



**Universidad
de Valparaíso**
CHILE

Facultad de Ingeniería
Escuela de Construcción Civil

**“EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES
MECÁNICAS DE ADOQUINES DE ASFALTO
<<ADOFALTOS>>, CON SUSTITUCIÓN DE
CEMENTO PORTLAND PUZOLÁNICO COMO
FILLER”**

Por

Pedro Daneri Bravo.

**TRABAJO DE TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CONSTRUCTOR
Y EL GRADO ACADÉMICO DE LICENCIADO EN CIENCIAS DE LA
CONSTRUCCIÓN**

PROFESORA GUÍA:

SARA OJEDA H.

Valparaíso, Chile
ABRIL, 2018

I. Dedicatoria

Esta investigación va dedicada a la persona más importante en mi vida.

Sin sus enseñanzas, su entrega, sus ganas de vivir y de luchar jamás
habría logrado nada.

A ti madre que me acompañaste en cada una de las etapas de mi vida,

A ti que jamás me abandonaste en esta lucha,

Tú que me cuidas desde el cielo.

Esto es por ti y para ti.

TE AMO MAMÁ Jacqueline del Carmen Bravo Muñoz

Eres lo mejor que me paso en la vida.

II. Agradecimiento

Agradezco a cada una de las personas que se cruzaron en mi camino y formaron parte de este proceso.

Agradezco a mis tíos Silvana y Eduardo con quienes he podido contar incondicionalmente y se preocuparon de mí aun cuando no era su responsabilidad.

Agradezco a mis amigos quienes fueron un pilar importante para no desistir de esta lucha, en especial a Hans Hofmann quien es más que un amigo es un hermano, a Nicol Fuentes quien fue la persona más preocupada de mí en todo este proceso me ayudo como nadie en lo académico y lo emocional.

Agradezco a la mujer que se preocupa de mí a diario, la persona que me hace feliz día a día y quien fue la más importante en este último proceso universitario, quien es mi familia, la luz de mis días, a la mujer que amo Muriel Rivera Gallardo sin ti nada sería tan bello.

Agradezco a los profesores Mauricio González, Uriel Padilla y Jorge Rivera quienes en más de alguna ocasión se dieron el tiempo de escucharme y entregarme algún consejo más allá de lo académico.

Y un agradecimiento especial a mi profesora guía Sara Ojeda quien me ayudo a tomar la decisión de no abandonar la carrera, me aconsejo y apoyo como ningún otro le estaré eternamente agradecido.

Contenido

i.	Dedicatoria	2
ii.	Agradecimiento	3
iii.	Resumen.....	8
iv.	Abstract	9
v.	Glosario:	10
1	CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	11
1.1	Pregunta de investigación	11
1.2	Introducción	12
1.3	Planteamiento del problema	14
1.4	Objetivo general.....	15
1.5	Objetivos específicos.....	15
1.6	Alcances.....	16
1.7	Metodología de trabajo.	17
1.7.1	Diagrama de flujo	17
2	Capitulo II: MARCO TEÓRICO	18
2.1	Antecedentes teóricos	18
2.1.1	El adoquín.....	18
2.1.2	Tipos de adoquines	20
2.1.2.1	Adoquines naturales	20
2.1.2.2	Adoquines fabricados.....	20
2.2	Adofaltos	21
2.3	El asfalto	22
2.3.1	Emulsión Asfáltica	23
2.3.2	Clasificación de las emulsiones asfálticas	23
2.3.3	Mezclas Asfálticas.....	24
2.3.4	Mezclas Asfálticas en frio (MAF)	24
2.3.5	Usos	24
2.3.6	Clasificación.....	24
2.4	MAF con reemplazo de filler	25

2.5	Requisitos de los agregados pétreos.....	25
2.5.1	Fracción Gruesa.....	25
2.5.2	Fracción Fina.....	26
2.5.3	Mezcla de Áridos.....	26
3	Capítulo III: METODOLOGÍA.....	28
3.1	Metodología Experimental.....	28
3.2	Definición de las variables.....	28
3.3	Factorial de ensayo.....	29
4	Capítulo V: DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN.....	30
4.1	Selección de materiales.....	30
4.2	Agregados pétreos seleccionados.....	30
4.2.1.1	Características del Árido Grueso suministrado:.....	30
4.2.1.2	Características del Árido Fino suministrado:.....	31
4.2.1.3	Características del Árido Combinado.....	31
4.2.1.4	Banda Granulométrica seleccionada.....	32
4.2.1.5	Tabla de tanteos de áridos.....	33
4.2.1.6	Curvas granulométricas.....	34
4.2.2	Asfalto.....	35
4.3	Determinación del contenido de asfalto.....	36
4.4	ELABORACIÓN DE MEZCLAS.....	39
4.5	ELABORACIÓN DE PROBETAS.....	45
5	CAPITULO VI: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	47
5.1	RESULTADOS OBTENIDOS.....	47
5.2	Análisis de precio unitario.....	52
6	CAPITULO IV: CONCLUSIONES.....	53
7	Recomendaciones y futuras investigaciones.....	56
8	Bibliografía.....	57
	ANEXOS.....	59
	ANEXO A: Procedimientos de laboratorio.....	60

