

**EVALUACIÓN DE FACTIBILIDAD DE REUTILIZACIÓN DE RESINAS DE INTERCAMBIO
IÓNICO EN EL PROCESO DE MEZCLA ASFÁLTICA Y MORTERO DE CEMENTO
HIDRÁULICO**

VALERIA MONTES URREGO

REYNALDO DÍAZ ALARCÓN

**Documento de grado para optar el título de Ingeniera Ambiental
Modalidad Solución a un Problema de Ingeniería**

David Orjuela Yepes

Máster en Ciencias Ambientales

(Director)

Juan Miguel Sánchez Durán

Magister en Ingeniería Civil

(Codirector)

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.

2016



CONTENIDO

1. RESUMEN	4
2. INTRODUCCIÓN	5
3. OBJETIVOS	7
3.1 OBJETIVO GENERAL	7
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	7
4. MARCO DE REFERENCIA	8
4.1 MARCO TEÓRICO	8
4.1.1 Resinas de intercambio iónico	8
4.1.2 Alternativas de manejo de resinas de intercambio iónico	9
4.1.3. Modificación de mezclas asfálticas	9
4.1.4 Pruebas para mezcla asfáltica	12
4.1.5 Pruebas para mortero de cemento hidráulico	14
4.1.6 Equipos y procedimiento	15
4.2 ESTADO DEL ARTE	18
4.3 MARCO CONCEPTUAL	19
4.4 MARCO INSTITUCIONAL	21
4.5 MARCO NORMATIVO	22
4.5.1 Asfalto modificado por vía seca	22
4.5.2 Morteros de cemento hidráulico	23
5. DESARROLLO CENTRAL	24
5.1 DEFINICIÓN DE VARIABLES	24
5.1.1 Variables para mezcla asfáltica	25
5.1.2 Variables para mortero de cemento hidráulico	26
5.2 DISEÑO EXPERIMENTAL	26



5.3 PRODUCCIÓN DE MEZCLAS Y RESULTADOS	28
5.3.1 Producción de mezcla asfáltica	28
5.3.2 Producción de mezcla de mortero de cemento hidráulico	33
5.4 ENSAYOS	38
5.4.1 Ensayos de estabilidad y flujo Marshall	38
5.4.2 Ensayos susceptibilidad a la humedad	39
5.4.3 Ensayos de resistencia a la compresión	42
5.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS	47
5.5.1 Estabilidad	47
5.5.2 Flujo	49
5.5.3 Estabilidad vs flujo	50
5.5.4 Relación llenante/ligante efectivo	51
5.5.5 Susceptibilidad a la humedad	53
6. VALORACIÓN ECONÓMICA	59
7. IMPACTO SOCIAL	60
8. IMPACTO AMBIENTAL	61
9. CONCLUSIONES	62
10. RECOMENDACIONES	64
11. BIBLIOGRAFÍA	65



1. RESUMEN

Los procesos industriales que requieren de la deionización de aguas para su desarrollo, necesitan de la utilización de diferentes tecnologías para tratar los afluentes a un punto tal que sus características químicas sean aceptables para la estandarización de la industria; uno de los mecanismos más utilizados actualmente para desionizar las aguas, es la utilización de resinas de intercambio iónico. En términos generales, una termoeléctrica puede llegar a disponer de cantidades de hasta $5\text{m}^3/\text{año}$ de esta resina para este tipo de procesos, este residuo en su etapa de postconsumo, se dispone por medio de mecanismos de alto costo como inmovilización en matrices, vitrificación o pirolisis.

Este proyecto plantea un uso alternativo de este residuo, cuando su vida útil ya ha terminado; incluyendo la resina de intercambio iónico dentro de una mezcla asfáltica o una mezcla de mortero de cemento hidráulico.

Para lograr incluirla resina en la producción de las mezclas asfálticas y de mortero de cemento hidráulico se inició realizando el análisis granulométrico del material, para definir la fracción de agregado que sería remplazada en cada una de las mezclas.

Para la producción de probetas de mezcla asfáltica se siguieron las especificaciones técnicas establecidas en el Artículo 450-13 de INVIAS. Las probetas fabricadas fueron sometidas a pruebas de estabilidad y flujo Marshall (Norma INV E 748-13) y susceptibilidad a la humedad (Norma INV E 725-13). En cuanto a la producción y ensayo de cubos de mortero de cemento hidráulico, se siguió el procedimiento descrito en la Norma INV E 323-07 y se sometieron los cubos a la prueba de resistencia a la compresión.

Al finalizar el proyecto, se evaluó la factibilidad de incorporar la resina de intercambio iónico, dentro de mezclas asfálticas y de mortero y concreto de cemento hidráulico, que requiere aún más estudio y profundización, debido a que a gran escala disminuiría los costos de disposición final de residuos sólidos y de extracción de arena de ríos y canteras en el territorio nacional.



2. INTRODUCCIÓN

La gestión integral de los residuos sólidos es actualmente un problema global debido al masivo consumo de la industria y el consumidor, así como la generación de nuevos materiales de compleja naturaleza polimérica, los cuales deben ser utilizados como una fuente de beneficio económico, en su etapa de postconsumo. Los residuos sólidos que contienen características de peligrosidad, deben ser manejados de acuerdo con lo dictado en el decreto 4741 del 2005 incluido dentro del decreto único reglamentario 1076 del 2015[1][2].

Dentro de esta clasificación de residuos sólidos, se encuentran las resinas de intercambio iónico utilizadas para procesos industriales contemplados desde termoeléctricas hasta métodos nucleares en los cuales las resinas deben ser tratadas por medio de procesos más complejos como la pirolisis. De esta problemática nace la necesidad de aprovechar las resinas de intercambio iónico (catiónicas) al final de su vida útil, no sólo por su clasificación y características de residuo peligroso, sino también por las cantidades manejadas en la industria, en procesos en los cuales se requiera la deionización de agua[3].

El material catalogado como peligroso debido a la alta carga iónica, producto de la filtración de aguas con altos contenidos de metales pesados, debe ser utilizando en su totalidad, sin agregar ningún tipo de aditivo que haga más compleja la naturaleza del polímero[4].

El aprovechamiento de esta fuente puede convertirse en beneficio económico para la industria de la construcción, disminuyendo los costos asociados a los agregados, además de reincorporar el material a su ciclo de vida, en un proceso de producción de mezcla asfáltica por vía seca y también en mortero de cemento hidráulico modificado. Vale aclarar que los beneficios ambientales del desarrollo de este proyecto a gran escala, posibilitarían disminuir la erosión causada por el dragado y/o extracción de material en las peñas y ríos[5].

La metodología utilizada, consistió inicialmente en la revisión bibliográfica de trabajos en los cuales se incluyen polímeros similares a los utilizados en el proyecto en mezclas asfálticas y de concreto. Así mismo se revisó tanto la metodología Marshall para el diseño de mezclas asfálticas en caliente, la cual especifica el desarrollo de las pruebas de estabilidad y flujo, como la prueba de susceptibilidad a la humedad de mezclas asfálticas para verificar la adherencia de la resina en la mezcla. m³



Para evaluar la posible inclusión de la resina en mezclas de mortero (y a partir de éstas deducir su comportamiento en mezclas de concreto hidráulico) se siguió la Norma INV E 323-07, que hace referencia al ensayo de resistencia a la compresión de cubos de mortero de cemento hidráulico. Una vez realizadas las pruebas se analizaron sus resultados y su viabilidad económica.

El proyecto se plantea, como una alternativa frente a la problemática de manejo de residuos sólidos poliméricos con características de difícil degradación, busca ser un punto de partida para otras iniciativas de inclusión de diferentes residuos poliméricos dentro de materiales de construcción. Adicionalmente se determinó la factibilidad técnica y económica de esta iniciativa.



3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la factibilidad del uso de la resina de intercambio iónico como agregado para la producción de mezclas convencionales de concretos asfálticos y morteros de cemento hidráulico.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Producir en laboratorio mezclas asfálticas y de mortero de cemento hidráulico incorporando la resina de intercambio por vía seca (en el agregado antes de mezclar).
- Caracterizar y analizar las mezclas de resina con cemento asfáltico y resina con mortero de cemento hidráulico a través de pruebas físico mecánicas de resistencia.
- Determinar la viabilidad técnica y económica para incluir la resina de intercambio iónico en las mezclas para la fabricación de cemento asfáltico y mortero de cemento hidráulico.



4. MARCO DE REFERENCIA

4.1 MARCO TEÓRICO

Para desarrollar el proyecto fue necesario el reconocimiento del material con el cual se trabajaría (resinas de intercambio iónico), por lo cual se investigó a fondo su composición, sus características físicas y químicas, así como las alternativas de manejo de éstas cuando su vida útil se ha agotado y se elaboró un estado del arte acerca de la utilización de este material en su etapa de postconsumo.

4.1.1 Resinas de intercambio iónico

Las resinas de intercambio iónico son materiales macromoleculares que poseen una estructura tridimensional que contiene grupos iónicos. Aunque se conocen desde hace mucho tiempo las zeolitas (aluminosilicatos) naturales y sintéticas, las cuales se han aplicado a la eliminación de la dureza del agua desde el siglo pasado, las aplicaciones analíticas del cambio iónico fueron muy escasas hasta la introducción de las resinas intercambiadoras de iones. Actualmente existen resinas de intercambio iónico catiónicas y aniónicas, encargadas de eliminar compuestos con cargas negativas y positivas, respectivamente[6].

El material del cual están hechas las resinas es de tipo polimérico, éstos son copolímero de divinilbenceno o poliestireno. Una posible categorización para los polímeros puede ser la de dividirlos en termoplásticos y termoestables, según su comportamiento con los cambios de temperatura[7]. En la **Figura 1** se observa una resina de intercambio catiónica postconsumo.

La regeneración de resinas de intercambio iónico (IEX) es un componente importante en muchas aplicaciones, tales como en el tratamiento de agua industrial, tratamiento de aguas residuales, la recuperación de iones metálicos y separación de metales pesados. Las resinas catiónicas se utilizan comúnmente en camas mixtas; aunque los intercambiadores de iones necesitan grandes volúmenes de soluciones de ácido y de base para su regeneración[8].

Según la lista de residuos peligrosos emitida por la oficina de publicaciones oficiales de la comunidad europea, las resinas de intercambio iónico agotadas o saturadas se clasifican dentro de un grupo especial, ya que requieren un tratamiento químico y/o inmovilización en matrices [9].



Figura 1. Resina de intercambio catiónica



Fuente:Aqua Systems, 2015.

4.1.2 Alternativas de manejo de resinas de intercambio iónico

El acondicionamiento que se le da a la resina de intercambio, postconsumo, en algunos casos consiste en la inmovilización empleando la vitrificación y matrices con cemento, bitumen, polímeros, entre otros. En general, las resinas se tratan por centrifugación, filtración al vacío, pulverización y secado como un paso previo a tratamientos térmicos, de oxidación, biodegradación, inmovilización y combustión. La preparación de espumas antecede a los procesos de pirolisis, incineración, degradación por plasma térmico y vitrificación[7].

Los tratamientos postconsumo más utilizados para las resinas de intercambio en la actualidad son inmovilización y combustión.

4.1.3 Composición de mezcla asfáltica y mortero de cemento hidráulico

La mezcla asfáltica está compuesta por material bituminoso, agregado fino y llenante mineral.

El llenante mineral podrá provenir de los procesos de trituración y clasificación de los agregados pétreos, separándose de ellos por medio de los ciclones de la planta mezcladora, o podrá ser de aporte como producto comercial, generalmente cal hidratada o cemento



hidráulico. Esta fracción fue la que se reemplazó por resina de intercambio iónico en la elaboración de las mezclas modificadas de acuerdo al análisis granulométrico que se explicará posteriormente en el numeral **5.3.1** producción de mezcla asfáltica[10].

El material bituminoso es el que actúa como ligante en la mezcla asfáltica, para elaborar la mezcla en caliente este será seleccionado en función de las características climáticas de la zona, el tipo de capa y las condiciones de operación de la carretera (tipo de tráfico)[10].

El agregado fino es el material más costoso dentro de los componentes de una mezcla asfáltica de gradación en caliente, el tamaño de partícula de este material no debe superar el tamiz No. 200.

Por su parte el mortero de cemento hidráulico está compuesto por 1 parte de cemento y 2.75 partes de arena normalizada y agua. La arena usada para realizar esta mezcla, es natural de peña y es el elemento a modificar en la mezcla incorporando la resina de intercambio iónico, de acuerdo a sus características granulométricas, como se especificará en el numeral **5.3.2** producción de mezcla de mortero de cemento hidráulico[11].

4.1.4 Modificación de mezclas asfálticas

En la actualidad, se han desarrollado diferentes trabajos de investigación que tienen como finalidad la reutilización de materiales poliméricos mediante la inclusión de éstos en las mezclas asfálticas.

Algunos modificadores poliméricos son:

- Homopolímeros: tienen una sola unidad estructural (monómero).
- Copolímeros: tienen varias unidades estructurales distintas (EVA, SBS).
- Elastómeros: son aquellos que al estirarlos se sobrepasa la tensión de fluencia, no sin volver a su longitud inicial al cesar el esfuerzo; tienen deformaciones pseudoplásticas con poca elasticidad.

Cada polímero tiene un tamaño de partícula de dispersión óptica para mejorar las propiedades reológicas del ligante. Todo efecto cuya acción sea la modificación de la composición química del asfalto conduce inevitablemente a la modificación de su estructura y propiedades. Al mezclar un polímero con un asfalto en caliente sin precauciones especiales ocurre uno de los siguientes tres casos:



- Mezcla heterogénea. Ocurre cuando el asfalto y el polímero son incompatibles. Los componentes de la mezcla se separan y el conjunto presenta las mismas características que el ligante original.
- Mezcla totalmente homogénea. Incluso molecularmente es el caso menos frecuente de compatibilidad perfecta. En este caso, el ligante es extremadamente estable, pero la modificación de sus propiedades de uso es muy débil respecto al asfalto original y sólo aumenta su viscosidad. Este no es el resultado deseado.
- Mezcla microheterogénea. Constituida por dos fases finamente imbricadas. Esta es la compatibilidad deseada, que permite realmente nidificar el ligante. En un sistema de estas características, el polímero compatible se hincha luego de absorber una parte de las fracciones aceitosas ligeras del asfalto para formar una fase polimérica diferente de la fase asfáltica residual, constituida por las fracciones deseadas del ligante, los aceites restantes, las resinas y los asfáltenos[12].

La tecnología de los asfaltos y las mezclas asfálticas modificadas ha sido una técnica ampliamente estudiada y utilizada en el mundo. Con la adición de polímeros al asfalto se modifican las propiedades mecánicas, químicas y reológicas de las mezclas asfálticas[13]. Cuando se utiliza esta tecnología se pretende mejorar el comportamiento que experimentan las mezclas tradicionales cuando son sometidas a diferentes condiciones de carga y del medio ambiente. Por lo general las propiedades que se intentan mejorar son la rigidez, la resistencia bajo carga monotónica, al ahuellamiento, la fatiga, y el envejecimiento, y disminuir la susceptibilidad térmica[14]. Esta tecnología es también frecuente cuando se requiere que la superficie de la carretera posea una vida útil más larga de lo normal, o aplicaciones especializadas en las cuales asfaltos modificados permiten espesores más delgados de capas asfálticas de lo que normalmente se requiere[15].

La utilización de residuos de hormigón con agregados reciclados y residuos de cerámica presenta una alternativa viable para la producción de componentes y elementos de construcción, con el fin de cumplir con los aspectos técnicos, económicos, sociales y medioambientales.

Los polímeros son los preferidos para modificación de cemento, debido al alto rendimiento, la funcionalidad y la sostenibilidad con respecto al cemento convencional[16].

