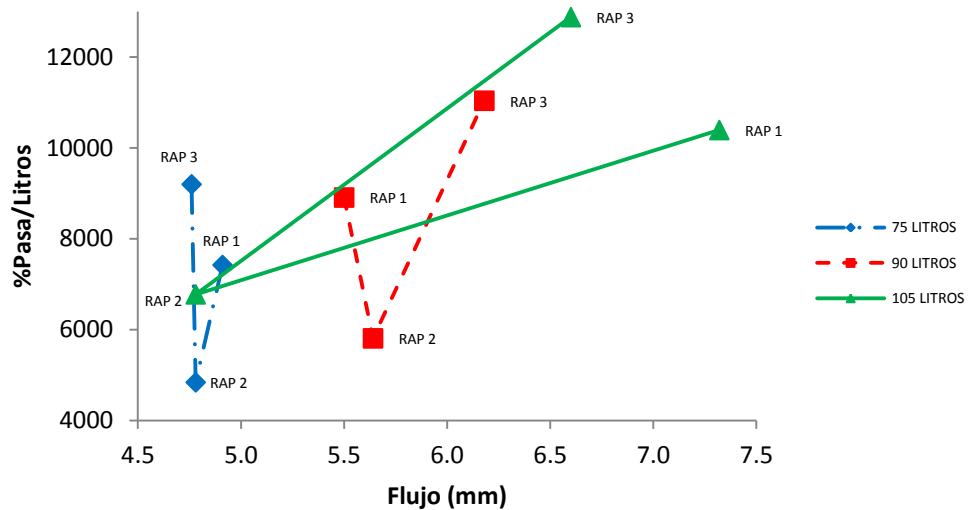


**Figura 42.** Comportamiento del índice de envoltura y la estabilidad – compactación estática.  
Fuente: Elaboración propia (2011).



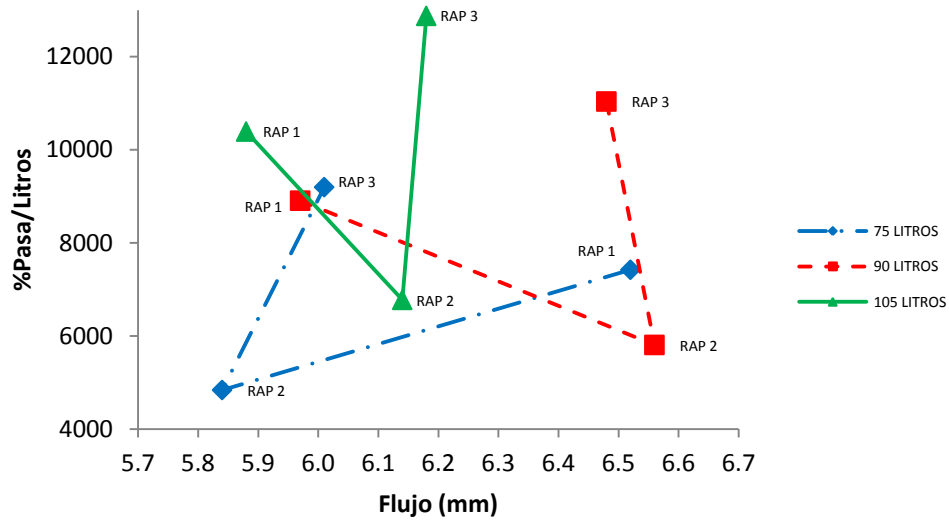
**Figura 43.** Comportamiento del índice de envuelta y la estabilidad – compactación dinámica.  
Fuente: Elaboración propia (2011).

No existen patrones claros que relacionen el índice y la estabilidad con los métodos de compactación estática y dinámica como se reflejan en la figuras 42 y 43. Para el caso de compactación dinámica se observa que las mayores estabilidades las presenta el R.A.P. tipo 2, el cual presenta los menores valores de índice en todas las dosificaciones