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Parámetros entregados en investigación adofaltos.....	21
Tabla 2: Clasificación MAF por % Vacíos	24
Tabla 3: Requisitos para la fracción Gruesa, MAF	25
Tabla 4: Requisitos para la fracción Fina, MAF	26
Tabla 5: Requisitos para Árido Combinados, MAF	26
Tabla 6: Granulometría de Áridos: Granulometría Densa	27
Tabla 7: Diseño factorial para la muestra en base a contenido de cemento.....	29
Tabla 8: Ensayes realizados al Árido Grueso	30
Tabla 9: Ensayes realizados al Árido Fino	31
Tabla 10: Ensayes en Laboratorio Universidad de Valparaíso, realizados al Árido	31
Tabla 11: Banda granulométrica IV – 10	32
Tabla 12: Mezcla de áridos en banda.....	33
Tabla 13: Ensayes realizados a la Emulsión CSS-1h	35
Tabla 14: Muestra de 500 gr.....	37
Tabla 15: Tanteos de agua y emulsión.....	39
Tabla 16: Resultados muestra 4.	40
Tabla 17: Tanteos de agua y emulsión.....	40
Tabla 18: Resultados muestra 8.	41
Tabla 19: Tanteos de agua y emulsión.....	42
Tabla 20: Resultados muestra 11.....	43
Tabla 21: Resultados muestra 10.....	44
Tabla 22: Resultados ensayos resistencia a compresión.....	47
Tabla 23: Resultados ensayos resistencia a flexotraccion.....	49
Tabla 24 Resultados ensayo de desgaste superficial.	51
Tabla 25: Análisis de precio unitario.	52

Índice de figuras

Figura 1: Diagrama de flujo metodología de trabajo.....	17
Figura 2 Árido grueso seco.....	30
Figura 3: Árido fino seco	31
Figura 4: Tamices utilizados en banda IV – 10.....	32
Figura 5: Mezcla de áridos.....	33
Figura 6: Banda granulométrica.....	34
Figura 7: Grafica para determinar constante Kc (MC-V8, 2015)	36
Figura 8: Masa muestral para encontrar porcentaje óptimo de emulsión.	38
Figura 9 Mezcla nº 4 de la tabla 14 para porcentaje de emulsión 4,7%.	39
Figura 10: Mezcla nº 8 de la tabla nº 16 para porcentaje de emulsión 5,7%.	41
Figura 11: Mezcla nº 11 para porcentaje de emulsión 6,7%.	42
Figura 12 Mezcla nº 10 para porcentaje de emulsión 6,7%.	43
Figura 13: Probeta fabricada.	45
Figura 14: Probeta fracturada por baja resistencia.	46
Figura 15 Probeta refrentado con azufre.....	46
Figura 16: Probeta ensayada a tracción.....	47
Figura 17 Grafica de resistencia a compresión vs % de cemento.	48
Figura 18: Ensaye de compresión.	48
Figura 19: Grafico de resistencia a flexotraccion vs % de cemento.	50
Figura 20 Ensaye de flexotracción.	50
Figura 21: Análisis resistencia a compresión.....	53
Figura 22: Análisis resistencia a compresión.....	54

III. Resumen

En la presente investigación se estudia la fabricación de los elementos denominados “adofaltos” los cuales son adoquines compuestos por una mezcla asfáltica en frío, donde se realizó una sustitución del filler por cemento portland puzolánico, estos elementos fueron sometidos a ensayos de resistencia a la compresión, resistencia a la tracción y al desgaste superficial.

El propósito de la investigación fue optimizar un elemento que no cumple requisitos mínimos para ser utilizado en pavimentos peatonales y con bajo flujo vehicular.

Los adofaltos fueron manufacturados de forma artesanal para lograr su forma de paralelepípedo rectangular, además fueron diseñados mediante un apartado del manual de carretera volumen 8. Los resultados encontrados en estos bloques fueron comparados con investigaciones pasadas de bloques asfálticos, donde se logró mejorar las propiedades mecánicas del elemento, a sí logrando que el elemento cumpla con algunos parámetros mínimos para que pueda ser utilizado en una carpeta de rodado.

En la investigación se entrega metodología de trabajo, procedimientos de laboratorio, resultados obtenidos, conclusiones y recomendaciones para futuras investigaciones.

IV. Abstract

The present investigation studies the production of the elements called “adofaltos”, which are cobblestones compounded by a cold asphalt mixture, where a substitution from filler to Portland-Pozzolan cement was made. These elements were subjected to tests of resistance to compression, resistance to traction and superficial wear.

The investigation’s purpose was optimize an element that does not achieve minimum requirements to be used in pedestrian pavements with a low traffic.