La investigación de nuevos métodos para la obtención de un cemento con mejor resistencia mecánica y durabilidad, han sido el objetivo principal de investigadores en la industria de la construcción, por ello cada día se encuentran nuevos materiales que aumentan su durabilidad, resistencia e impermeabilidad, tal es el caso de microsílíce, cenizas volantes, resinas epóxicas, minerales silíceos, fibras reforzadas de polímeros, entre otros[17].



4.1.5 Pruebas para mezclas asfálticas

Entre las pruebas tradicionales para diseño de mezclas asfálticas, de bajo costo y relativamente fácil ejecución, se escogieron las siguientes:

- Prueba de estabilidad y flujo:

Después de que la gravedad específica se ha determinado, se desarrolla la prueba de estabilidad y flujo, que consiste en sumergir el espécimen en un baño termostático a $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ ($140^{\circ}\text{F} \pm 1.8^{\circ}\text{F}$) durante 30 minutos inmediatamente antes de la prueba.

Con el equipo de prueba listo, se remueve el espécimen de prueba del baño termostático y cuidadosamente se seca su superficie. Colocándolo y centrándolo en la mordaza inferior, se procede a colocar la mordaza superior y se centra completamente en el aparato de carga. Posteriormente se aplica la carga de prueba al espécimen a una deformación constante de 50,8 mm (2") por minuto, hasta que ocurra la falla. El punto de falla está definido por la lectura de carga máxima obtenida. La carga total en Newtons (lb-f) requeridos para que se produzca la falla del espécimen deberá registrarse como el valor de estabilidad Marshall.

Mientras que la prueba de estabilidad está en proceso, si no se utiliza un equipo de registro automático se debe mantener el medidor de flujo (deformación) sobre la barra guía y cuando la carga empieza a disminuir se toma la lectura y registra como el valor de flujo final. La diferencia entre el valor de flujo final e inicial expresado en milímetros o unidades de 0,25 mm (1/100") será el valor del flujo Marshall [18].



Figura2.Ensayo de estabilidad y flujo Marshall



Fuente:Autores

La estabilidad de una mezcla asfáltica es una medida de su resistencia a la compresión mientras que el flujo representa la deformación máxima que puede soportar la mezcla antes de fallar. Así entonces, una mezcla asfáltica con un valor de estabilidad alta es más resistente al ahuellamiento y una mezcla con valor de flujo alto es más flexible y resistente a la fatiga (daño por repetición de carga).

- **Susceptibilidad a la humedad:**

La susceptibilidad de daño por humedad se determina preparando un grupo de especímenes compactados en el laboratorio de acuerdo con la fórmula de trabajo de la mezcla, sin aditivos. Los especímenes son compactados a niveles de vacíos que oscilan entre 6 y 8%. El grupo es dividido en dos subgrupos con contenidos de vacíos aproximadamente iguales; cada espécimen debe tener su par en el otro grupo. Un grupo es mantenido en seco (en agua a 25°C durante 20 minutos) mientras que el otro es parcialmente saturado con agua y acondicionado en un baño de agua caliente (en agua a



60°C durante 24 horas y luego en agua a 25°C durante una hora). La resistencia a la tracción de cada uno de los subgrupos se determina por la prueba de tracción indirecta.

Figura3.Ensayo de tracción indirecta



Fuente:Autores

El potencial de daño por humedad es indicado por la relación entre la resistencia a la tensión del subgrupo húmedo y la del subgrupo seco [19]. En la prueba de tracción indirecta aplica compresión diametral a las probetas generando tracción en el sentido perpendicular a la dirección de la carga aplicada.

Así entonces, la resistencia a la tracción de la probeta es una medida de la adherencia entre el ligante y el agregado. Cuando se someten las probetas a una condición extrema de daño en agua caliente a 60°C se está evaluando aceleradamente cómo afectará el agua en el tiempo la adherencia inicial entre bitumen y agregado.

4.1.6 Pruebas para mortero de cemento hidráulico

Para evaluar el comportamiento de la resina en mezclas de mortero con cemento hidráulico se optó por la siguiente prueba:

- Resistencia a la compresión:

La resistencia a la compresión de una mezcla de mortero se determina sobre seis (6) cubos de 50mm o (2") compactados en dos (2) capas. Los cubos deben ser curados un día en los moldes y desmoldados y sumergidos en agua-cal hasta su ensayo. Las



proporciones en masa para formar el mortero usado están compuestas de 1 parte de cemento y 2,75 partes de arena normalizada. Los cubos ensayados se someten a compresión en la prensa hidráulica hasta ser fracturados, este dato de fuerza dado en Kilonewtons se convierte a carga matemáticamente dividiendo en el área de una cara del cubo [11].

La resistencia a la compresión se emplea para determinar la conformidad de la mezcla con las especificaciones y otros métodos de ensayos. Aunque los resultados de este ensayo se pueden utilizar para comparar diferentes morteros y la Norma INV E 323-07 aclara que no se deben emplear sus resultados para estimar la resistencia del concreto, en el presente trabajo se utilizan los resultados para inferir si la inclusión de la resina tendrá un efecto positivo en mezclas de concreto.

4.1.7 Equipos y procedimiento

- Tamices

El método de determinación granulométrico más sencillo es hacer pasar las partículas por una serie de tamices o mallas de distintos anchos de entramado (a modo de coladores) que actúen como filtros de los granos que se llama comúnmente columna de tamices. La abertura entre los hilos de cada tamiz, será la que determinará el número de este, como por ejemplo; un tamiz No. 40, representa una abertura de 0,425 milímetros y un tamiz 200 una abertura de 0,075 milímetros entre los hilos metálicos del tamiz[20].

- Balanza

Se debe utilizar una balanza analítica con capacidad de 2000 g y sensibilidad de 2 g[11].

La balanza es usada en dos etapas del proceso de elaboración de las probetas de mezcla asfáltica; en primera instancia es incluida en el proceso de pesado del llenante mineral, material bituminoso, agregado fino y resina de intercambio iónico. En segunda instancia la balanza fue usada para obtener los valores de peso de la probeta en aire seca, peso de la probeta en aire SSS y peso de la probeta en agua[21].

Para la elaboración de los cubos de mortero de cemento hidráulico, la balanza se utiliza para pesar la cantidad de cemento, resina de intercambio iónico y arena de peña a utilizar. Es importante que la balanza este correctamente calibrada para obtener un rango de medida adecuado con el margen mínimo de error.



- Equipo Marshall

El equipo de estabilidad Marshall es el encargado de registrar los valores de lectura de carga y flujo en centésimas de pulgadas, al igual que la balanza este equipo debe estar calibrado correctamente para su registro y funcionamiento en laboratorio.

Figura 4. Equipo Marshall

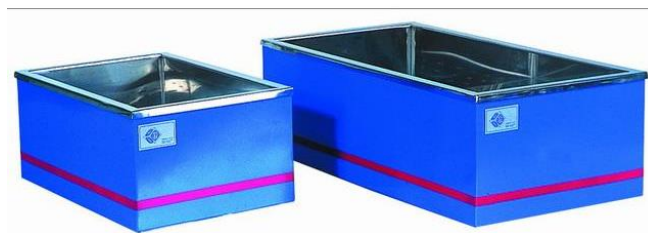


Fuente: Proetisa, 2014.

- Baño termostático Marshall

Las probetas de cemento asfáltico son puestas en agua en el equipo de baño termostático Marshall (baño de María) a una temperatura de 60°C durante 30 minutos con el fin de simular una condición crítica de temperatura y posteriormente fallarlas, a continuación, se encontrará una ilustración del equipo usado.

Figura3. Baño termostático Marshall



Fuente: Proetisa, 2014

- Prensa hidráulica

Este equipo es usado para la determinación de la resistencia a la compresión del mortero de cemento hidráulico, la estabilidad Marshall de las probetas de concreto



asfáltico e incluso para aplica compresión diametral en la prueba de tracción indirecta. Registra fuerza en Kilonewtons, la calibración correcta de este equipo es un factor determinante en la toma de datos y análisis de los mismos.

Figura 4. Prensa Hidráulica



Fuente: GEMA, 2014.

La prensa hidráulica puede ser mecánica o hidráulica, con una abertura suficiente entre los apoyos, para que permita colocar la muestra y los aparatos de comprobación. La carga aplicada a la muestra, se deberá medir con una tolerancia de $\pm 1,0\%$ [21].

El soporte superior debe tener una esfera metálica firmemente asegurada al centro del apoyo superior de la máquina (sistema de rótula) (Figura 1). El centro de la esfera está sobre la perpendicular levantada el centro de la superficie del bloque en contacto con la muestra (cubo). El bloque se coloca asentando sobre la esfera, pero se puede inclinar libremente en cualquier dirección. La diagonal o diámetro de la superficie de apoyo está ligeramente mayor que la diagonal de la cara de la muestra (cubo), pero no mayor de 74 mm, para facilitar su centrado. Debajo del cubo se coloca un bloque metálico para minimizar el desgaste del plato inferior de la máquina. Este bloque tiene marcas grabadas, que permitan centrar exactamente el cubo y su dureza Rockwell no debe ser inferior a 60 HRC. Las superficies que van a hacer contacto con los cubos deben ser planas y con variación permisible de 0,013 mm (0,0005") cuando son nuevos, y se debe mantener dentro de una variación permisible de 0,025 mm[11].



4.2 ESTADO DEL ARTE

La resina intercambiadora de iones es un material termoestable, el cual luego de ser calentado se convierte en un sólido más rígido que en sus condiciones iniciales, debido a las polimerizaciones de entrecruzamiento o polimerización adicional. Además es insoluble en disolventes orgánicos y se descompone a muy altas temperaturas[22], esta evidencia bibliográfica da una premisa de que la resina de intercambio iónico puede ser utilizada como un ingrediente más en la mezcla asfáltica y de cemento por vía seca que brinde características térmicas adicionales, conservando, las características físicas y estructurales necesarias para ser utilizado en el gremio vial y de construcciones[23].

Las resinas de intercambio iónico usadas en instalaciones nucleares constituyen, al terminar su vida útil, un tipo especial de desechos lo que conlleva a problemas asociados con el manejo y tratamiento adecuado, para su disposición fina[3].

Para la elaboración de ambas mezclas se tomó como referente investigaciones con mezclas asfálticas modificadas con polímeros de diferentes características y cemento modificado con polímeros biológicos [12]. En la actualidad no existe ningún antecedente de investigación utilizando la resina intercambiadora de iones como parte del agregado de una mezcla de mortero hidráulico o concreto asfáltico.

Con los recursos normativos de base que ofrece INVIAS en materia de asfaltos y cementos, se procederá a evaluar la calidad de las mezclas modificadas de ambos tipos (cementoasfáltico y mortero de cemento hidráulico), con esta comparación y guía de acuerdo a los parámetros establecidos por el Instituto Nacional de Vías se planea determinar si dichas mezclas poseen las características físicas necesarias para ser una alternativa viable en uso y puedan incorporarse como nuevos materiales dentro del marco normativo de la institución, dado que uno de los propósitos de INVIAS es definir la regulación técnica relacionada con la infraestructura de los modos de transporte carretero, fluvial, férreo y marítimo[24].



4.3 MARCO CONCEPTUAL

- Disposición final de residuos sólidos: Es el proceso de aislar y confinar los residuos sólidos en especial los no aprovechables, en forma definitiva, en lugares especialmente seleccionados y diseñados para evitar la contaminación y los daños o riesgos a la salud humana y al medio ambiente[25].
- Incineración: Procesamiento térmico de residuos sólidos, líquidos o gaseosos mediante la oxidación química con cantidades estequiométricas o en exceso de oxígeno. Proceso de reducir los desechos a material inerte (escoria) y a productos gaseosos completamente oxidados mediante la combustión[25].
- Formas de aprovechamiento y valorización: Como formas de aprovechamiento se consideran, entre otras, la reutilización, el reciclaje de residuos inorgánicos y los tratamientos para la estabilización de la fracción de residuos sólidos orgánicos biodegradables con fines de valorización agronómica o valorización energética. Como formas de adecuación para incorporar valor agregado existen: el lavado, la trituración, el granulado (peletizado), el aglomerado, la compactación y fundición, el óxido-reducción térmico, entre otras opciones técnicas y tecnológicas[25].
- Método Marshall: Es una serie de pruebas de laboratorio dirigidas al diseño de una adecuada mezcla asfáltica por medio del análisis de su estabilidad, fluencia, densidad y vacíos. Una de las virtudes del método Marshall es la importancia que se asigna a las propiedades densidad/vacíos del material asfáltico. Éste análisis garantiza que las importantes proporciones volumétricas de los componentes de la mezcla estén dentro de los rangos adecuados para asegurar una mezcla durable. Desafortunadamente, una de las grandes desventajas es el método utilizado para compactación en laboratorio, por impacto, el cual no estimula la densificación de la mezcla, que ocurre bajo tránsito en un pavimento real[26].
- Cemento asfáltico: Es un producto bituminoso, semisólido a temperatura ambiente preparado a partir de hidrocarburos naturales mediante un proceso de destilación, el cual contiene una proporción muy baja de productos volátiles, posee propiedades aglomerantes y esencialmente es soluble en tricloroetileno[27].



- Propiedades mecánicas de los materiales: Son las características inherentes que permiten diferenciar un material de otro, no obstante, pueden definirse como aquellas que tienen que ver con el comportamiento de un material bajo fuerzas aplicadas. Las propiedades mecánicas se expresan en términos de cantidades que son funciones del esfuerzo o de la deformación o ambas simultáneamente[27].
- Propiedades térmicas de los materiales: Se obtienen como respuesta de un material a la aplicación de calor. A medida que un sólido absorbe energía en forma de calor, su temperatura y sus dimensiones aumentan[27].
- Termoplásticos: Plásticos que, a temperatura ambiente, son deformables, se derriten cuando se calientan y se endurecen en un estado vítreo cuando se enfrían lo suficiente.
Sus propiedades físicas cambian gradualmente si se funden y se moldean varias veces (historial térmico), generalmente disminuyen estas propiedades. Dentro de ellos se encuentran el politereftalato de etileno (PET), el polietileno (PE), el policloruro de vinilo (PVC), el polipropileno (PP), el poliestireno (PS), el polimetilmetacrilato (PMMA), el teflón (o politetrafluoretileno, PTFE) y el nylon (un tipo de poliamida)[28]
- Morteros premezclado húmedos: Son los morteros constituidos por materiales cementantes, agregados, agua y eventualmente aditivos, los cuales son proporcionados y mezclados en planta. Puede tratarse de morteros convencionales o morteros de larga duración[29].
- Densidad de la mezcla: La densidad de la mezcla compactada está definida como su peso unitario (el peso de un volumen específico de la mezcla). La densidad es una característica muy importante debido a que es esencial tener una alta densidad en el pavimento terminado para obtener un rendimiento duradero. En las pruebas y el análisis del diseño de mezclas, la densidad de la mezcla compactada se expresa, generalmente, en kilogramos por metro cúbico. La densidad es calculada al multiplicar la gravedad específica total de la mezcla por la densidad del agua (1.000 kg/m^3)[30].
- Vacios de aire o simplemente vacíos: Los vacíos de aire son espacios pequeños de aire, o bolsas de aire, que están presentes entre los agregados revestidos en la mezcla final compactada. Es necesario que todas las mezclas densamente graduadas contengan cierto porcentaje de vacíos para permitir alguna compactación adicional bajo el tráfico, y proporcionar espacios adonde pueda fluir el asfalto durante su compactación adicional. El porcentaje permitido de vacíos (en muestras de laboratorio) para capas de base y capas superficiales está entre 3 y 5 por ciento, dependiendo del diseño específico[30].