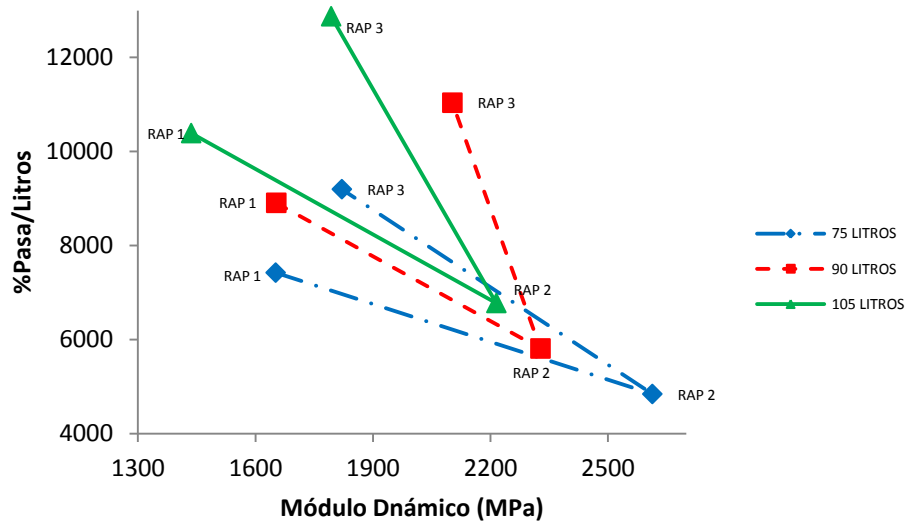
**Figura 44.** Comportamiento del índice de envuelta y el flujo – compactación estática.  
Fuente: Elaboración propia (2011).





**Figura 45.** Comportamiento del índice de envuelta y el flujo – compactación estática.  
Fuente: Elaboración propia (2011).

La relación entre el índice y el flujo resulta ser bastante errática, vista en las figuras 44 y 45, para ambos tipos de compactación, se observan cambios de flujo bastante amplios en la dosificación de 105 litros de compactación estática por efecto de una reducción en el R.A.P tipo 2, lo que lleva a pensar en la validez de dicho valor, pero se recuerda que el mismo se obtuvo del promedio de 6 ensayos individuales, lo que le da aceptación suficiente.



**Figura 46.** Comportamiento del índice de envuelta y el módulo dinámico – compactación dinámica.  
Fuente: Elaboración propia (2011).

Para el caso del módulo dinámico se observa un comportamiento claro en el cual el R.A.P. tipo 2 presenta los menores índices de envuelta y a la vez los mayores valores de módulo para las tres dosificaciones, vistos en las figuras 45 y 46. Sin embargo el R.A.P tipo 1, aun cuando tiene índices inferiores, también presenta valores de módulos inferiores, lo que lleva a pensar que la configuración del R.A.P tipo 2 es aquella que mejor respuesta dinámica presenta.

## **7. DISCUSIÓN DE OTRAS CONDICIONES**

Tomando como base los comportamientos evidenciados en el presente trabajo se puede concluir que:

Existen variaciones considerables en el orden de magnitud de los parámetros evaluados y patrones de comportamiento irregulares aún cuando las granulometrías en los tres tipos de R.A.P no tienen diferencias más allá de uno o dos tamaños de tamiz, por ende las granulometrías deben ser estudiadas de manera técnica (considerando una distribución de peso a través de una serie de tamices) para el cálculo de las dosificaciones de ligante y no como se emplea por algunas entidades las cuales simplemente toman el material directamente de la máquina de fresado sin hacer la valoración de los tamaños y agregan una misma cantidad de emulsión para todos los casos.

En la mayoría de los ensayos la granulometría que mejor respuesta mecánica presentó fue la de R.A.P 2, por lo tanto, el comportamiento del R.A.P. puede interpretarse como creciente y aceptable cuando la granulometría se ajusta a esta distribución de partículas pero cuando la misma se cambia a una distribución más fina o más gruesa su desempeño tiende a decrecer.

Dado que parte de la valoración de este estudio se hace de forma comparativa respecto de las investigaciones citadas, se concluye que las fuentes que suministran información acerca del resultado de estabilización de R.A.P con emulsión asfáltica en frío resultan ser escasas, particularmente para referencias de valores de módulos dinámicos.

Considerando que hay similitud respecto de:

- ✓ El material utilizado para la elaboración de probetas es 100% R.A.P
- ✓ Los medios de compactación en cuanto a equipos y procedimientos.
- ✓ Contenidos de fluidos mínimos
- ✓ Tiempos de rompimiento de la emulsión
- ✓ Ensayos de valoración adicional

Se propone que las principales variaciones entre los resultados de los ensayos obtenidos en el presente trabajo de grado y los demás autores consultados radican en la naturaleza de los materiales asfálticos y evidentemente en los cambios granulométricos.

Como referencia y comparación de la naturaleza de los materiales asfálticos utilizados en la estabilización se presentan las siguientes referencias:

“El tipo de emulsión bituminosa, más frecuentemente empleado en los reciclados in situ en frío es ECL – 2, con una penetración del betún residual en tomo a 200 décimas de mm. Esta emulsión debe ser compatible con la naturaleza y la granulometría de los materiales que van a reciclar, su estabilidad debe permitir antes de la rotura un reparto lo más homogéneo posible del betún residual en la masa de dichos materiales.” (Alonso, 2005).