“Adofaltos” were manufactured handmade to get their rectangular parallelepiped shape. Besides, they were designed by means of a section of the highway’s manual volume 8. The discovered results in this blocks were compared to past researches of asphalt blocks, where the element’s mechanical properties got improved, in this way getting the element achieves some minimum parameters to be able to be used in a rolled pavement.

The investigation delivers work methodology, laboratory procedures, achieved results, conclusions and recommendations for futures researches.

V. Glosario:

- **MAF:** Mezcla asfáltica en frío.
- **Ceniza FBC:** Ceniza producida mediante un proceso de combustión de lecho fluidizado.
- **HMA:** Mezcla convencional de asfalto en caliente.
- **RTI:** Resistencia a la tracción indirecta.

1 CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 Pregunta de investigación

¿Podemos mejorar las propiedades mecánicas de los adofaltos realizando una sustitución de filler por cemento?

1.2 Introducción

Los pavimentos articulados fueron los primeros tipos de pavimentos utilizados por el hombre, ya hace 25 siglos atrás, siendo estos una capa de rodadura empedrada, para suplir la necesidad de contar con vías más duraderas que permitieran un traslado más rápido y seguro en cualquier época del año. Con el pasar del tiempo se fueron optimizando los recursos para conformar estos caminos dándole formas a las piedras, surgiendo así los primeros adoquines con los cuales se pudo lograr una calzada más limpia y continua.

Los pavimentos articulados de adoquines tienen un campo de aplicación tan amplio como los pavimentos continuos de hormigón o de asfaltos, siendo utilizados para andenes, zonas peatonales, plazas, calles urbanas, pasajes, avenidas con bajo o alto tráfico vehicular, patios de puertos, (Ramírez, 2009). Sin embargo debido al alto tráfico de vehículos pesados, condiciones climáticas, y una gran cantidad de otros factores que afectan a nuestros pavimentos, estos pueden durar mucho menos tiempo que el previsto (diseñado) (Arnao, 2011), además sabemos que la capa de rodadura suele ser la más costosa dentro de una estructura de pavimento, y cabe señalar que una vez instalada la carpeta de rodado continuo ya sea de hormigón o de asfalto, si se requiere hacer una reparación bajo esta, en los estratos, ya sea para reparar alguna red de servicio, o bien, restaurar daños en las capas de base o sub-base se debe romper la estructura de la carpeta de rodadura generando residuos y escombros que no pueden volver a ser utilizados, en cambio sí se requiere realizar trabajos bajo pavimentos articulados de adoquines, estos pueden ser reutilizados posteriormente si se encuentran en buen estado. (Ramírez, 2010)

Con esta premisa se puede considerar que los pavimentos de adoquines son una propuesta atractiva para calles que aún no se encuentren con redes de servicio de modo que en un futuro sea más fácil y menos costoso trabajar sobre ellas, esto es aplicable por ejemplo en países en vías de desarrollo, donde continuamente surge la necesidad de contar con técnicas de pavimentación económicas. Las entidades con mayor necesidad de estas son las estatales debido a que son para resolver problemáticas sociales (Armijo, 2011).

Existen tres tipos de pavimentos de adoquín: los pavimentos de adoquín propiamente tal, pavimentos permeables con adoquines porosos y los pavimentos peatonales de adoquines. (Echeveguren, 2013).

Dentro de los beneficios de la utilización de adoquines podemos encontrar la permeabilidad, sencillez del proceso constructivo, fácil mantenimiento, seguridad, bajos costos económicos, posibilidad de variación estética, calidad, además de los beneficios ambientales tales como ahorro de energía, menos contaminación y permeabilidad en pavimentos peatonales (Sandoval, 2009).

1.3 Planteamiento del problema

En Chile se conoce el estudio llamado “adofaltos” realizado por Víctor Armijos en el año 2011, este señala que en la fabricación de adoquines de MAF realizando un reemplazo de su filler por ceniza FBC, la MAF adquiere mejoras en sus propiedades mecánicas de tracción indirecta, pero a su vez el elemento de adoquín se vuelve frágil en estado endurecido, entregando malas características para el elemento impidiendo que sea utilizado en pavimento articulado a causa de no cumplir con los parámetros mínimos.

Bajo esta información, se propone en esta investigación la utilización del elemento “Adofaltos” como un elemento innovador y viable al momento de reemplazar una carpeta asfáltica, pero para poder mitigar las falencias presentes en este material que no permiten su utilización, surge la idea de unificar investigaciones realizadas en esta área, pero esta vez realizando un reemplazo de la ceniza FBC por cemento portland puzolánico, esperando obtener una mejora en el elemento, de manera que pueda cumplir con las características mínimas para ser utilizado en pavimentos peatonales, ciclo vías y calles con bajo tránsito vehicular.

1.4 Objetivo general.

- Evaluar las propiedades mecánicas del adoquín de mezcla asfáltica en frío (MAF) con granulometría densa, reemplazando su filler por cemento portland puzolánico y realizar un análisis de precio unitario.