- Vacíos en el agregado mineral: Los vacíos en el agregado mineral (VMA) son los espacios de aire que existen entre las partículas de agregado en una mezcla compactada de pavimentación, incluyendo los espacios que están llenos de asfalto[30].
- Contenido de asfalto: La proporción de asfalto en la mezcla es importante y debe ser determinada exactamente en el laboratorio, y luego controlada con precisión en la obra. El contenido de asfalto de una mezcla particular se establece usando los criterios (discutidos más adelante) dictados por el método de diseño seleccionado. El contenido óptimo de asfalto de una mezcla depende, en gran parte, de las características del agregado tales como la granulometría y la capacidad de absorción[30].

4.4 MARCO INSTITUCIONAL

El estado colombiano ha adoptado medidas legislativas para reglamentar la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral, incorporados en el decreto 4741 de 2005 y es su labor garantizar el cumplimiento de esta normativa que tiene como objetivo y lo plantea claramente dentro de los artículos primero (1) “Prevenir la generación de residuos o desechos peligrosos, así como regular el manejo de los residuos o desechos generados, con el fin de proteger la salud humana y el ambiente” y acogiéndonos a la definición planteada en el mismo decreto en el artículo tercero (3) en donde hace referencia “*Aprovechamiento y valorización como el proceso de recuperar el valor remanente o el poder calorífico de los materiales que componen los residuos o desechos peligrosos, por medio de la **recuperación, el aprovechamiento o la regeneración***”[1] .

Se estima que las industrias que generan resinas de intercambio iónico como residuo de postconsumo no sólo son muchas sino que generan grandes cantidades de este material, un simple ejemplo de cantidades es de la planta de Brinsa S.A. (Refisal) y Termozipa en donde en un tiempo de entre 12 a 18 meses se generan alrededor de 5 m³ del material que tiene como único tratamiento de disposición final las celdas de seguridad.

La función de las resinas de intercambio iónico consiste fundamentalmente en liberar el agua de iones contaminantes coloidales y orgánicos, este material es usado en diversas líneas de producción que van desde tratamiento de aguas, industria alimentaria, industria farmacéutica, hidrometalurgia a nivel nacional, hasta la industria nuclear a nivel internacional. Se debe



buscarla implementación y reutilización de las resinas intercambiadoras de iones en procesos adyacentes en su etapa de postconsumo para que no queden simplemente como un residuo peligroso más para su desactivación o en el caso colombiano para su disposición en celdas de seguridad[23].

4.5 MARCO NORMATIVO

A partir de la fase dos en la metodología planteada se da inicio a la elaboración estructurada del desarrollo central y análisis de resultados del presente documento y de la tesis en general, se debe tener como referente y soporte las siguientes normas en cada una de las pruebas a realizar para los asfaltos y cementos modificados con la resina intercambiadora de iones como agregado.

4.5.1 Asfalto modificado por vía seca

- Características de la mezclas asfálticas en caliente -Artículo 450-13 de INVIAS:

Para la elaboración de probetas de concreto asfáltico, con y sin resina, por vía seca se tuvo como referente el Artículo 450-13 de las actuales especificaciones de construcción INVIAS, que establece los parámetros para la elaboración, transporte, colocación y compactación, de una o más capas de mezcla asfáltica de gradación continua, preparada y colocada en caliente[10]. Esta norma se tuvo como fundamento teórico y referencia de los procedimientos de laboratorio (normas de ensayo) al incluir la resina en la gradación del agregado y preparar la mezcla asfáltica. Así como también para definir el tipo de mezcla a usar.

- Ensayo Marshall

La prueba o ensayo de estabilidad y flujo Marshall se usó como referente para evaluar la mezcla de acuerdo a las características físicas de cada probeta elaborada en el laboratorio. Haciendo uso de las tablas incluidas en el Artículo 450-13 de INVIAS para el ensayo Marshall se realizó la comparación de parámetros como compactación, estabilidad mínima, flujo, vacíos con aire, etc. que posteriormente fueron tenidos en cuenta para verificar la calidad de la mezcla con y sin la resina intercambiadora de iones y los efectos positivos o negativos de su inclusión en el comportamiento de la mezcla[31].



4.5.2 Morteros de cemento hidráulico

Para calificar la resistencia del cemento hidráulico modificado se utilizó como referente la Norma INV E 323-07 para los ensayos de resistencia a la compresión, la cual tiene como objetivo la determinación del esfuerzo de compresión de morteros de cemento hidráulico, usando cubos de 50 mm de lado. Allí se establece la metodología y especificaciones físicas de los materiales, cantidades y granulometría a trabajar para obtener las muestras a fallar[11].

Tabla 1. Criterios para el diseño preliminar de la mezcla asfáltica en caliente de gradación continua por el método Marshall.



CARACTERÍSTICA	NORMA ENSAYO INV	MEZCLAS DENSAS, SEMIDENSAS Y GRUESAS			MEZCLA DE ALTO MÓDULO	
		CATEGORÍA DE TRÁNSITO				
		NT1	NT2	NT3		
Compactación (golpes/cara)	E-748 (E-800) (Nota 1)	50	75 (112)	75 (112)	75	
Estabilidad mínima (N)		5,000	7,500 (16,875)	9,000 (33,750)	15,000	
Flujo(mm) (Nota 2)		2.0 a 4.0	2.0 a 4.0 (3.0 a 6.0)	2.0 a 3.5 (3.0 a 5.3)	2.0 a 3.0	
Relación Estabilidad / Flujo (kN/mm)		2.0 a 4.0	3.0 a 5.0 (4.5 a 7.5)	3.0 a 6.0 (4.5 a 9.0)	-	
Vacíos con aire (Va),% (Nota 3)	Rodadura	E-736	3.0 a 5.0	3.0 a 5.0	4.0 a 6.0	NA
	Intermedia	o	4.0 a 8.0	4.0 a 7.0	4.0 a 7.0	4.0 a 6.0
	Base	E-799	NA	5.0 a 8.0	5.0 a 8.0	4.0 a 6.0
Vacíos en los agregados minerales (VAM), % mínimo	T. Máx. 38 mm	E-799	13.0			-
	T. Máx. 25 mm		14.0			14.0
	T. Máx. 19 mm		15.0			-
	T. Máx. 10 mm		16.0			-
Vacíos llenos de asfalto (VFA), %	E-799	65 a 80	65 a 78	65 a 75	63 a 75	
Relación Llenante / Ligante efectivo, en peso	E-799	0.8 a 1.2			1.2 a 1.4	
Concentración de llenante, valor máximo	E-745	Valor crítico				
Evaluación de propiedades de empaquetamiento por el método Bailey	-	Reportar				
Espesor promedio de película de asfalto, mínimo µm	E-741	7.5				

Fuente: Especificaciones ensayo Marshall[31].

5. DESARROLLO CENTRAL

5.1 DEFINICIÓN DE VARIABLES



5.1.1 Variablesevaluadaspara mezclas asfálticas

Para la elaboración de las probetas se utilizó agregado de río triturado de la Planta Concescol y un asfalto convencional de Ecopetrol 60-70, ya que esta empresa es la única productora de la materia prima para la fabricación de asfalto en el país y que actualmente es utilizado en Bogotá D.C. debido a la reducción en la producción del asfalto 80-100. El contenido óptimo de asfalto se estableció en 5,5% con base en información suministrada por Concescol S.A. para mezclasde rodadura MDC-19 que son las más frecuentemente colocadas en Bogotá D.C.

Con base en esta información se dosificaron los materiales según el porcentaje de asfalto escogido y la curva granulométrica establecida en el Artículo 450-13 Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua (concreto asfáltico), de las actuales especificaciones de construcción INVIAS. Posteriormente se calentaron los agregados y el cemento asfáltico, se mezclaron sin exceder una temperatura de 150°C y la mezcla resultante se compactó aplicando 75 golpes/cara con el martillo Marshall.

A las probetas, que fueron desmoldadas hasta el día siguiente a su compactación, se les midió su altura y posteriormente se les tomaron los pesos: en el aire, sumergidas y en condición saturada y superficialmente secas (SSS) para con estos resultados poder determinar su peso unitario y composición volumétrica (porcentajes de vacíos en los agregados, vacíos con aire, vacíos llenos de asfalto, etc.).

Posteriormente se hicieron las siguientes pruebas con el fin de cuantificar las variables que permitieron hacer la comparación de las mezclas sin la resina y con la resina:

- Estabilidad y flujo Marshall

Estas variables se evaluaron de acuerdo con las especificaciones establecidas en la **Tabla 1**. (Tabla 450-10 del Artículo 450-13 INV), en la cual se definen los criterios adoptados por INVIAS para el diseño preliminar de la mezcla asfáltica en caliente de gradación continua por el método Marshall. En esta se establece un valor de estabilidad mínimo exigido y un rango de flujo para las mezclas según la categoría de tránsito del proyecto (a manera de explicación NT1 tránsito liviano, NT2 tránsito intermedio y NT3 tránsito pesado).

La estabilidad y el flujo se determinaron a través de la compresión de las probetas inmediatamente después de haber permanecido cada una en agua caliente a 60°C durante 30 minutos. Así entonces se registraron la lectura de carga máxima que soportó la probeta (estabilidad) y la deformación correspondiente a ese máximo en el mismo sentido de aplicación de la carga (flujo). Esta deformación está indicada por la disminución en el



diámetro vertical de la briqueta[30]. Esta prueba se efectuó tanto para probetas sin y con incorporación de resina.

- Susceptibilidad a la humedad

Es un parámetro definido con el propósito de medir la adherencia de los agregados (con y sin resina) y el bitumen en el conglomerado de la mezcla asfáltica, con el fin de comparar los resultados obtenidos entre mezclas convencionales y modificadas.

La susceptibilidad a la humedad se determina a partir del parámetro resistencia retenida o conservada, el cual simplemente es la razón entre la resistencia a la tracción indirecta promedio de tres probetas en una condición denominada húmeda y la resistencia al mismo ensayo de tres probetas similares en una condición denominada seca.

5.1.2 Variable evaluada para mortero de cemento hidráulico

- Resistencia a la compresión

Esta variable se obtuvo haciendo uso de la prensa hidráulica, que registra el valor de fuerza aplicada en Kilonewtons (KN) necesaria para fallar los cubos de mortero previamente fabricados (con y sin resina). Se anotó la carga máxima indicada en la prensa hidráulica (en el momento de la rotura) y el valor de resistencia a la compresión se calculó de la siguiente forma[11]:

$$f_m = \frac{P}{A}$$

Dónde:

f_m : Resistencia a la compresión en megapascuales (MPa).

P : Carga máxima total registrada en Newtons (N).

A : Área de la superficie cargada en mm^2 .

La compresión fue medida sobre 6 cubos de 50mm compactados en dos capas, tres realizados con materiales convencionales de cemento portland y tres mezclados incluyendo la resina de intercambio iónico[11].

5.2 DISEÑO EXPERIMENTAL



El diseño experimental de mezclas asfálticas se basa en un análisis de “ensayo y error”, ya que se utiliza el método Marshall, el cual es netamente empírico y ha sido desarrollado para agregados con tamaños máximos inferiores a 37,5mm (1,5”), lo que permite el diseño de mezclas en laboratorio y el control de éstas en campo, para poder verificar las correctas proporciones de ligante y agregado[32].

De acuerdo con las características del bitumen utilizado en la mezcla asfáltica (60-70), los resultados obtenidos en la pruebas de estabilidad y flujo Marshall, fueron comparadas con las especificaciones para una mezcla de gradación en caliente para niveles de tránsito 2 y 3 (NT2 Y NT3).

Para este proyecto por razones de presupuesto, se tomó el contenido óptimo de asfalto de ensayos realizados por los productores de las mezclas asfálticas que suministraron el agregado, ya que lo que interesa más es comparar el comportamiento de las mezclas de asfalto y mortero al remplazar parte del agregado pétreo por resina con las convencionales. En las mezclas de mortero se siguió la dosificación de agregado (con y sin resina), cemento y agua recomendada en la norma de ensayo INV E 323-07.

Tabla 2. Variables usadas en mezcla asfáltica

Variables para mezcla asfáltica		
FACTOR DE ANÁLISIS	VARIABLES	INDICADORES
Tipo de mezcla	Mezcla convencional	Estabilidad y flujo Marshall
		Susceptibilidad a la humedad
	Mezcla modificada	Estabilidad y flujo Marshall
		Susceptibilidad a la humedad

Fuente: Autores.



Tabla 3. Variables usadas para mortero de cemento hidráulico

Variables para mortero de cemento hidráulico		
FACTOR DE ANÁLISIS	VARIABLES	INDICADORES
Tipo de mezcla	Mezcla convencional	Resistencia a la compresión
	Mezcla modificada	Resistencia a la compresión

Fuente: Autores.

5.3 PRODUCCIÓN DE MEZCLAS Y RESULTADOS

5.3.1 Producción de mezcla asfáltica

Inicialmente se realizó el secado de la resina de intercambio iónico postconsumo, para eliminar toda la humedad de ésta y poder realizar posteriormente su análisis granulométrico.

Figura 5.Secado de la resina de intercambio iónico



Fuente: Autores



Los materiales y equipos para la elaboración de las mezclas y su granulometría fueron seleccionados cumpliendo con el Artículo 450-13 y la norma de ensayo E 323-07 de INVIAS.

- Granulometría

La granulometría utilizada correspondió al tipo de mezcla densa MDC-19, según la cual la totalidad del agregado a utilizar debe pasar por el tamiz de $\frac{3}{4}$ ". Fue tenida en cuenta la granulometría de la resina previamente tamizada para reemplazar el agregado fino (arena) comprendido entre los tamices No.10 y No.40 según su porcentaje que pasa (%Pasa). Es importante que el tamiz este correctamente armado para poder manejar la granulometría del agregado fino y llenante a usar en la mezcla y adicionarlo en la mezcla según los porcentajes establecidos en la siguiente tabla [10].

Tabla 4. Franjas granulométricas para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua

TIPO DE MEZCLA		TAMIZ (mm / U.S. Standard)									
		37.5 1 1/2"	25.0 1"	19.0 3/4"	12.5 1/2"	9.5 3/8"	4.75 No. 4	2.00 No. 10	0.425 No. 40	0.180 No. 80	0.075 No. 200
		% PASA									
DENSА	MDC-25		100	80-95	67-85	60-77	43-59	29-45	14-25	8-17	4-8
	MDC-19			100	80-95	70-88	49-65	29-45	14-25	8-17	4-8
	MDC-10					100	65-87	43-61	16-29	9-19	5-10
SEMIDENSА	MSC-25		100	80-95	65-80	55-70	40-55	24-38	9-20	6-12	3-7
	MSC-19			100	80-95	65-80	40-55	24-38	9-20	6-12	3-7
GRUESА	MGC-38	100	75-95	65-85	47-67	40-60	28-46	17-32	7-17	4-11	2-6
	MGC-25		100	75-95	55-75	40-60	28-46	17-32	7-17	4-11	2-6
ALTO MÓDULO	MAM-25		100	80-95	65-80	55-70	40-55	24-38	10-20	8-14	6-9
TOLERANCIAS EN PRODUCCIÓN SOBRE LA FÓRMULA DE TRABAJO (±)		4 %					3 %			2 %	

Fuente: Especificaciones del IDU para mezclas asfálticas [10].

Para la mezcla asfáltica se realizaron 18 probetas, 9 testigos (mezcla asfáltica convencional) y 9 probetas modificadas (incluyendo dentro de la mezcla la resina de intercambio iónico). A continuación, se explica el procedimiento seguido para la obtención de las probetas modificadas.



Se realizó el análisis granulométrico del agregado a adicionar (resina de intercambio iónico), los tamices utilizados para este análisis fueron No. 4, No. 10, No.40, No. 80 y No. 200. Ya que el material quedó retenido entre los tamices No. 10 y No. 40, se tamizó nuevamente con los tamices No. 16 y No. 30, encontrando que en su totalidad pasa el Tamiz No. 30 y queda retenido en el No. 40.