“En algunas de las fuentes, se utiliza la emulsión de Venezuela con bitumen de penetración 100.” (Potti, 1999).

Las diferencias particulares radican en el grado de penetración de asfalto residual ya que en el presente trabajo se implementa un material que registre entre 80 y 100 décimas de milímetro (asfalto obtenido tras el rompimiento de la Emulsión asfáltica al cabo de 10 días).

En concordancia con la tabla 18, en la cual se menciona la dosificación de ligantes presentada por Peña & Soto (2004), para el presente trabajo de grado, en todos los casos se utilizó de emulsión catiónica. También se observa que la concentración de la emulsión esta alrededor del 60% de Asfalto, condición igualmente acorde con la presente investigación.

Con el fin de reiterar que los cambios en la distribución granulométrica se constituyen como causantes del comportamiento variante del desempeño en los diferentes ensayos y entre las diferentes investigaciones, se proponen las siguientes fuentes que reiteran dicha hipótesis:

“Definir la fórmula de trabajo para una mezcla reciclada es muy complicado, debido a que se trabaja con un material heterogéneo, lo que conduce a resultado no uniformes.” (Peña & Soto, 2004).

“Este estudio se ha hecho con hipótesis de partida determinadas, lo que, con la heterogeneidad del material reciclado condicionan los resultados en una gran magnitud. El uso del cemento y cal no conducen a lograr mezclas con altas resistencias finales, esto se debe a la discontinuidad de los resultados obtenidos en gran parte de las mezclas ensayadas, lo que conduce a pensar que la granulometría podría tener mucha influencia en los resultados.”(Peña & Soto, 2004).

“Estos resultados fueron causados principalmente por las diferencias de gradación de las reservas R.A.P entre la mezcla y el diseño y la producción. La unidad de cribado R.A.P no estaba disponible para el contratista hasta un par de días antes las secciones de la prueba se produjeron, por lo que la mezcla de diseños se realizaron con el laboratorio fraccionada R.A.P.” (West, 2008)

## **8. CONCLUSIONES**

De acuerdo al objeto de la investigación se observa que el cambio del rango granulométrico del material de R.A.P. así sea de uno o dos tamices, genera una variación en los resultados de los diferentes ensayos, por efecto de las mayores superficies específicas en las gradaciones más finas y por la absorción de esfuerzos por parte de las partículas en las gradaciones más gruesas.

Se resalta que de acuerdo al ensayo de valoración adelantado, ya sea densidades, estabilidad - flujo, inmersión compresión o módulo dinámico, el cambio granulométrico y la dosificación, influyen en mayor o menor medida respecto de la comparación con la normativa.

Es evidente que el material producto del proceso de fresado estabilizado con emulsión asfáltica no cumple con los parámetros de valoración propuestos por la normativa actual (INVIAS 2007) para ninguno de los ensayos adelantados, ni con los estándares de comparación de la otras fuentes citadas, razón por la cual resulta imprescindible adelantar el respectivo diseño de mezcla, con el fin de establecer las dosificaciones que den cumplimiento con la normativa.

Aunque los valores obtenidos en los ensayos no dan cumplimiento respecto de la normativa, algunas de las magnitudes como resistencias a la compresión y los módulos dinámicos, resultaron ser relativamente aceptables para usos diferentes a los propuestos constructivamente, es decir, el fresado estabilizado con emulsión asfáltica puede ser utilizado como base o sub-base granular pero no como capa de rodadura, sin embargo dicho uso es simplemente a modo de sugerencia y deberá ser corroborado con los ensayos respectivos que se aplican a un material granular de relleno, lo cual será soportado a partir de un diseño de mezcla.

Se reitera que el material no cumple respecto de las condiciones del ensayo de inmersión-compresión según la Norma INVIAS, toda vez que las resistencias conservadas en ninguno de los casos están por encima del porcentaje de aceptación del 75 %. La única mezcla que presentó un valor relativamente cercano al porcentaje de aceptación fue la de R.A.P tipo III con 90 lt/m<sup>3</sup>, con una magnitud del 67%.

Respecto a los módulos la mejor respuesta la presenta la granulometría intermedia R.A.P. 2, seguida por la granulometría más gruesa R.A.P. 3 y finalmente la granulometría más fina R.A.P. 1, lo que indica que cierto equilibrio en el tamaño de las partículas (granulometría intermedia), genera mayor desempeño mecánico, a causa de mayores densidades, según se ha observado en el presente trabajo.