1.5 Objetivos específicos.

- Diseñar una dosificación que cumpla con los requerimientos de resistencia mecánica para adoquines de MAF (compresión, tracción y desgaste superficial).
- Determinar las propiedades mecánicas de resistencia a la compresión y flexión, además de la resistencia al desgaste superficial.
- Realizar un análisis de precio unitario para el adoquín propuesto.

1.6 Alcances.

- En esta investigación, los ensayos de resistencia a la compresión, de resistencia a la flexotracción se realizan en los laboratorios de la Universidad de Valparaíso, mientras el ensayo de resistencia al desgaste superficial se realiza en los laboratorios de la Dirección de Vialidad del MOP y solo para el porcentaje óptimo de cemento.
- Las probetas son rectangulares tipo “c” según el “manual de diseño y construcción de pavimentos de adoquines”, paralelepípedos de dimensiones de 20x10x7cm.
- Se realiza una mezcla asfáltica fría, con emulsión asfáltica, granulometría densa y asfalto dotado de la empresa Bitumix, además agregado de cemento portland puzolánico utilizado como filler.
- En esta investigación acotaremos el uso del adofalto para ser empleado en pavimentos peatonales, ciclo vías y calles con bajo tránsito vehicular.

1.7 Metodología de trabajo.

A continuación, se presenta el diagrama que muestra los pasos a seguir en la investigación

1.7.1 Diagrama de flujo

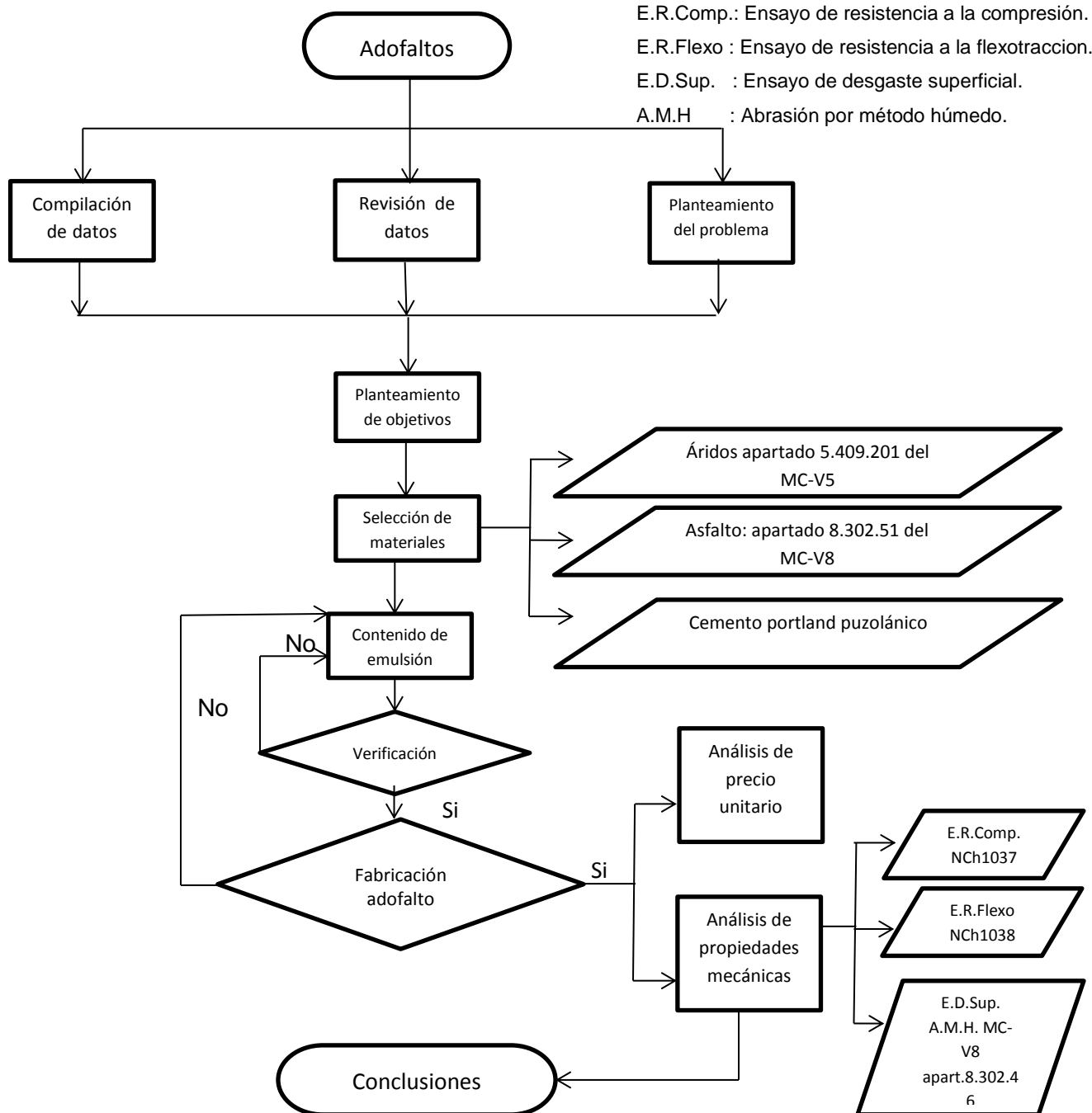


Figura 1: Diagrama de flujo metodología de trabajo.
 Fuente: Elaboración propia, 2017.