La constitución de la granulometría de la mezcla se realizó según la curva media de la franja granulométrica establecida para la mezcla MDC-19 en el Artículo 450-13 de INVIAS (**Tabla 4**) para mezclas de asfalto en caliente de gradación continua, el siguiente es el proceso que se llevó a cabo para obtener la mezcla de cemento asfáltico.

Se tomó como referente un tipo de mezcla densa MDC-19 y se realizó la granulometría; posteriormente se llegó a la conclusión que se debía reemplazar agregado retenido entre los tamices No30 y No40.

Tabla5.Determinación del peso de resina para las probetas de cemento asfáltico

Número de tamiz	% Pasa	Promedio % Pasa	Porcentaje de resina
No. 10	29-45	37,0	3,9%
No. 40	14-25	19,5	

Fuente: Autores basado en Artículo 450-13 de INVIAS.

- Composición de mezcla

Para cada probeta de 1.200 gramos se toma un contenido de material bituminoso de 5.5%, es decir 66 gramos, los restantes 1.134 gramos corresponden al agregado y con la curva granulométrica promedio entre las dos bandas que definen la franja granulométrica para la mezcla MDC-19 se determinó el porcentaje que corresponde de resina de intercambio iónico a utilizar.



Tabla 6. Granulometría para mezcla asfáltica de gradación continua en caliente MDC-19

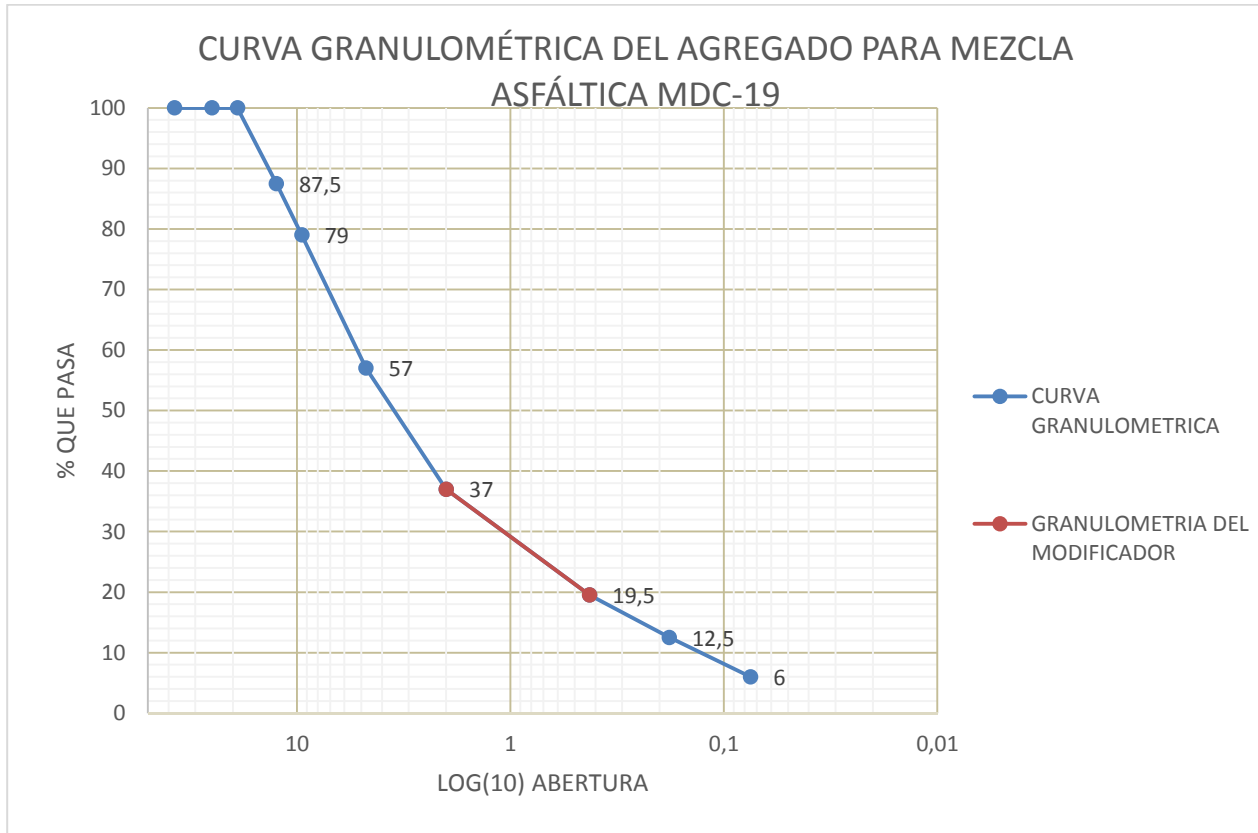
Tamiz No	Abertura en (mm)	% Pasa promedio
1 ½"	37,5	100,0
1"	25,0	100,0
¾"	19,0	100,0
½"	12,5	87,5
3/8"	9,5	79,0
No 4	4,75	57,0
No 10	2,00	37,0
No 40	0,425	19,5
No 80	0,180	12,5
No 200	0,075	6,0

Fuente: Autores, basado en Artículo 450-13 de INVIAS.

La **gráfica 1** corresponde a la granulometría del agregado, el color rojo señala el porcentaje que pasa entre los tamices No. 10 y No. 40, representados en el eje de las abscisas por el logaritmo en base 10 de su abertura (0,2 y 0,425 mm) respectivamente. De acuerdo con esta curva se procedió a calcular el peso del material a remplazar por resina intercambiadora de iones, con el fin de preparar la mezcla asfáltica modificada.

Según la curva granulométrica entre los tamices No. 10 (2,0 mm) y No. 40 (0,425 mm) está el 17,5% del agregado, sin embargo de este porcentaje sólo se remplazó la fracción comprendida entre los tamices No 30 (0,6 mm) y No. 40 (0,425 mm) que interpolando linealmente en la gráfica logarítmica corresponde al 3,9% del agregado, es decir aproximadamente 44,2 g ($1.134 \text{ g} * 0,039$).

Gráfica 1. Curva granulométrica del material granular utilizado



Fuente: Autores, basado en Artículo 450-13 de INVIAS.

No obstante dado que la curva del material granular de río utilizado no es exactamente la de la especificación (excepto en los tamices de control) lo que se hizo en laboratorio fue separar por tamizado la fracción entre los tamices No. 30 y No. 40 de agregado grueso para la mezcla asfáltica en seco y después reemplazar el mismo peso por resina de intercambio iónica, se utilizan estos dos tamices debido a que granulométricamente la resina pasa el tamiz No. 30 y queda retenida en su totalidad en el tamiz No. 40.

Los demás porcentajes fueron dosificados según la granulometría seleccionada, con agregado grueso, agregado fino y llenante mineral.

Una vez determinada la proporción a utilizar de cada componente de la mezcla, se fabricaron seis probetas de mezcla asfáltica, tres de ellas con la resina de intercambio iónico y las tres restantes convencionales (testigos), para lo cual se siguió el siguiente procedimiento:



- El asfalto y el agregado se calentaron y mezclaron completamente hasta que todas las partículas de agregado (resina de intercambio y arena) estuvieran revestidas. Esto simula los procesos de calentamiento y mezclado que ocurren en la planta.
- Las mezclas asfálticas en caliente se vertieron en moldes precalentados Marshall donde se compactaron utilizando el martillo Marshall de compactación que conserva la misma temperatura del molde con el fin de evitar que se enfríe la superficie de mezcla al golpearla y la adherencia entre la mezcla y el molde.
- Las briquetas fueron compactadas mediante golpes del martillo Marshall de compactación. El número de golpes del martillo se estableció dependiendo del tránsito para el cual la mezcla está siendo diseñada. Ambas caras de cada briqueta reciben el mismo número de golpes. Así, una probeta Marshall de 50 golpes recibe, realmente, un total de 100 golpes[26]. Para las mezclas asfálticas realizadas se dio 75 golpes por cada cara, para un total de 150 golpes de compactación.
- Después de completar la compactación las probetas fueron enfriadas y extraídas de los moldes para su posterior ensayo.

5.3.2 Producción de mezcla de mortero de cemento hidráulico

- Composición de la mezcla

Para realizar la mezcla, se ajustó la granulometría del agregado (arena) a las especificaciones dadas por la norma de ensayo INV E 323-07.

Tabla 8. Composición del mortero de cemento hidráulico

Material	6 Cubos	9 Cubos
Cemento (g)	500	740
Arena (g)	1.375	2.035
Agua (ml)		
- Portland (0,485)	242	359
Agua (ml)		
-Portland con incorporaciones de aire (0,46)	230	340

Fuente: Norma INV E 323-07[11].



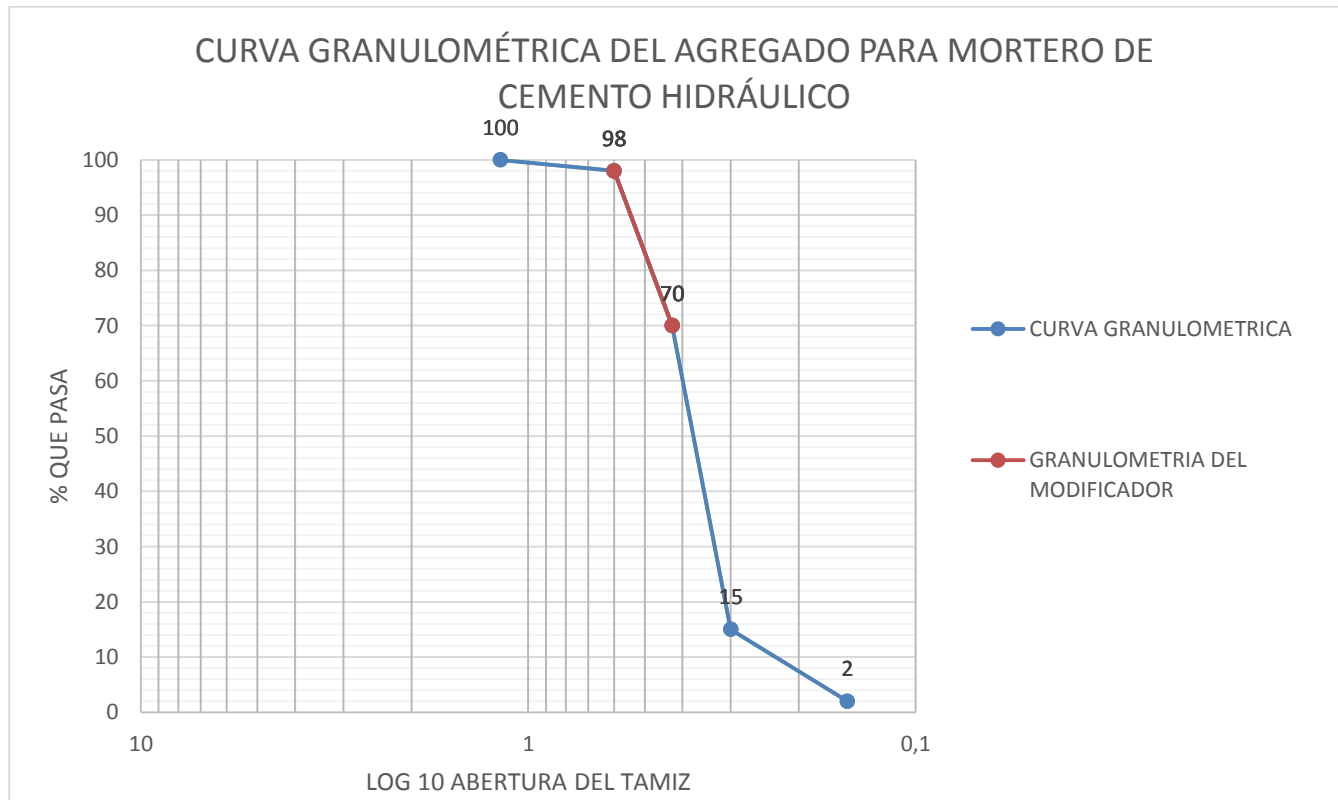
Tabla 9. Granulometría para mortero de cemento hidráulico

Tamices	Alternativo	% que pasa
118 μm	(No. 16)	100
600 μm	(No. 30)	96 - 100
425 μm	(No. 40)	65 - 75
300 μm	(No. 50)	20 - 30
150 μm	(No. 100)	0 - 4

Fuente: Norma INV E 323-07[11].

Posteriormente, se procedió a realizar la curva granulométrica, teniendo en cuenta la **Tabla 9** para determinar la cantidad de resina de intercambio iónico a utilizar.

Gráfica 2. Curva granulométrica de mortero de cemento hidráulico



Fuente: Autores.

En la **Gráfica 2** se presenta la curva granulométrica del agregado para mortero de cemento hidráulico, el color rojo señala la fracción de arena que pasa por el tamiz No. 30 y queda retenida en el tamiz No. 40, que se va a remplazar por de la resina intercambiadora de iones.



De acuerdo a esta cantidad que pasó, posteriormente se procedió a obtener el peso ideal para la inclusión en la mezcla de mortero de cemento hidráulico.

Tabla 10. Tamices correspondientes a la resina de intercambio iónico

Tamices (mm)	Alternativo	% que pasa	% DIFERENCIA
0,600	(No. 30)	98	28
0,425	(No. 40)	70	

Fuente: Autores

Al realizar la granulometría de la resina de intercambio iónico para la mezcla asfáltica, se determinó que esta queda retenida entre el tamiz No. 30 y el tamiz No.40, al promediar el porcentaje que pasa por los dos tamices (98% y 70%), se obtiene una diferencia entre estos porcentajes (28%), como se muestra en la **Tabla 10**.

La proporción de agregado (arena de peña), reemplazada por resina de intercambio iónico, en el total de 1320 gramos de arena de peña a utilizar, se muestra en la **Tabla 11**.

Tabla 11. Composición de mortero de cemento hidráulico modificado

Material	6 Cubos
Cemento	500 gramos
Arena	1155 gramos
Resina de intercambio iónico	385 gramos
Agua	242 mililitros

Fuente: Autores

La composición de la mezcla de mortero de cemento hidráulico convencional fue la siguiente:

Tabla 12. Composición de mortero de cemento hidráulico convencional

Material	6 Cubos
Cemento	500 gramos
Arena	1375 gramos
Agua	242 mililitros

Fuente: Autores

Una vez realizada la granulometría del material y determinada la proporción de cada uno de los materiales a utilizar se procedió a la preparación de las mezclas de mortero de cemento hidráulico, se realizaron 6 cubos de mortero de cemento hidráulico convencional y 6 cubos de cemento hidráulico incluyendo la resina de intercambio iónico en el agregado.



Para la preparación de las mezclas de mortero de cemento hidráulico se siguió el siguiente procedimiento:

- Se prepararon los moldes, a los cuales se les aplicó en sus caras interiores una capa delgada de aceite mineral ligero.

Figura 6.Preparación de moldes



Fuente: Autores

- Se realizó la mezcla manual en un recipiente de los componentes nombrados en la **Tabla 11**, para la mezcla modificada y en un recipiente diferente se realizó la mezcla manual de los componentes nombrados en la **Tabla 12** para mezcla convencional.