El hecho que la granulometría tipo III tenga mejores respuesta que la fina, indica que el bajo desempeño de las probetas está directamente influenciado por la respuesta de la matriz fina, la cual es la que absorbe la mayor cantidad de emulsión estabilizante, partiendo del principio que a mayor cantidad de emulsión, menores valores de módulo se obtienen.

Una granulometría gruesa presenta mayor resistencia ante los esfuerzos aplicados y por ende, se opone de mejor manera a la deformación, sin embargo la susceptibilidad al agua por efecto de la mayor cantidad de vacíos, no la hacen la mejor opción constructiva. A partir de esto se explica la baja respuesta que tiene el material ante la inmersión siendo evidente que las probetas elaboradas con el R.A.P tipo III que resulta ser el más grueso, presenta mayores daños.

Es claro que aquellas muestras que tienen mayores registros de densidad son las mismas que presentan el mayor desempeño en la valoración de los módulos dinámicos, ya que hay mayor distribución de los esfuerzos entre el conjunto de partículas por efecto del mayor número de contactos.

Es claro que al agregar emulsión a un material que inicialmente contiene asfalto, aumentará el porcentaje de éste en forma significativa en la mezcla final, y teniendo en cuenta el comportamiento termoplástico de dicho material, y en contraste con los resultados obtenidos, se concluye que la variación térmica influye de modo crítico en el desempeño de las probetas.

De acuerdo a los resultados de los diferentes ensayos, se ha establecido que la mayor falencia de la estabilización radica en la matriz de materiales finos y emulsión, considerando que dicha matriz presenta porcentajes representativos en los tres tipos de R.A.P., puede establecerse que el material usado en la investigación no funciona.

Las secuencias de resultados indican que a mayor tamaño de partículas, hay mayor oposición a la deformación, pero también hay mayor contenido de vacíos, y a su vez mayor ingreso de agua, y considerando la susceptibilidad del material, se deben descartar entonces mezclas muy gruesas que no estén impermeabilizadas. En el otro extremo una mezcla fina que se va a comportar como una gran matriz de finos y emulsión, resulta ser menos recomendable.



## **9. RECOMENDACIONES**

Ya que el desarrollo de este trabajo está enfocado al análisis de la variación granulométrica y las dosificaciones propuestas, y concluyendo que el material no debe ser utilizado en tráficos altos e intermedios ni tampoco como carpeta de rodadura en las intervenciones viales en la ciudad de Bogotá (IDU, Unidad de Mantenimiento Vial). Se plantean algunas recomendaciones constructivas, aplicables únicamente para tráficos bajos a nivel de subbase o base.

### **9.1 RECOMENDACIONES CONSTRUCTIVAS**

- ✓ No adelantar las actividades de estabilización bajo condiciones de lluvia o amenaza de la misma.
- ✓ Restringir el paso vehicular las primeras 72 horas
- ✓ Cuando no se tenga prevista la colocación de carpeta asfáltica por encima del estabilizado, deberá hacerse un recubrimiento respectivo (tratamiento superficial, arena asfalto, lechada bituminosa, slurry seal) o capas aligeradas de emulsión (200 - 350 gr/m<sup>2</sup>).
- ✓ Considerando que el material resultó ser medianamente apto para tráficos bajos, es aplicable a vías locales de baja circulación (vía de barrio) en los centros urbanos, y/o vías de acceso a predios cuyo uso sea restringidos, siempre y cuando se aseguren las condiciones de recubrimiento y/o impermeabilización, dada la alta susceptibilidad al agua.
- ✓ De acuerdo a la literatura consultada, el uso de R.A.P para vías de tráfico intermedio podría avalarse aplicando dosificaciones de cemento entre 0.5% y 3%, y en los valores obtenidos de inmersión – compresión, sin embargo quedaría pendiente la corroboración del desempeño con materiales

colombianos. Sería importante hacer el comparativo de desempeño de esta opción respecto de las condiciones de estabilización en caliente con materiales bituminosos.

- ✓ Se descarta el uso del R.A.P como material de afirmado sin recubrimientos.
- ✓ Se aclara que la estabilización de fresado con emulsión asfáltica no es un mejorador de subrasantes y de acuerdo a la bibliografía, las superficies de soportes deberán estar por encima de los 120 MPa.