2 Capítulo II: MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes teóricos

2.1.1 El adoquín

Su origen se remonta a hace 25 siglos. Los cartagineses y romanos los utilizaban en sus grandes vías para dotarlas de rapidez y duración. Para lograr un transporte más cómodo se vio la necesidad de conseguir una superficie de rodamiento más continua y esto no se podía lograr con el empedrado anterior, que consistía en piedras sin tallar en estado natural.

El adoquinado se utilizó de modo funcional hasta finales del siglo XIX. En tiempos de Napoleón se construyeron grandes avenidas en las ciudades, entre otras cosas para posibilitar que las grandes piezas de artillería circularan por las calles. Más adelante los franceses construyeron las carreteras de pavés.

Los adoquines cuentan con una gran gama de beneficios que los hacen una solución atractiva al momento de diseñar los proyectos, algunos de estos los podemos clasificar de la siguiente forma:

1- Permeabilidad: Los adoquines son elementos que permiten la filtración del agua, dejando que la misma llegue al suelo, a diferencia de los pavimentos tradicionales de asfalto que bloquean el acceso del agua hacia el interior.

2- Durabilidad y vida útil: Este punto viene a colación del ítem anterior, y es que la calidad que se le exige a los adoquines hacen que estos garanticen una durabilidad determinada. Un adoquín bien colocado y bien cuidado puede tener una vida útil que supera los 40 años.

3- Sencillez del proceso constructivo: Una de las grandes ventajas que prevé el pavimento de adoquín es que en su construcción no intervienen procesos químicos ni térmicos. Esto hace que la elaboración del adoquín y su posterior colocación pueda ser ejecutada el mismo día o de un día para otro.

4- Fácil mantenimiento: El mantenimiento y la reparación del adoquín es muy simple y económico. Una falla en la instalación o en el bloque es fácil de arreglar ya que, a diferencia del asfalto, no es necesario destruir y retirar el mismo. Al ser bloques ordenados se pueden retirar y reemplazar por unos nuevos.

5- Seguridad: Los pavimentos de adoquines son especiales para incorporar señales de tránsito. Además, su rugosidad hacen que se disminuya la distancia de frenada de los vehículos. Esto se traduce en mayor seguridad para los peatones como para los conductores.

6- Ventajas en pavimentación: La elaboración de pavimentos adoquinados no requiere de mano de obra especializada, no utiliza derivados del petróleo y su colocación es mucho más rápida que el asfalto que comúnmente conocemos. Además, su colocación no requiere de mucha maquinaria pesada y se puede colocar por tramo haciendo que varias cuadrillas de obreros puedan trabajar a la vez.

7- Costos económicos: El pavimento de adoquín es económico si consideramos su bajo mantenimiento, su mano de obra y herramientas de bajo costo, su vida útil y los elementos con los que se elabora el material.

8- Cualidades físicas: Una de las grandes virtudes de este tipo de pavimento son sus cualidades físicas, las mismas que lo hacen resistir a la acción de heladas, las lluvias ácidas o a las elevadas temperaturas. Además, otra ventaja física se relaciona con su elevada resistencia al desgaste y a las ralladuras producidas por vehículos.

9- Posibilidades expresivas y variaciones estéticas: El pavimento, al estar conformado por varias piezas, hacen que podamos jugar con variaciones estéticas que rompen la monotonía impuesta por el asfalto. Además, los adoquines se pueden fabricar con diferentes colores para incorporar dibujos decorativos sobre el suelo.

10- Calidad y certificación: Los adoquines son elementos prefabricados que llegan listos a una obra, eso permite que la calidad del mismo sea controlada y certificada por la misma fábrica que los elabora.

11- Ahorro de energía: No se requiere calentar ninguno de los ingredientes para elaborar el adoquín (se ahorra energía). En la elaboración del concreto asfáltico los agregados y el asfalto deben calentarse a temperaturas elevadas. Aún después de elaborado, se deben mantener temperaturas más o menos elevadas dependiendo del tiempo de transporte y colocación, e incluso una temperatura mínima a la cual se debe compactar.

12- Contaminación: La mezcla asfáltica siempre contamina al ser colocada, no importando si se trata de mezclas en caliente o en frío e independientemente de una carpeta o de un bacheo rutinario. El adoquín no contamina durante su colocación.