Figura 7.Dosificación de mezclas de mortero de cemento hidráulico

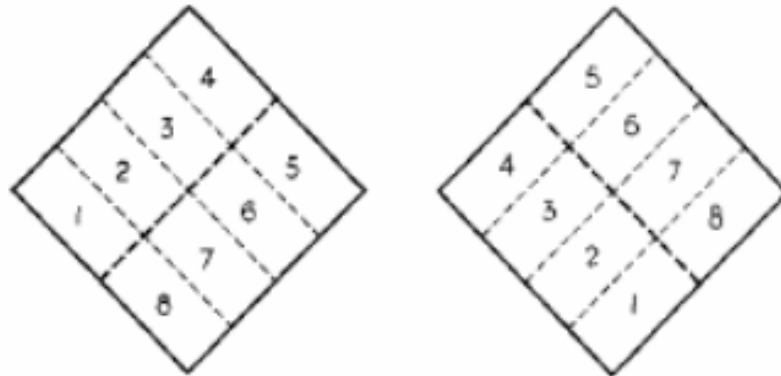


Fuente: Autores



- Los moldes fueron llenados y compactados en 2 etapas, golpeándose 32 veces en 10 segundos por la superficie, 8 golpes por cada arista, como se muestra en el siguiente esquema.

Figura 8. Golpes para compactación de mortero de cemento hidráulico.



Fuente: INV 323/2007.

- Terminada la operación de llenado, el conjunto de moldes se colocó en la cámara húmeda para ser fallados a los 3 y 7 días [11].

Figura 9. Moldes de mortero de cemento hidráulico modificado compactados



Fuente: Autores



Figura 10. Moldes de mortero de cemento hidráulico convencional compactados



Fuente: Autores

5.4 ENSAYOS

5.4.1 Ensayos de estabilidad y flujo Marshall

El ensayo de estabilidad tiene como propósito medir y registrar la resistencia a la deformación de la mezcla mientras la fluencia o flujo mide la deformación por medio de una carga sobre la mezcla.

Procedimiento de ensayo:

- El registro del peso seco, peso en agua y peso SSS (superficialmente seco) de la probeta es un paso fundamental para la determinación de la gravedad específica de la mezcla, de esta forma se podrán obtener parámetros adyacentes o derivados como porcentajes de vacíos con aire, porcentaje de vacíos llenos de asfalto importantes en la etapa de análisis de la probeta y poder corroborar la calidad de la mezcla.
- Cada una de las muestras o probetas, tanto modificadas como convencionales, son sometidas en agua a una temperatura de 60°C durante 30 minutos en el equipo termostático Marshall, esto para evaluar la resistencia o estabilidad simulando una condición crítica de alta temperatura del pavimento.



- Al remover las probetas del baño termostático fueron secadas rápidamente y ubicadas en la prensa Marshall entre dos mordazas verticales que aplican carga sobre la probeta, en el equipo a su vez se registra la carga aplicada (estabilidad) a la vez que se puede medir la deformación de la probeta (flujo).

A partir de este procedimiento se registraron los datos obtenidos durante el ensayo que se resumen en la siguiente tabla:

Tabla13. Registro de ensayos de estabilidad y flujo Marshall

TABLA DE REGISTRO DE ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL						
Probeta No	1 CV	2CV	3CV	4MD	5MD	6MD
Tipo de mezcla	MDC-19 -----					MDC-19
% Asfalto	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5
Altura de probeta (mm)	66	66	65	66	65	65
Peso probeta en aire seca (g)	1.180,7	1.191,3	1.193,5	1.194,6	1.191,4	1.166,0
Peso probeta en agua (g)	663,7	675,4	676,6	669,4	677,6	654,1
Peso probeta en aire SSS (g)	1.183,3	1.194,9	1.195,3	1.197,5	1.193,9	1.169,6
Lectura anillo de carga	53	56	54	56	54	56
Estabilidad (N)	10.654,2	11.257,3	10.855,2	11.257,3	10.855,2	11.257,3
Flujo (1/100")	15,5	17,5	11,0	13,5	18,0	16,0
Flujo (mm)	3,9	4,4	2,8	3,4	4,6	4,1
Constante de calibración del anillo						45,1

Fuente: Autores

5.4.2 Ensayos de susceptibilidad a la humedad de mezclas asfálticas

Este método de prueba se puede usar para probar mezclas de concreto asfáltico junto con la mezcla de diseño, para determinar el potencial de daño por humedad, para determinar si un aditivo adhesivo es efectivo o no y para encontrar la cantidad óptima de aditivo para maximizar su efectividad. Este método de prueba puede ser usado también para evaluar mezclas producidas en planta con el propósito de calificar la efectividad de los aditivos bajo las condiciones impuestas en el campo.

Para determinar el potencial de daño por la humedad, se debe seguir con el siguiente procedimiento:

- Se dosifican, mezclan y compactanse seis especímenes para cada prueba, tres para ser probados en seco y tres para ser probados después de la saturación parcial y acondicionamiento en baño con agua.



- Se añade la cantidad requerida de aditivo al agregado convencional y modificado con resina intercambiadora de iones y se mezcla completamente la masa entera hasta que se haya obtenido una distribución uniforme del aditivo.
- Después de la mezcla, se estabiliza la temperatura de cada espécimen a la temperatura requerida para su compactación. Se enfrían los especímenes en los moldes a la temperatura ambiente tan rápido como sea posible en una corriente de aire; se sacan de los moldes.
- Se clasifican los especímenes en dos subgrupos, de tal forma que el promedio %VV. en los dos sea aproximadamente igual. Se guarda a temperatura ambiente el subgrupo que va ser probado en seco. Se satura parcialmente con agua a temperatura ambiente el subgrupo que va ser probado húmedo. El agua para saturación puede ser calentada a 60°C (140°F) durante 24 horas.
- Se coloca un espécimen en el aparato de carga, con las franjas de carga centradas y paralelas, en el plano diametral vertical. Se aplica una carga del diametral a una tasa de deformación 50 mm/min (2"/min) hasta que se alcance la carga máxima y se registra. Se continúa cargando hasta fracturar el espécimen. Una vez desmontado el aparato se abre y se estima visualmente el daño causado por la humedad[19].

Figura 11. Probetas en baño termostático previas a fallar.



Fuente: Autores

Figura 12. Probetas con
baño termostático

inclusión de resina después de





Fuente: Autores

5.4.3 Ensayos de resistencia a la compresión de cubos de mortero

Este método de ensayo proporciona un medio para determinar la resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico y otros morteros. Los resultados se pueden emplear para determinar la conformidad con las especificaciones y otros métodos de ensayos.

Para la determinación de la resistencia del mortero se debe seguir con el siguiente procedimiento:

- Se retiran los moldes que contienen los cubos que van a ser fallados de la cámara húmeda cubriéndolos con un paño húmedo mientras se van pasando a la prensa hidráulica.

Figura 13. Moldes de mortero de cemento hidráulico modificado retirados de cámara húmeda a los 3 días



Fuente: Autores

Figura 14. Moldes de mortero de cemento hidráulico convencional retirados de cámara húmeda a los 3 días



Fuente: Autores

- Los cubos se deberán secar y dejarse limpios de arena suelta o incrustaciones en las caras que van a estar en contacto con los bloques de la máquina de ensayo.

Figura 15. Cubos de mortero de cemento hidráulico listos para ser fallados



Fuente: Autores

- Se debe comprobar por medio de una regla, que las caras están perfectamente planas, si ha y una curvatura apreciable se pueden limar las caras o desechar el espécimen.



- Se coloca cuidadosamente el espécimen en la máquina de ensayo, debajo del centro de la parte superior de la máquina, comprobándose antes de ensayar cada cubo, que la rótula gira libremente en cualquier dirección.
- Se aplica una proporción de carga en el rango de 900 a 1.800 Newton/segundoy ésta se va aumentando gradualmente hasta que el cubo se fracture[11].



Figura 16. Ensayo de resistencia a la compresión (laboratorio USTA).



Fuente: Autores

Para el proyecto, se realizó el ensayo de resistencia a la compresión dos veces, debido a que la carga soportada por el testigo (cubos de mortero convencional), disminuyó al pasar los días; razón por la cual fue necesario corroborar los resultados obtenidos.

La carga de falla para los cubos de mortero de cemento hidráulico se midió al tercer y al séptimo día de haber sido realizados.

Los datos de resistencia a la compresión para los dos ensayos se muestran a continuación:

Tabla 14. Resistencia a la compresión ensayo 1, tercer día

Ensayo 1- Día 3			
Cubo	Área de la superficie cargada (mm²)	Carga máxima total registrada (N)	Resistencia a la compresión(MPa)
Convencional 1	275,0	26.900	97,82
Convencional 2	265,0	27.100	102,26
Convencional 3	265,2	26.900	101,43
Modificado 1	265,2	17.600	66,37
Modificado 2	265,2	17.200	64,86
Modificado 3	260,1	19.000	73,05

Fuente: Autores

Tabla 15. Resistencia a la compresión ensayo 1, séptimo día

Ensayo 1- Día 7			
Cubo	Área de la superficie cargada (mm²)	Carga máxima total registrada (N)	Resistencia a la compresión(MPa)
Convencional 1	275,0	22.200	80,73
Convencional 2	265,0	19.800	74,72
Convencional 3	265,2	23.800	89,74
Modificado 1	265,2	21.900	82,58
Modificado 2	265,2	21.300	80,32
Modificado 3	260,1	22.800	87,66

Fuente: Autores

La resina de intercambio utilizada en el segundo ensayo fue nueva, ya que la empresa que proporcionó el material del primer ensayo no realizaría la disposición de éste en los meses siguientes. Los datos hallados de resistencia a la compresión en este segundo ensayo se muestran a continuación:

Tabla16. Resistencia a la compresión ensayo 2, tercer día

Ensayo 2-Día 3			
Cubo	Área de la superficie cargada(mm²)	Carga máxima total registrada (N)	Resistencia a la compresión(MPa)
Convencional 1	265,2	17.500	65,99
Convencional 2	275,6	18.600	67,49
Convencional 3	260,1	19.800	76,12
Modificado 1	265,2	6.300	23,76
Modificado 2	270,4	6.000	22,19
Modificado 3	260,1	8.300	31,91

Fuente: Autores

Tabla 17. Resistencia a la compresión ensayo 2, séptimo día

Ensayo 2- Día 7			
Cubo	Área de la superficie cargada(mm²)	Carga máxima total registrada (N)	Resistencia a la compresión(MPa)
Convencional 1	265,2	14.400	54,3
Convencional 2	275,6	15.300	55,5
Convencional 3	260,1	14.850	57,1
Modificado 1	265,2	3.400	12,8
Modificado 2	270,4	4.600	17,0
Modificado 3	260,1	4.000	15,4

Fuente: Autores

5.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

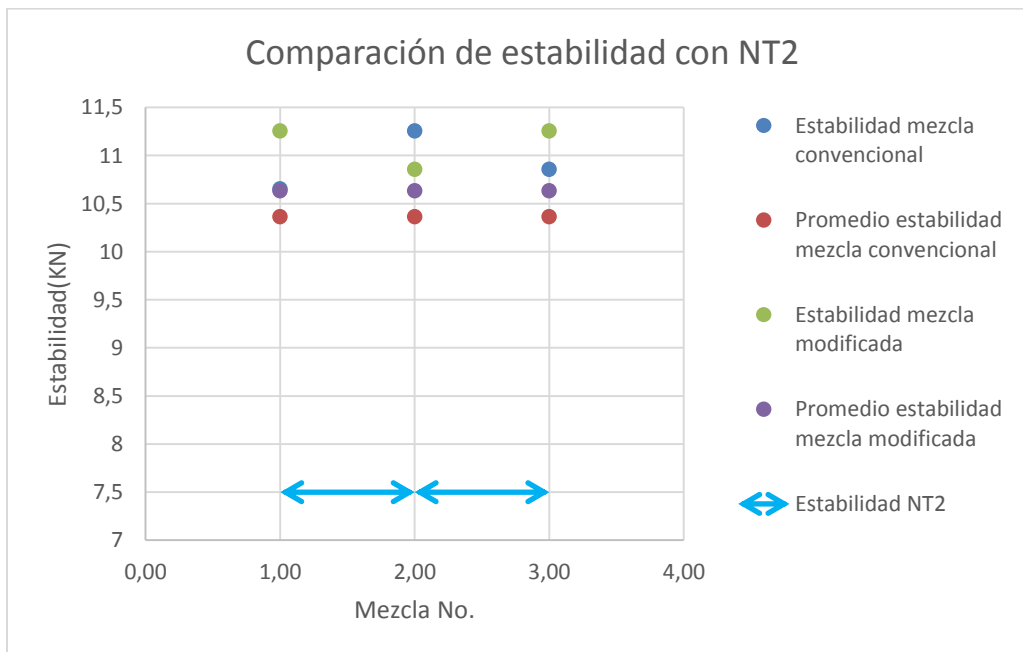
Para analizar los resultados obtenidos se compararon los resultados obtenidos de los ensayos realizados a las probetas en laboratorio con el Artículo 450-13 de INVIAS, que establece los estándares mínimos en cuanto a cada característica evaluada para mezclas de asfalto en caliente de gradación continua. Se compararon los valores obtenidos con las especificaciones para categorías de tránsito NT2 y NT3.

5.5.1 Estabilidad

Como se observa en la **Gráfica 3**, la estabilidad de las probetas de mezcla asfáltica modificada 1M-1 y 1M-2 fue mayor que la estabilidad de las probetas de mezcla asfáltica convencional 1-1 y 1-3, mientras que la estabilidad de la probeta 1M-2 es menor que la estabilidad de la probeta 1-2. Al observar el comportamiento promedio de la estabilidad, las probetas de mezcla asfáltica modificada presentan valores mayores de estabilidad a las probetas de mezcla asfáltica convencional, lo que permite inferir que la presencia de la resina no influye negativamente en la estabilidad de la mezcla.

Para todos los casos se cumple con el mínimo establecido en las especificaciones del INVIAS para nivel de tránsito 2.

Gráfica 3. Comparación de la estabilidad con nivel de tránsito 2 (INV 450-13)



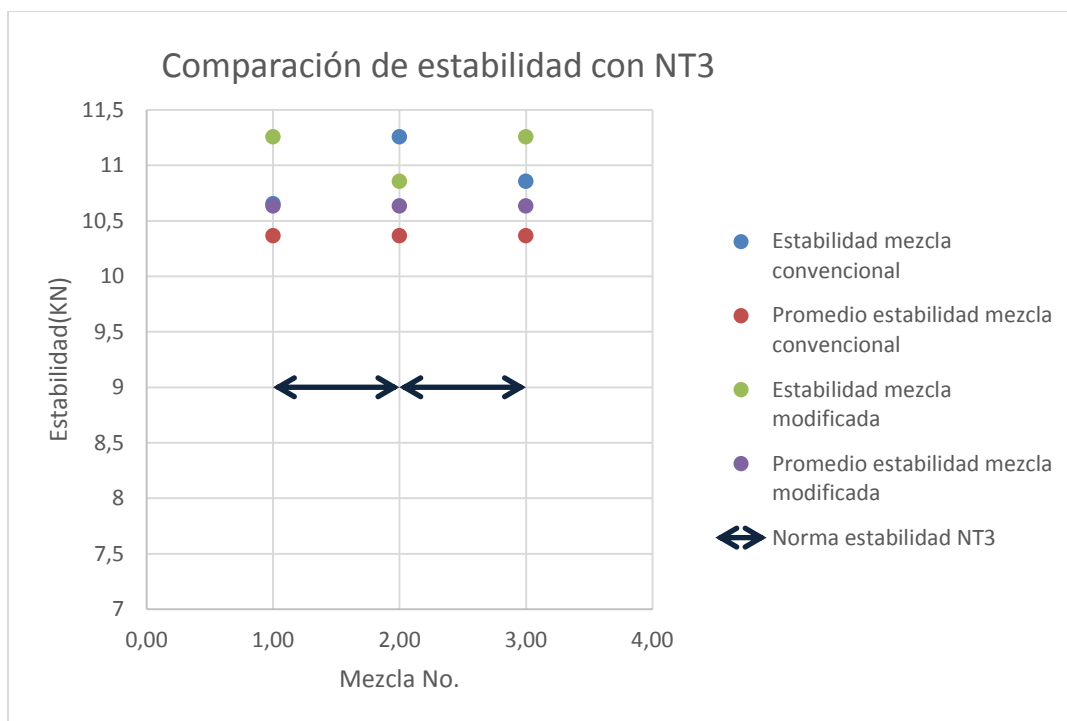
Fuente: Autores.