Se sugiere que la investigación continúe considerando las siguientes condiciones, las cuales deberán ser tenidas en cuenta para el respectivo diseño de mezcla:

- ✓ Adición de material granular virgen en porcentajes entre el 10 y el 50% en peso
- ✓ Utilización de emulsión Asfáltica de asfalto residual de penetración mayor a la implementada actualmente.
- ✓ Evaluar el R.A.P. ante ensayos de Cántabro, Micro-deval y/o máquina de los ángeles.
- ✓ Dosificaciones de cemento entre el 0.5% y el 3.0%
- ✓ Verificación del cumplimiento de los parámetros establecidos por el artículo 450 y las normativas de inmersión compresión en términos de resistencia conservada, es decir mayor al 75%.

## 10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Al-Harthy, A., Al-Shamsi, K., Al-Zubeidi, M., & Taha, R. (2002). Cement stabilization of reclaimed asphalt pavement aggregate for road bases and subbases. *Journal of materials in civil engineering*, 14, 239.
- [2] Alonso Díaz, A. (2005). Estudio del comportamiento de las mezclas recicladas en frío con emulsión incorporando distintos materiales de adición.
- [3] Brown, S., & Needham, D. (2000). A study of cement modified bitumen emulsion mixtures. *Asphalt Paving Technology*, 69, 92–121.
- [4] Chen, D.-H., & Hong, F. (2010). Lessons Learned from RAP Sections with 17 Years of Service, (4), 482-493.
- [5] FHWA. (2008). User Guidelines for by product and Secondary Use Materials in Pavement Construction,. 2008, (FHWA-RD-97-148).
- [6] Head, R. W. (1974). An informal report of cold mix research using emulsified asphalt as a binder. *Association of Asphalt Paving Technologists Proc* (Vol. 43).
- [7] Institute Asphalt, Angelone, S., Martinez, F., Osio, H., McGenis, R. B., Anderson, R. M., & Instituto Panamericano de Carreteras. (1996). *Antecedentes del diseño y análisis de mezclas asfálticas en Superpave*.
- [8] Instituto nacional de vías INVIAS. (2007). ART 461 *Reciclado de pavimento asfáltico en frío en el lugar empleando ligantes bituminosos*.
- [9] Instituto nacional de vías. INVIAS (2007). INV E - 461 *Efecto del agua sobre la resistencia a la compresión de las mezclas asfálticas compactadas (Ensayo de Inmersión-Compresión)*.
- [10] Kim, S., Sholar, G. A., Byron, T., & Kim, J. (2009). Performance of Polymer-Modified Asphalt Mixture with Reclaimed Asphalt Pavement.

- Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2126(-1), 109–114.
- [11] Ministerio de Obras y servicios Públicos de de Argentina. (2008). Provisión de mezcla de concreto asfáltico en frío. Provincia de Buenos Aires Ministerio de Obras y Servicios Públicos.
- [12] National Research Council (U.S.);National Research Council (U.S.). (2004). *Maintenance and management of pavement and structures*. Washington D.C.: Transportation Research Board National Academy of Sciences.
- [13] Peña, J. L., & Soto, J. A. (2004). Reciclado en frío con emulsión. Asociación técnica de Emulsiones Bituminosas. *Carreteras*, 3 - 30.
- [14] Potti, J. J. (1999). Emulsiones catiónicas de rotura lenta en carreteras. Primeros resultados del proyecto“ OPTEL.” *Carreteras*, (103), 81–97.
- [15] REGULACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CATIÓNICAS. (2008). MANUFACTURAS Y PROCESOS INDUSTRIALES LTDA.
- [16] Reyes Lizcano, F. A., & Figueroa Infante, A. S. (2004). Asfalto Espumoso. *Epsilon, Revista de facultades*, 2, 77 - 92.
- [17] Schmidt, R. J., Santucci, L. E., & Coyne, L. D. (1973). Performance Characteristics of Cement Modified Asphalt Emulsion Mixes. *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists* (Vol. 42, pp. 300–319).
- [18] Sintés Moya, M. (2009). Estudio del efecto de la incorporación de material granular en el reciclado con emulsión de pavimentos asfálticos, mediante el empleo del compactador giratorio.
- [19] Terrell, R. L., & Wang, C. K. (1971). Early curing behavior of cement modified asphalt emulsion mixtures. *Association of Asphalt Paving Technologists Proc* (Vol. 40).
- [20] West, R., Kvasnak, A., Tran, N., Powell, B., & Turner, P. (2009). Testing of Moderate and High Reclaimed Asphalt Pavement Content Mixes. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research*

*Board*, 2126(-1), 100–108.

- [21] Yu, X., & Li, Y. (2010). Optimal percentage of reclaimed asphalt pavement in central plant hot recycling mixture. *Journal of Wuhan University of Technology–Materials Science Edition*, 25(4), 659–662.