13- Permeabilidad: Permite infiltración de agua. Las ranuras que quedan entre los adoquines impermeables permiten la infiltración de agua hacia las capas inferiores del suelo. La colocación de adoquines utiliza distintos tipos de arena y piedras, por lo que la junta de los mismos no está sellada de manera impermeable, sino que permite el paso de agua.

2.1.2 Tipos de adoquines

2.1.2.1 Adoquines naturales

Hay dos tipos de adoquines de origen natural: piedras recogidas de los campos y piedras lavadas extraídas de un lago. Depositados en el suelo o en un cuerpo de agua en el movimiento y el deshielo de los glaciares, los adoquines naturales son generalmente de piedra arenisca, piedra caliza o gneis. Los adoquines encontrados en campos a menudo son un subproducto de la agricultura y son ásperos y amorfos, pues no tienen ninguna forma en particular. Por otro lado, los adoquines lavados, también conocidos como piedra lavada, son generalmente redondos y lisos debido a la circulación continua del agua.

2.1.2.2 Adoquines fabricados

- **Adoquines de piedra:** son piedras de cantera o fueron formados con propósitos de pavimentación, paisajismo y arquitectura. El tipo de piedra de cantera más común es el granito, debido a sus grietas naturales y su resistencia al desgaste. Los adoquines de granito manufacturados suelen ser uniformes en tamaño y forma y están disponibles en colores grises, negros y distintos tonos de rojo.
- **Adoquines de hormigón:** Los adoquines de concreto son elementos prefabricados macizos, elaborados con una mezcla de arena, piedra, agua y cemento a través de un proceso industrial de vibro-compresión en moldes.
- **Adoquines de arcilla:** Los adoquines de ladrillo son otro tipo de adoquines fabricados, compuestos de arcilla o de pizarra y cocidos en hornos.

2.2 Adofaltos

La información que se conoce con respecto a los adoquines de MAF “Adofaltos” o también llamados bloques de MAF es muy escasa en Chile y el mundo. Dentro de lo que se conoce se puede deducir que no se ha logrado que la pieza obtenga resistencias mecánicas adecuadas para ser utilizado como un elemento para pavimentos articulados. (Núñez, 2008)

En la investigación Adofaltos de Armijo propone una MAF con granulometría densa y reemplazo del filler por ceniza FBC obteniendo como resultado una mejora en las propiedades de resistencia a la tracción indirecta, menor cantidad de emulsión pero poca resistencia mecánica. (Armijo, 2011)

En el estudio adofaltos se reemplazó un 11% de filler por ceniza FBC con un 9% de emulsión y un 4,5% de agua, entregando una resistencia a compresión promedio de 19.2 Kg/cm², la resistencia a la flexotracción fue de 8,7 Kg/cm² y un desgaste superficial de 1147 Gr/M² siendo estos parámetros deficientes para el elemento. (Armijo, 2011).

Tabla 1 Parámetros entregados en investigación adofaltos.

RESULTADOS OBTENIDOS POR ARMIJOS EN INVESTIGACION ADOFALTOS									
PROBETAS	ENSAYOS	PROBETAS			PORCENTAJE DE CENIZA (%)	ASFALTO (%)	AGUA (%)	RESULTADOS	PROMEDIO
		ANCHO	ALTO	LARGO					
P1	COMPRESION	10 Cm	5 Cm	20Cm	11	9	4,5	18,10 (KG/CM2)	
P2	COMPRESION	10 Cm	5 Cm	20Cm	11	9	4,5	20,00 (KG/CM2)	19,2 (KG/CM2)
P3	COMPRESION	10 Cm	5 Cm	20Cm	11	9	4,5	19,60 (KG/CM2)	
P4	FLEXOTRACCION	15 Cm	5 Cm	25Cm	11	9	4,5	8,7 (KG/CM2)	
P5	FLEXOTRACCION	15 Cm	5 Cm	25Cm	11	9	4,5	8,5 (KG/CM2)	8,7 (KG/CM2)
P6	FLEXOTRACCION	15 Cm	5 Cm	25Cm	11	9	4,5	8,7 (KG/CM2)	
P7	DESGASTE	15Cm	5 Cm	25Cm	11	9	4,5	1100(GR/M2)	
P8	DESGASTE	15Cm	5 Cm	25Cm	11	9	4,5	1190(GR/M2)	1147 (GR/M2)
P9	DESGASTE	15Cm	5 Cm	25Cm	11	9	4,5	1150(GR/M2)	

Fuente: investigación adofaltos “ESTUDIO DEL DISEÑO ESTRUCTURAL Y CONSTRUCTIVO DE PAVIMENTOS ARTICULADOS EN BASE A BLOQUES DE ASFALTO”, 2011