La estabilidad de las probetas de mezcla asfáltica modificada 1M-1 y 1M-2 fue mayor que la estabilidad de las probetas de mezcla asfáltica convencional 1-1 y 1-3, mientras que la estabilidad de la probeta 1M-2 es menor que la estabilidad de la probeta 1-2. Al observar el comportamiento promedio de la estabilidad en la **Gráfica 4**, las probetas de mezcla asfáltica modificada presentan valores mayores de estabilidad a las probetas de mezcla asfáltica convencional, lo que permite inferir que la presencia de la resina no influye negativamente en la estabilidad de la mezcla.

Para todos los casos se cumple con el mínimo establecido en las especificaciones del INVIAS para nivel de tránsito 3.

La diferencia entre los promedios de estabilidad hallados para las probetas convencionales y modificadas es de 0,10 Kilonewtons, siendo el promedio de estabilidad de las probetas de asfalto modificado de 10,63 Kilonewtons y el promedio de estabilidad de las probetas de asfalto convencional de 10,36 Kilonewtons.

Gráfica 4. Comparación de la estabilidad con nivel de tránsito 3(INV 450-13)

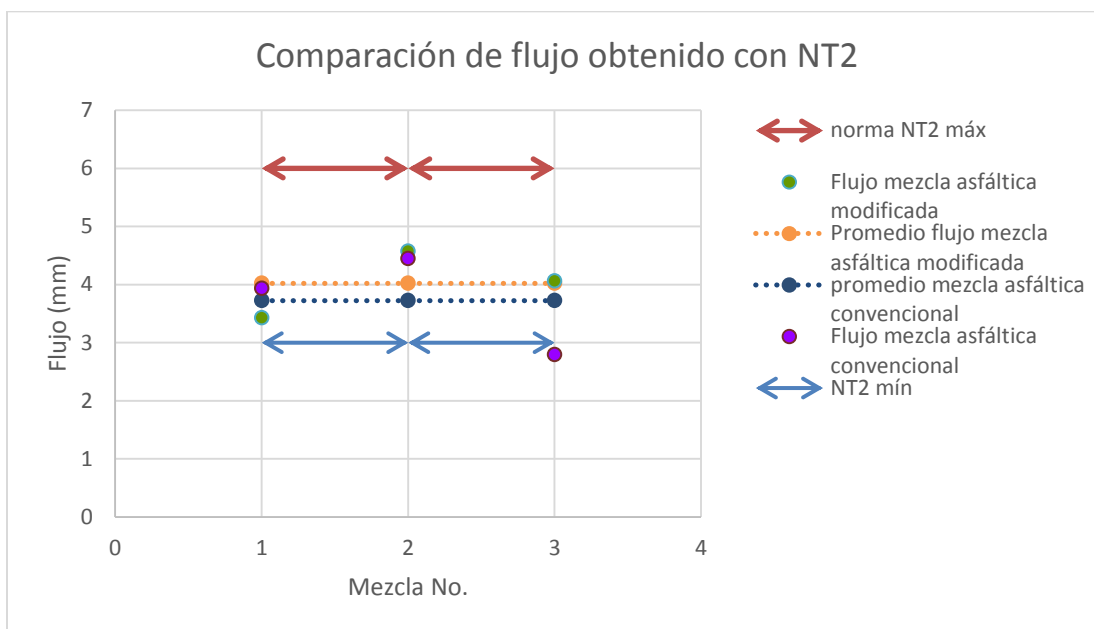


Fuente: Autores

5.5.2 Flujo

El nivel de flujo registrado tanto en las probetas convencionales como en las modificadas se encuentra dentro de los límites establecidos por la norma INV 450-13 para un nivel de tránsito 2 (NT2), la **Gráfica 5** revela una similitud en los valores promedio registrados en la prueba de flujo Marshall para cada grupo de probetas (convencional y modificada), lo que permite inferir que la resina no influye negativamente en el flujo de la mezcla de cemento asfáltico.

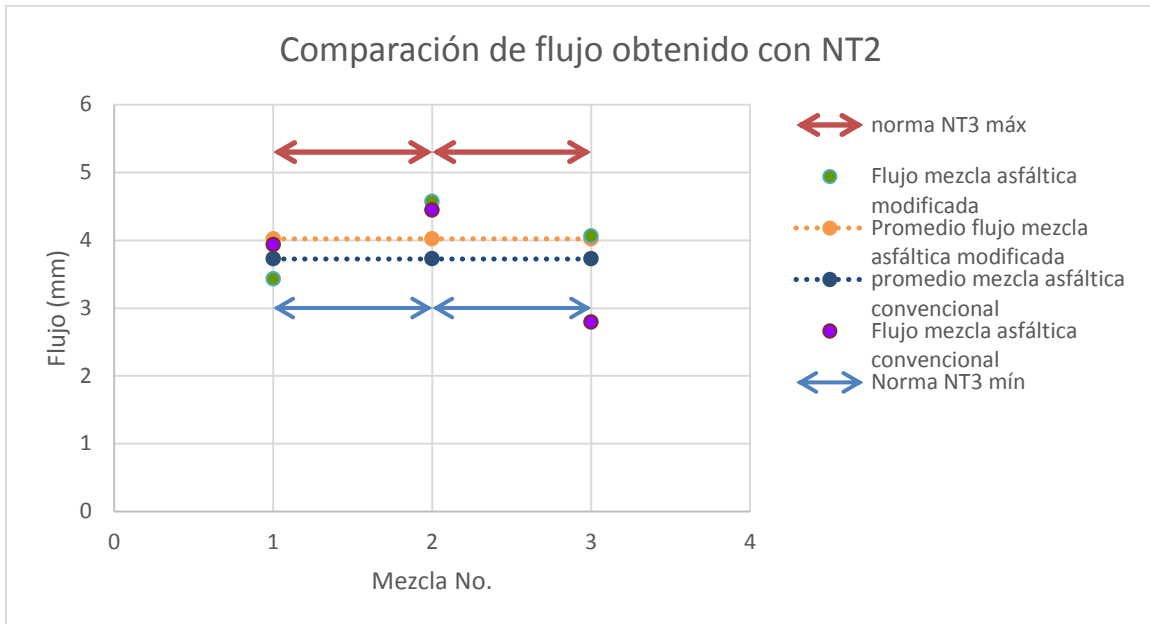
Gráfica 5. Comparación del flujo obtenido con requisitos para NT2 (Artículo 450-13 INV)



Fuente: Autores

El nivel de flujo registrado tanto en las probetas convencionales como en las modificadas se encuentra dentro de los límites establecidos por la norma INV 450-13 para un nivel de tránsito 3 (NT3), la **Gráfica 6** revela una similitud en los valores promedio registrados en la prueba de flujo Marshall para cada grupo de probetas (convencional y modificada), lo que permite inferir que la resina no influye negativamente en el flujo de la mezcla de cemento asfáltico.

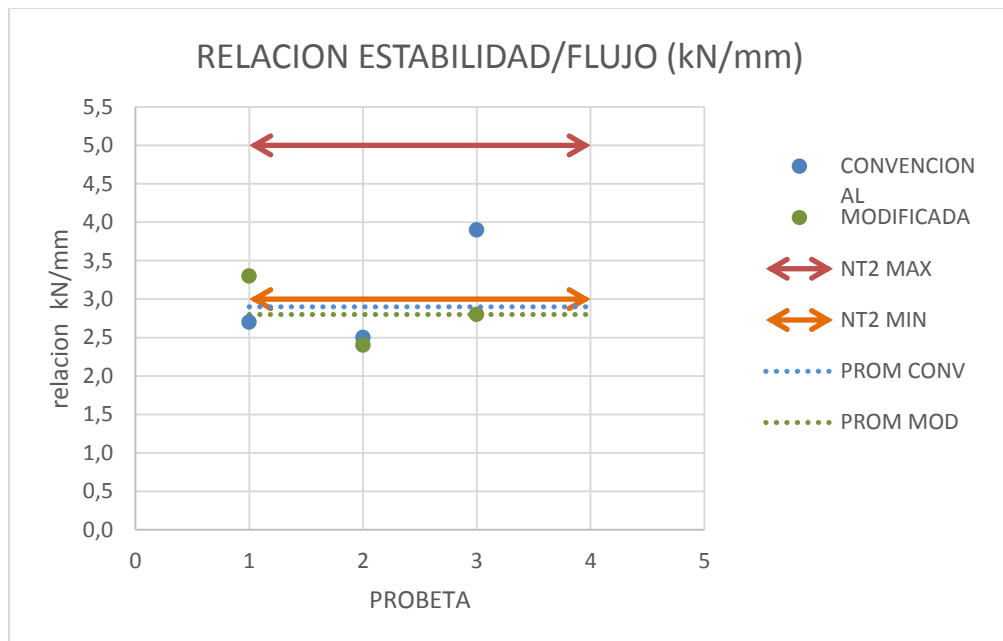
Gráfica 6. Comparación del flujo obtenido con requisitos para NT3 (Artículo 450-13 INV)



Fuente: Autores

5.5.3 Relación estabilidad / flujo

Gráfica 7. Comparación de la relación estabilidad/flujo con requisitos para NT2



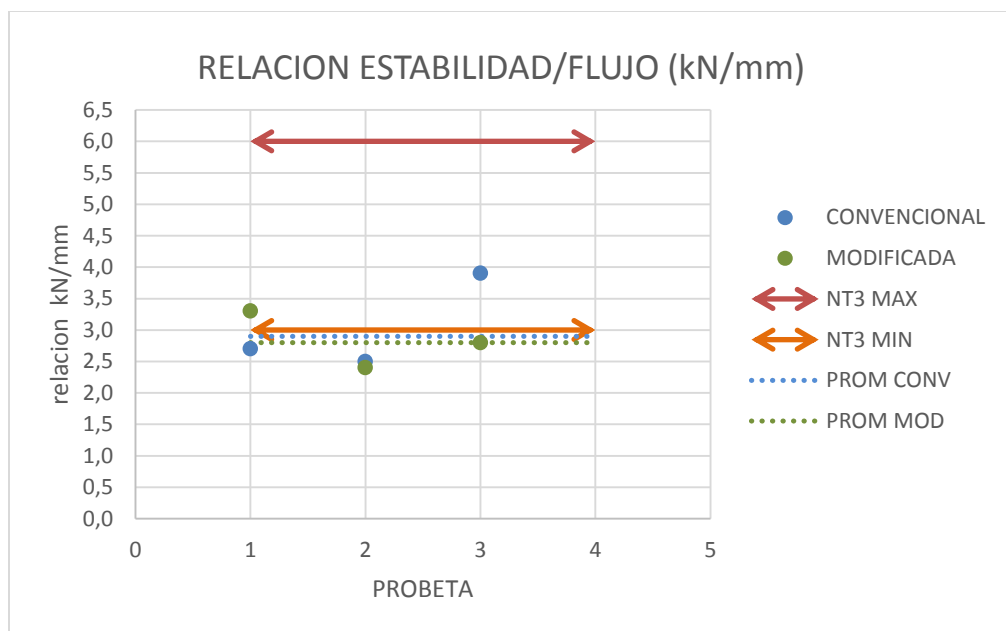
Fuente: Autores

La relación estabilidad-flujo representa el grado de fragilidad o de ductilidad de una mezcla asfáltica, en donde se puede presentar fisuración temprana o ahuellamiento prematuro, respectivamente[33].

Como se observa en la **Gráfica 7** la propiedad tiene un comportamiento similar tanto para la mezcla asfáltica convencional como para la mezcla asfáltica modificada, por lo cual no se puede asegurar que la inclusión de la resina en la mezcla empeore la fragilidad de la misma, además ninguno de los promedios de los dos grupos de probetas se encuentra dentro del rango establecido en la norma, para un nivel de tránsito 2 (NT2).

La propiedad tiene un comportamiento similar tanto para la mezcla asfáltica convencional como para la mezcla asfáltica modificada (**Gráfica 8**), por lo cual no se puede asegurar que la inclusión de la resina en la mezcla empeore la fragilidad de la misma, además ninguno de los promedios de los dos grupos de probetas se encuentra dentro del rango establecido en la norma, para un nivel de tránsito 3 (NT3).

Gráfica 8. Comparación de la relación estabilidad/flujo con requisitos para NT3



Fuente: Autores

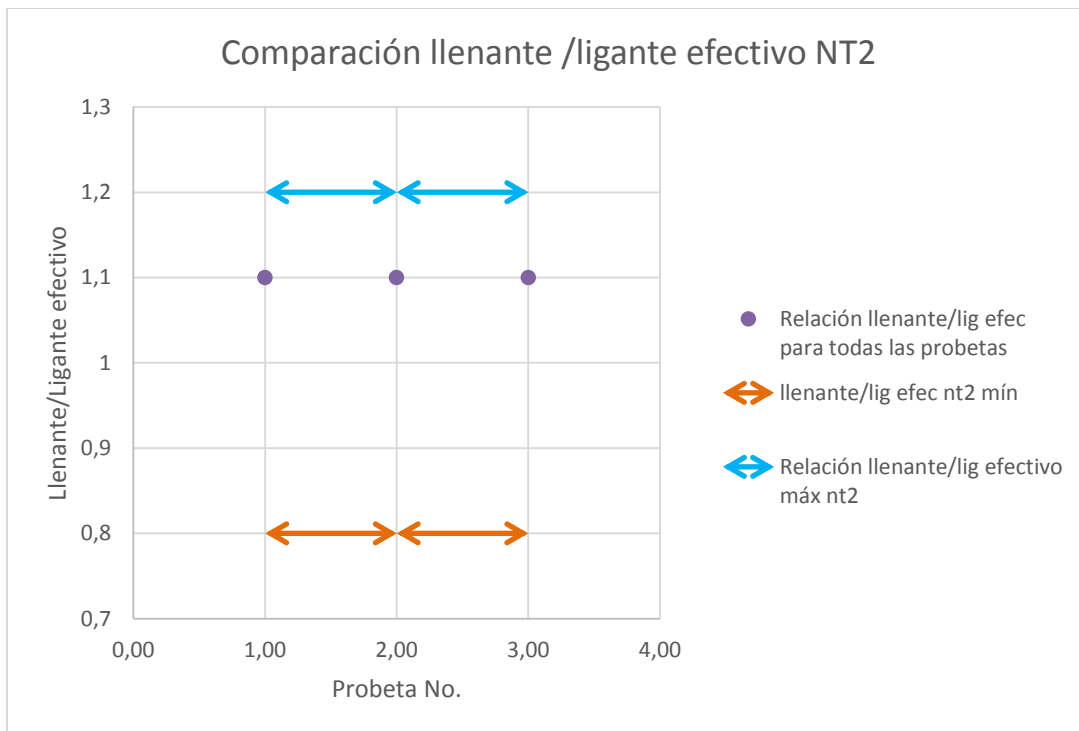
5.5.4 Relación llenante/ligante efectivo

En el aspecto técnico, una buena relación Llenante/Ligante efectivo es indispensable para cumplir con el coeficiente de rugosidad internacional o IRI, que sirve como parámetro de

referencia en la medición de la calidad de rodadura de un camino, es decir, que un buen diseño de la mezcla asfáltica es determinante en la calidad de la vía[34][35].

La propiedad hallada se encuentra dentro del rango especificado en la norma para tránsito tipo 2 (NT2), como se puede observar en la **Gráfica 9**, tanto para mezcla asfáltica convencional como para mezcla modificada el valor de la relación es de 1,1, por lo cual se concluye que la resina no alterará negativamente la calidad de la vía en cuanto a rugosidad.

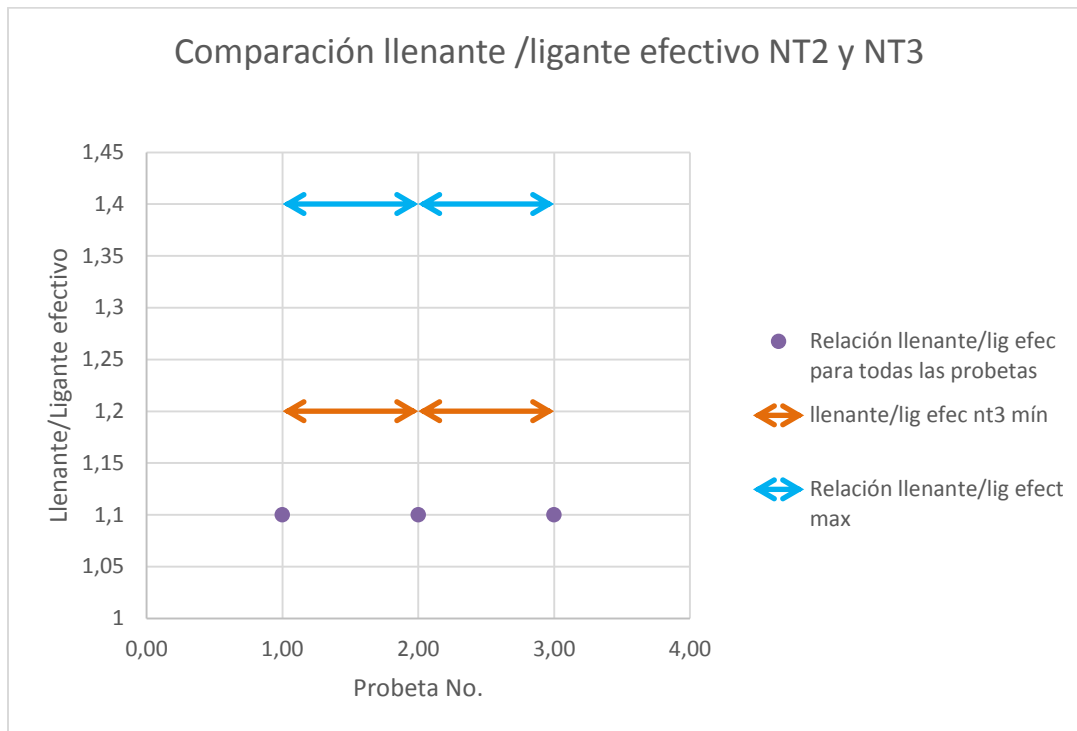
Gráfica 9. Comparación de la relación llenante/ligante efectivo con requisitos para NT2



Fuente: Autores

Como se aprecia en la **Gráfica 10** la propiedad hallada no se encuentra dentro del rango especificado en la norma para tránsito tipo 3 (NT3), tanto para mezcla asfáltica convencional como para mezcla modificada el valor de la relación es de 1,1, pero la presencia de la resina en la mezcla no altera esta propiedad, por lo cual se concluye que su inclusión no alterará negativamente la calidad de la mezcla en cuanto a rugosidad.

Gráfica 10. Comparación de la relación llenante/ligante efectivo con requisitos NT2 y NT3



Fuente: Autores

5.5.5 Susceptibilidad a la humedad

Una vez obtenidas las probetas y siendo sometidas a baño termostático se retiraron de este para ser falladas, se observó que las probetas modificadas (con resina de intercambio iónico), se destruyeron, por lo cual fue imposible someterlas a falla diametral en el aparato de carga.

Figura 17. Probetas de mezcla asfáltica modificada destruidas.



Fuente: Autores

Figura 18. Probetas de mezcla asfáltica convencionales.



Fuente: Autores

Lo anterior permitió concluir que así la estabilidad de la mezcla cumpla con los estándares exigidos por el INVIAS, el daño causado por la humedad en el material está señalando una baja o nula adherencia entre la resina de intercambio iónico y el bitumen.

5.5.6 Resistencia a la compresión de cubos de mortero de cemento hidráulico

- Fuerzas de Van Der Waals



Aplican para el segundo ensayo realizado de mortero de cemento hidráulico en el cual se obtuvo que la resistencia a la compresión de los 6 cubos realizados con mezcla modificada disminuyó y al mismo tiempo se observó que al fallar los cubos la resina de intercambio iónico pareció no haberse mezclado homogéneamente con el cemento y la arena al igual que en el primer ensayo.

Figura 19. Cubos de mortero de cemento hidráulico antes de ser fallados (ensayo 2).



Fuente: Autores

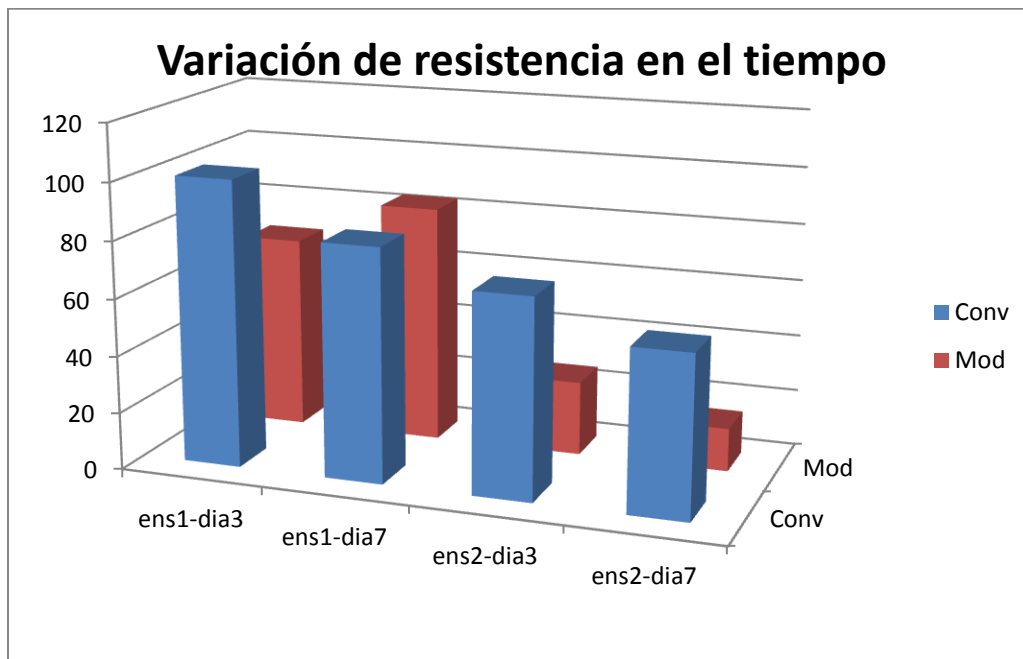
En la **Figura 19** se observa que la mezcla no compactó lo suficiente, además de esto luce frágil y fisurada.

Para efectos del segundo ensayo se debe tener en cuenta la capacidad intercambiadora de la resina, ya que para este ensayo se utilizó resina de intercambio iónico catiónica, nueva y activada, lo cual proporciona un intercambio catiónico a la mezcla, afectando negativamente su compactación y haciendo que el material se fracture muy rápido.

Lo anterior llevo a corroborar que efectivamente la resina de intercambio iónico puede ser utilizada para modificar la mezcla de mortero de cemento hidráulico, sólo una vez ha terminado su vida útil y ha tenido una desactivación adecuada.

A continuación, se relacionan la resistencia de las mezclas convencionales y modificadas tanto para el primer como para el segundo ensayo:

Gráfica 11. Variación de resistencia a la compresión en el tiempo.



Fuente: Autores.

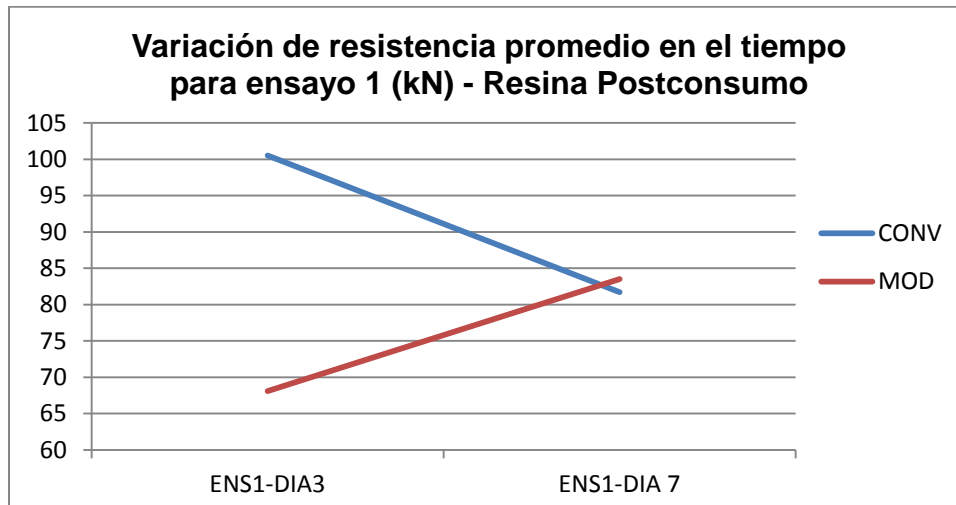
En la **Gráfica 11**. Se muestra como la resistencia para el primer ensayo disminuyó para los cubos de mezcla de mortero de cemento hidráulico convencional en 18,77 MPa entre el día 3 y el día 7, así mismo en el segundo ensayo disminuyó en 15,42MPa entre el día 3 y 7 de la falla. La mezcla modificada por su parte aumentó su resistencia entre los días 3 y 7 del ensayo 1 en 14,23MPa y disminuyó su resistencia en 10,88MPa para el ensayo 2. Vale aclarar que la resina de intercambio iónico utilizada en el ensayo 2 fue adquirida como producto nuevo más no como residuo, por lo tanto se encontraba activada y cargada de iones positivos que impidieron que la mezcla fraguara adecuadamente.

Tabla 18. Promedios de resistencia en ensayo 1 (mezcla con resina postconsumo)

Promedio de 3 ensayos	Ensayo 1 - día3	Ensayo 1-día 7
Convencional	100,5MPa	81,7MPa
Modificada	68,1MPa	83,5MPa
Relación Convencional/Modificada	1,48	0,98

Fuente: Autores.

Gráfica 12. Variación de la resistencia en el ensayo 1 (mezcla con resina postconsumo).



Fuente: Autores.

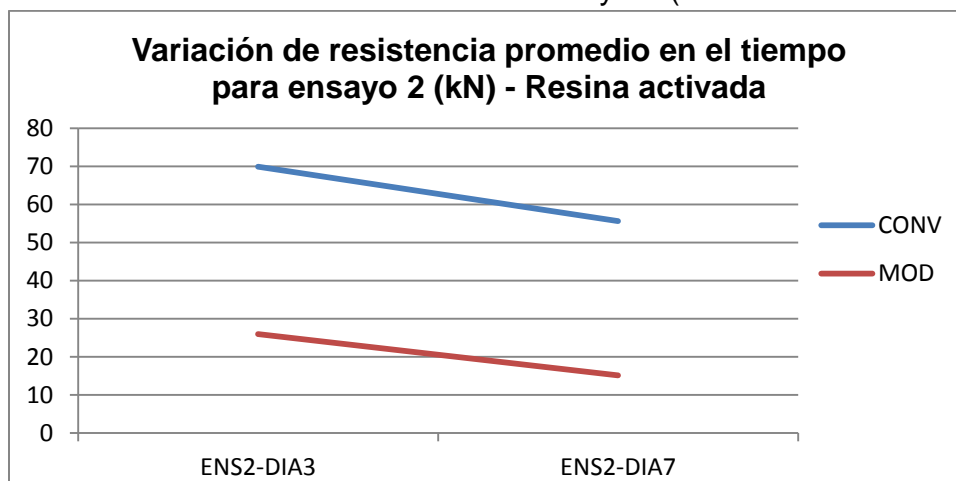
La resistencia a la compresión de la mezcla convencional durante el primer ensayo fue superior 1,47 con respecto a la mezcla modificada en la falla realizada al tercer día, como se muestra en la **Gráfica 12**. Por el contrario, al realizar la falla al séptimo día del primer ensayo, la mezcla modificada fue 0,98 veces más resistente que la mezcla convencional.

Tabla 19. Promedios de resistencia en ensayo 2 (mezcla con resina activada)

Promedio de 3 ensayos	Ensayo 2 - día3	Ensayo 2 - día7
Convencional	69,9MPa	55,6MPa
Modificada	26,0MPa	15,1MPa
Relación Convencional/Modificada	2,69	3,69

Fuente: Autores.

Gráfica 13. Variación de la resistencia en el ensayo 2 (mezcla con resina activada).



Fuente: Autores.



La resistencia a la compresión de la mezcla convencional durante el segundo ensayo fue superior 2,69 veces con respecto a la mezcla modificada en la falla realizada al tercer día, como se puede apreciar en la **Gráfica 13**. Igualmente, al realizar la falla al séptimo día del segundo ensayo, la mezcla convencional fue 3,69 veces más resistente que la mezcla modificada.



6. VALORACIÓN ECONÓMICA

La valoración económica de la inclusión de la resina intercambiadora de iones, como agregado se realizó teniendo en cuenta el costo de la arena de río para el caso de la mezcla asfáltica y el costo de la arena de peña para la mezcla de mortero de cemento hidráulico.

A continuación se comparan los costos:

Tabla 20. Costos de agregado para mezcla asfáltica y mezcla de mortero de cemento hidráulico

Material	Precio IDU por (m ³) COP\$	Cantidad analizada (Kg)	Volumen de cantidad analizada (m ³)	% Reemplazado	Volumen de resina (m ³)	Precio con resina COP	Diferencia de costo por m ³
Arena de peña	29.000	1.465	1	28,0%	0,263	21.373,00	7.627,00
Arena de río	97.500	1.470	1	3,9%	0,036	95.062,50	3.583,12

Fuente: Autores, basado en costos unitarios IDU 2015[36].

Como se observa en la **Tabla 20.** se utilizó una base de cálculo de 1m³ de mezcla a realizar, y se tuvo en cuenta los precios unitarios establecidos por el IDU con el fin de establecer una diferencia en costos que mostrara la variación de estos al utilizar la resina de intercambio como parte de las mezclas.

Para realizar la mezcla de mortero de concreto hidráulico se utiliza arena de peña como agregado, con un costo de 29.000 pesos por m³, esta cantidad representa 1.465 Kg de agregado. Si se reemplazara un 28% de arena en la mezcla de mortero de concreto hidráulico total por resina de intercambio iónico, el agregado pasaría a tener un costo de 21.373 pesos, disminuyendo 7.627 pesos el costo de la mezcla de mortero de cemento hidráulico por m³.

En el caso de la mezcla asfáltica se utiliza arena de río como agregado, con un costo de 97.500 pesos por m³, esta cantidad representa 1470 Kg de agregado. Si se reemplazara un 3,9% de arena en la mezcla asfáltica total por resina de intercambio iónico, el agregado pasaría a tener un costo de 95.062,50 pesos, disminuyendo 3.583,12 pesos el costo de la mezcla asfáltica por m³.



7. IMPACTO SOCIAL

El impacto social del proyecto se evalúa teniendo en cuenta los diferentes grupos de interés.