Además se conoce el estudio realizado por Kim Jenkins “MIX DESIGN CONSIDERATIONS FOR COLD AND HALF-WARM BITUMINOUS MIXES WITH EMPHASIS ON FOAMED BITUMEN”, en donde en uno de sus capítulos habla sobre la fabricación de bloques de asfalto con MAF, realizando una comparativa entre usar emulsión asfáltica y asfalto espumado, llegando a la conclusión que es mejor utilizar emulsión, esto debido que el asfalto espumado una vez seco tiene mayores deformaciones al verse sometido a sobrecargas. (Jenkins, 2000)

2.3 El asfalto

El asfalto es un material bituminoso de color negro, constituido principalmente por asfáltenos, resinas y aceites, elementos que proporcionan características de consistencia, aglutinación y ductilidad; es sólido o semisólido y tiene propiedades cementantes a temperaturas ambientales normales. Al calentarse se ablanda gradualmente hasta alcanzar una consistencia líquida. Estos pueden ser de dos orígenes; los derivados del petróleo y los naturales. Los asfaltos naturales se han producido a partir del petróleo, pero por un proceso natural de evaporación de las fracciones volátiles, dejando las asfálticas solamente. Estos pueden encontrarse como escurrimientos superficiales en depresiones terrestres, dando origen a los lagos de asfalto, como los de las islas Trinidad y Bermudas. También aparecen impregnando los poros de algunas rocas denominándose rocas asfálticas. Los asfaltos derivados del petróleo se obtienen por medio de un proceso de destilación industrial del crudo. La mayoría de los petróleos crudos contienen algo de asfalto y a veces en su totalidad, sin embargo, existen algunos petróleos crudos que no contienen asfaltos. En base a la proporción de asfalto que poseen los petróleos se clasifican en:

- Petróleos crudos de base asfáltica
- Petróleos crudos de base parafínica
- Petróleos crudos de base mixta (contienen parafina y asfalto)

El asfalto procedente de ciertos crudos ricos en parafina no es apto para fines viales, ya que este precipita a temperaturas bajas, formando una segunda fase discontinua, lo que da como resultado propiedades indeseables, tal como la pérdida de ductilidad y con los crudos asfálticos esto no sucede.

El petróleo crudo extraído de los pozos, es sometido a un proceso de destilación en el cual se separan las fracciones livianas como la nafta y keroseno de la base asfáltica mediante la vaporización, fraccionamiento y condensación de las mismas. En consecuencia, el asfalto es obtenido como un producto residual del proceso anterior.

2.3.1 Emulsión Asfáltica

La Emulsión Asfáltica es un sistema heterogéneo de dos fases inmiscibles, fase continua, que es el agua y fase discontinua, que está compuesta de pequeños glóbulos de cemento asfáltico en suspensión de un tamaño que fluctúa entre 1 y 10 micrones. Se le añade una cantidad de un agente emulsificador de base jabonosa o solución alcalina que mantiene estable el sistema.

Generalmente los contenidos en porcentajes en proporciones aproximadas son; cemento asfáltico entre 50% a 63%, agua entre 35% a 50% y el agente emulsificador entre 0.5% a 2%.

Los agentes emulsificantes forman una película protectora alrededor de los glóbulos de asfalto estableciéndoles una determinada polaridad en la superficie, lo que hace que estos se repelan, manteniéndose estable la emulsión.

Cuando una emulsión se pone en contacto con el agregado se produce un desequilibrio eléctrico que rompe la emulsión llevando a las partículas de asfalto a unirse a la superficie del agregado, y el agua fluye o se evapora separándose de las piedras recubiertas por el asfalto. Hay agentes emulsificadores que permiten que esta rotura o quiebre sea instantáneo y otros más poderosos que retardan este fenómeno.

2.3.2 Clasificación de las emulsiones asfálticas

Existen áridos de polaridad positiva y negativa, por lo tanto, para tener buena adherencia al árido es necesario tener la emulsión eléctricamente afín al árido. Esta cualidad se la confiere el agente emulsificador que puede darles polaridad negativa y positiva. Se clasifican en:

- a) Emulsiones con carga negativas denominadas Aniónicas, afines a áridos con carga negativa, como lo son los de origen calizo.
- b) Emulsiones con carga positiva denominadas Catiónicas, afines a áridos con carga positiva como son los de origen cuarzoso o silíceo.

De acuerdo a esto existen emulsificantes que permiten que la rotura o quiebre sea instantáneo y otros que retrasen el fenómeno, se dividen en:

- Emulsión asfáltica de quiebre rápido, la que se designa con las letras RS (rapid setting)
- Emulsión asfáltica de quiebre medio, la que se designa con las letras MS (medium setting)
- Emulsión asfáltica de quiebre lento, la que se designa con las letras SS (slow setting).

2.3.3 Mezclas Asfálticas

Las mezclas asfálticas están constituidas por material pétreo recubierto por una película de asfalto que posteriormente es compactada, generando una mezcla con propiedades suficientes para resistir a la abrasión generada por el paso del vehículo y el peso del mismo.