En primer lugar las empresas que disponen anualmente grandes cantidades de resinas de intercambio iónico se ven beneficiadas, ya que no deben preocuparse por cubrir grandes costos frente a la disposición final de un residuo peligroso.

Por otro lado, las empresas que venden los insumos demezclas asfálticas para la pavimentación de vías de tránsito tipo NT2 y NT3 así como la preparación de mezclas de mortero de cemento hidráulico; como es el caso de CEMEX, ARGOS, OTRANSPEL y otras empresas, dedicadas a la extracción y elaboración de estos materiales, disminuyen el costo asociado a los agregados utilizados en cada caso (arena de río y arena de peña).

Es importante mencionar que este proyecto representa una iniciativa innovadora, que abre la puerta a otros investigadores para desarrollar la modificación de la mezcla asfáltica y el mortero de cemento hidráulico con otros polímeros de características similares e incursionar en más pruebas físicas y químicas para ratificar su viabilidad e implementación.

Al disminuir los procesos de dragado extensivo y excavación para la obtención arena de río y de peñarespectivamente,por la posible implementación del material (resina de intercambio iónico) como insumo de las mezclas asfáltica y de mortero de cemento hidráulico se disminuye la erosión del suelo y derrumbes que esta pueda generar, además del cambio en los ecosistemas que funcionan como bien de uso directo para las comunidades en recreación y producción primaria y a su vez estos espacios son un bien común de uso indirecto ya que mantiene la belleza escénica y biodiversidad de los ecosistemas.



8. IMPACTO AMBIENTAL

Las resinas de intercambio iónico son utilizadas en diversas líneas de producción, que van desde tratamiento de aguas, industria alimentaria, industria farmacéutica, hidrometalurgia, esto a nivel nacional e internacionalmente en la industria nuclear. De esta identidad en función de la demanda del material se parte para justificar la implementación y reutilización de las resinas intercambiadoras de iones en procesos adyacentes en su etapa de post consumo y no quede simplemente como un residuo peligroso más para su desactivación y en el caso colombiano para su disposición en celdas de seguridad[23].

Este proyecto, al ser desarrollado a gran escala, mitiga el impacto que causa la extracción de agregados (arena de río y de peña), ya que su demanda en la actualidad se ha convertido en una problemática mundial **“Hasta hace poco, la mayoría de la arena se extraía de canteras y lechos de ríos. Pero con el aumento de la demanda, los proveedores comenzaron a dragar arena de aguas costeras, con un impacto enorme en la flora y fauna del fondo marino. “El dragado y extracción del suelo marino destruye organismos, hábitats y ecosistemas y afecta gravemente a la biodiversidad”, señala el informe de PNUMA”**[5].

Además de esto, se disminuye la erosión en los ecosistemas que están siendo dragados, distorsionando hábitats en el área de influencia de los proyectos de extracción, por las grandes nubes de arena liberadas, ya que la maquinaria utilizada rechaza las partículas más finas de material[5].

En la actualidad, existen diferentes investigaciones que buscan ampliar las posibilidades de manejo y disposición de las resinas intercambiadoras de iones, es este el caso de algunos trabajos desarrollados por investigadores de la Universidad industrial de Santander que demuestran que la estabilización y solidificación de la resina de intercambio en una matriz de cemento portland permite disminuir hasta por debajo de los límites establecidos por la normatividad ambiental la migración de metales al ambiente contenidos en resinas saturadas con una concentración alta de cobre, níquel y zinc, esto proporciona información valiosa en caso de querer ampliar el presente proyecto buscando características de estabilidad química en el tiempo[37].



9. CONCLUSIONES

Se obtuvo probetas de concreto asfáltico y cubos de mezcla de mortero de cemento hidráulico modificado, incluyendo resina de intercambio iónico como parte del agregado mineral de la mezcla, siguiendo las especificaciones establecidas en el Artículo 450-13 de INVIAS para mezclas densas en caliente MDC-19 en el caso del concreto asfáltico y INV E 323-07 de INVIAS para la mezcla de mortero de cemento hidráulico.

La prueba físico mecánicas realizadas para las probetas de mezcla asfáltica convencional y modificada, arrojaron resultados promedios de estabilidad Marshall de 10,36 KN y 10,63 KN respectivamente. Debido a la variabilidad de los resultados individuales no es posible asegurar con certeza que con la inclusión de la resina se aumente la estabilidad de la mezcla, pero sí se puede interpretar que no se está alterando significativamente este parámetro, manteniendo la resistencia a la compresión de este tipo de mezcla.

Por otra parte, los valores promedio del parámetro de flujo Marshall medidos para la mezcla asfáltica convencional y modificada fueron respectivamente 3,72 mm y 4,02 mm, lo cual lleva a inferir que la deformación correspondiente a la carga máxima que soporta la mezcla tampoco varía relevantemente, aun cuando las probetas con resina soportaron una deformación algo mayor.

Los valores de estabilidad y flujo obtenidos se compararon con la especificación técnica establecida en el Artículo 450-13 de INVIAS para niveles de tránsito 2 y 3, cumpliendo en general con los rangos de la especificación en ambos casos, excepto por un solo valor de flujo correspondiente a una probeta de mezcla convencional (sin resina).

La prueba de susceptibilidad a la humedad no pudo terminarse satisfactoriamente, ya que el material, al no tener la adherencia suficiente, se destruyó durante el baño termostático, lo que permite inferir que el potencial de daño por humedad es muy alto. Aparentemente la prueba está señalando una baja adherencia entre la resina y el cemento asfáltico.

La resistencia a la compresión de la mezcla de mortero de cemento hidráulico convencional, disminuyó en 18,77 MPa entre el día 3 y el día 7 en el primer ensayo, así mismo en el segundo ensayo disminuyó en 15,42 MPa entre el día 3 y 7 de la falla. Considerando que las mezclas con cemento hidráulico normalmente ganan resistencia con el tiempo se decidió repetir este ensayo.

La mezcla modificada mediante la inclusión de la resina dentro del agregado por su parte aumentó su resistencia entre los días 3 y 7 del ensayo 1 (resina postconsumo) en 14,23 MPa y disminuyó su resistencia en 10,88 MPa para el ensayo 2 (resina activada). Esto demostró



que la inclusión de la resina de intercambio iónico no agotada dentro de la mezcla de mortero de cemento hidráulico, no favorece el fraguado de la misma y corrobora que la utilización de la resina de intercambio iónico en su etapa de postconsumo no fisura la mezcla aunque se obtiene una resistencia menor que la del el mortero convencional (sin resina) del ensayo 2, la cual sí aumentó su resistencia con el tiempo.

El desarrollo de un proyecto similar a gran escala podría ser viable económicamente, ya que se disminuirían los costos relacionados con los agregados en aproximadamente un 23% (7.627 pesos) para la mezcla de mortero de cemento hidráulico por m^3 y en un 2,5% (2.437,50 pesos) el costo de la mezcla asfáltica por m^3 , reduciendo a su vez el impacto ambiental generado por el dragado en los cuencas, peñas de cantera y playas del territorio nacional.



10. RECOMENDACIONES

Durante la realización de las probetas de mezcla asfáltica modificada pueden existir algunas variaciones en los procesos de mezclado y compactación de la misma debido a que la mezcla en caliente de los componentes y su compactación se hicieron manualmente, por este motivo es recomendable aumentar la cantidad de probetas, disminuyendo así la probabilidad de error en la toma de datos. De esta manera también es posible descartar los resultados dispersos.

La elaboración de los cubos de mortero de cemento hidráulico, fue un proceso sencillo en cuanto a la mezcla y compactación de éstos en fresco, sin embargo existen limitantes en cuanto a la estandarización de los laboratorios, puesto que se realizaron en las instalaciones de la Universidad Santo Tomás; factores como la variabilidad de la temperatura y saturación en la cámara húmeda pudieron haber afectado la calidad del fraguado de la mezcla.

Para el desarrollo de futuros trabajos de investigación relacionados con el tema de estudio, se recomienda extender la cantidad de pruebas realizadas a las mezclas, ya que sería necesario realizar pruebas de estabilidad química para determinar si la lixiviación de los componentes de la resina de intercambio inmovilizados en el asfalto o el mortero de cemento hidráulico podrían llegar a afectar el ambiente.

Es importante realizar una mayor cantidad de probetas de muestra tanto para mezcla asfáltica como para mortero de cemento hidráulico, esto con el fin de tener una solidez estadística con un alto nivel de significancia y disminuyendo el margen de error para los resultados y aumentar la potencia estadística de las pruebas realizadas.



11. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ministerio de ambiente y desarrollo Territorial, "DECRETO 4741 DE 2005," no. 9. pp. 1–29, 2005.
- [2] ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, "Decreto Unico Reglamentario Sector Ambiental 1076-Mayo-2015." pp. 460–468, 2015.
- [3] R. María, F. Espinosa, H. B. Ortiz Oliveros, M. T. Olgún Gutiérrez, M. E. Hernández, Y. Homero, and G. Martínez, "Caracterización y disposición de resinas de intercambio iónico utilizadas en instalaciones nucleares," pp. 1–7, 2006.
- [4] P. Lastra-González, M. A. Calzada-Pérez, D. Castro-Fresno, Á. Vega-Zamanillo, and I. Indacochea-Vega, "Comparative analysis of the performance of asphalt concretes modified by dry way with polymeric waste," *Constr. Build. Mater.*, vol. 112, pp. 1133–1140, 2016.
- [5] B. Edwards, "La demanda insaciable de arena," *Finanz. y Desarro.*, pp. 2012–2013, 2015.
- [6] E. Sallee, *Separaciones analíticas*. Barcelona.
- [7] L. Residuales, C. Fuente, A. D. E. Nutrientes, A. Martínez-prado, M. E. Pérez-lópez, J. Pinto-espinoza, B. Amelia, G. Ana, T. De Durango, B. Felipe, P. Ote, and C. Nueva, "TERMODEGRADACIÓN DE RESINAS AGOTADAS DE INTERCAMBIO IÓNICO DE LECHO MIXTO," vol. 27, no. 3, pp. 241–252, 2011.
- [8] M. D. Víctor-Ortega, J. M. Ochando-Pulido, D. Airado-Rodríguez, and A. Martínez-Ferez, "Comparison between different ion exchange resins combinations for final treatment of olive mill effluent," *Sep. Purif. Technol.*, vol. 158, pp. 374–382, 2016.
- [9] Umwelt bundesamt, "European Waste List (EWL)," *Umwelt bundesamt web site*, 2015. [Online]. Available: <http://www.umweltbundesamt.de/en/topics/waste-resources/waste-management/waste-types/waste-classification>. [Accessed: 01-Apr-2016].
- [10] INVIAS, "Norma invias 450-13," INVIAS, Ed. INVIAS, 2007, pp. 1–47.
- [11] INVIAS, "RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE MORTEROS DE CEMENTO HIDRÁ ULICO." INVIAS, pp. 1–9, 2007.
- [12] A. S. Figueroa-infante, E. B. Fonseca-santanilla, and F. A. Reyes-lizcano, "Caracterización fisicoquímica y morfológica de asfaltos modificados con material reciclado * Physicochemical and Micromorphological Evaluation of Asphalt Modified," *Doctor*, vol. 13, no. 1, pp. 45–70, 2009.
- [13] G. Polacco, S. Filippi, F. Merusi, and G. Stastna, "Historical perspective A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts : Asphalt / polymer interactions and principles of compatibility," *Adv. Colloid Interface Sci.*, vol. 224, pp. 72–112, 2015.
- [14] D. Casey, C. McNally, A. Gibney, and M. D. Gilchrist, "Development of a recycled polymer modified binder for use in stone mastic asphalt," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 52, no. 10, pp. 1167–1174, 2008.
- [15] C. Brovelli, M. Crispino, J. Pais, and P. Pereira, "Using polymers to improve the rutting resistance of asphalt concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 77, pp. 117–123, 2015.
- [16] B. J. B. Kardon, "Polymer-Modified Concrete : Review," vol. 9, no. MAY, pp. 85–92, 1997.
- [17] M. J. E. Oliveira, "Agregado reciclado empregado na produção de concreto modificado com aditivo," *Exacta*, vol. 4, pp. 15–24, 2006.
- [18] P. G. Anguas, H. Delgado, A. José, A. Gómez, L. Sergio, A. Romero, H. Alonso, and A. Orta, "ASPECTOS DEL DISEÑO VOLUMÉTRICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS," 2004.
- [19] INVIAS, "EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD AL AGUA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS UTILIZANDO LA PRUEBA DE TRACCIÓN INDIRECTA." INVIAS, 2007.



- [20] Perfomallas s.s, “tamices,” 1997. [Online]. Available: http://www.perfomallas.com/tamiz_tabla.html.
- [21] Invias, “INV E-748. Resistencia de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall,” pp. 1–15, 2007.
- [22] D. Marta and S. Maier, “Dra. Marta Silvia Maier,” *Polimeros*, pp. 1–23, 1869.
- [23] R. Almaraz and M. Cruz, “Síntesis, caracterización y aplicación del PS entrecruzado a partir de residuos de PS,” *Rev. Iberoam. Polímeros*, vol. 8, no. 2, pp. 112–137, 2007.
- [24] “OBJETIVOS INVIAS.”
- [25] L. Orden Ministerio de Vivienda, C. Territorio Viceministerio de Agua Saneamiento Básico, M. de Vivienda, and C. Territorio, “Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS,” 2012.
- [26] “CAPITULO 1. Estado del Arte (Diseño de mezclas asfálticas).”
- [27] Alcaldía mayor de Bogotá, “idu 200-11.”
- [28] Daylin Betancourt, “APROVECHAMIENTO DEL POLIESTIRENO EXPANDIDO (ICOPOR) RECICLADO COMO ALTERNATIVA A LA FIBRA DE VIDRIO EN EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE AUTOPARTES EN LA EMPRESA VENTILADORES GBA,” Santo Tomás, 2015.
- [29] icontec, “NORMA TÉCNICA NTC COLOMBIANA 3356.” Icontec, Bogotá DC, pp. 1–15, 2000.
- [30] Asphalt Institute, *Principios de Construcción de Pavimentos de mezcla asfáltica en caliente*. Asphalt Institute, 2001.
- [31] INVIAS, “TABLAS ESPECIFICACIONES INVIAS 2013 PARA ENSAYO MARSHALL.” invias, pp. 1–10, 2013.
- [32] J. F. Gutierrez, J. A. Espitia, and M. J. Gutierrez, “COMPARACIÓN DE UNA MEZCLA MDC – 2 CONVENCIONAL Y UNA MODIFICADA CON POLIESTIRENO EXPANDIDO Y POLVO DE LLANTA COMPACTADA ESTÁTICAMENTE,” Universidad de la Salle, 2009.
- [33] O. Javier, R. Ortiz, J. Ricardo, T. Rivera, J. Fernando, and C. Tauta, “COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y DINÁMICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CON ADICIÓN DE CENIZAS VOLANTES *.”
- [34] J. M. Beltrán, “DISEÑO DE LA RELACIÓN OPTIMA FILLER/BITUMEN PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS PRODUCIDAS EN EL DEPARTAMENTO DEL VALLE CON,” Unv. Militar Nueva Granada, 2015.
- [35] M. C. Arriaga, P. Paul, G. Anguas, and A. Rico Rodríguez, “ÍNDICE INTERNACIONAL DE RUGOSIDAD EN LA RED CARRETERA DE MÉXICO,” p. 18, 1998.
- [36] IDU, “visor_precios_unitarios_2015,” 2015.
- [37] S. Paola, A. Vergara, I. Liliana, and R. Gaviria, “ESTABILIZACIÓN/SOLIDIFICACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA LA DEPOSICIÓN SEGURA DE RESINAS DE INTERCAMBIO IONICO SATURADAS CON METALES PESADOS,” 2008.