2.3.4 Mezclas Asfálticas en frío (MAF)

Es la combinación de agregados pétreos de diferente granulometría con aglutinante asfáltico. Estos pétreos adecuadamente graduados por su tamaño y escogidos por las propiedades que les provee su naturaleza forman lo que llamamos, el esqueleto pétreo y se mantienen íntimamente adheridos y cohesionados por las propiedades que posee el aglutinante.

Si bien el ligante puede ser precalentado hasta no más de 60°C, el resto de las operaciones, se llevan a cabo a temperatura ambiente. Los agregados pétreos no requieren secado ni calentamiento, es decir, que se los emplea tal como se presentan en el acopio, con su humedad natural.

2.3.5 Usos

Las MAF, se utilizan primordialmente para:

- Bacheo
- Carpetas de rodado
- Capas intermedias de refuerzo

2.3.6 Clasificación

De acuerdo con el porcentaje de vacíos final, las mezclas en frío se clasifican en densas, semi-densas y abiertas. Los límites están dados por:

Tabla 2: Clasificación MAF por % Vacíos

Tipo de Mezcla	% Vacíos
Cerradas (densas, DF)	3 a 6
Semi Cerradas (semi densas, SF)	6 a 12
Abiertas (AF)	mayor a 12

Fuente: manual de carretera vol.8, 2015.

2.4 MAF con reemplazo de filler

Estados unidos durante el año 1987 invirtió más de USD 150 millones de dólares en la Strategic Highway Research Program (SHRP) para la investigación de áreas del asfalto, concreto, y comportamiento de los pavimentos en el tiempo.

De estos estudios se determinó que la incorporación de un material llenante (filler mineral) aumenta permite obtener una mayor resistencia a tracción indirecta, menor cantidad en el porcentaje de asfalto y aumento en la fragilidad en mezcla endurecida. (Baoshan et al, 2006).

Cuando se realiza en ciertos porcentajes estos pueden contribuir positivamente recibiendo aumento en las resistencias de densidad, estabilidad y mejoras en las propiedades de ahuellamiento (reyes et al, 2006).

Un estudio realizado en la universidad de la serena donde se buscaba evaluar las propiedades de una MAF con remplazo de llenante mineral por cemento portland donde se determinó que un reemplazo de entre un 1% y un 6% de filler podía mejorar hasta en un 80%, sus resistencias mecánicas de compresión y hasta en un 100% su RTI, igualando o mejorando las propiedades de una HMA. (Álvarez et al, 2014)

2.5 Requisitos de los agregados pétreos

2.5.1 Fracción Gruesa

Corresponde a la fracción retenida en tamiz 2,5 mm (ASTM N°8), la cual deberá estar constituida por partículas chancadas, tenaces, libres de materia orgánica, arcilla o materias extrañas.

La fracción gruesa se deberá ajustarse a los requisitos que se indican en la tabla 3.

Tabla 3: Requisitos para la fracción Gruesa, MAF

ENSAYE	TIPO DE MEZCLA ASFALTICA				METODO
	RODADURA	INTERMEDIA	BASE		
			GRUESA	ABIERTA	
Desgaste Los Angeles (máx)	25% (1)	35%	35%	30%	8.202.11
Desintegración en Sulfato de Sodio (máx.)	12%	12%	12%	12%	8.202.17
Partículas Chancadas (mín.)	90%	70%	60%	90%	8.202.6
Partículas Lajeadas (máx.)	10%	15%	15%	10%	8.202.6
Adherencia Método Estático (mín.)	95%	95%	95%	95%	8.302.29
Adherencia Método Dinámico (mín.) (2)	95%	95%	95%	95%	8.302.31

(1) El Proyecto podrá especificar otro valor de desgaste de Los Angeles, debidamente justificado, el cual no podrá superar 35%.

(2) La adherencia dinámica sólo se exigirá en áreas con precipitación media anual superior a 350 mm. Si no cumplen los áridos con esta exigencia, se podrán utilizar previa incorporación de un aditivo que mejore la adherencia en obra.

Fuente: Manual de Carreteras Vol. 5 (2015). Tabla 5.408.201.A

2.5.2 Fracción Fina

Es aquella que pasa por el tamiz 2,5 mm (ASTM N°8), la cual deberá estar constituida por arenas naturales o provenientes de trituración de rocas o gravas. Sus partículas deben ser duras, tenaces y libres de arcillas o sustancias perjudiciales.

La fracción fina se deberá ajustarse a los requisitos que se indican en la tabla 4.

Tabla 4: Requisitos para la fracción Fina, MAF

ENSAYE	TIPO DE MEZCLA ASFALTICA				METODO
	RODADURA	INTERMEDIA	BASE		
			GRUESA	ABIERTA	
Indice de Plasticidad	NP	NP	NP	NP	8.102.4
Adherencia Riedel – Weber (1)	Mín. 0 – 5	Mín. 0 – 5	Mín. 0 – 5	Mín. 0 – 5	8.302.30
Desintegración Sulfato de Sodio (máx) (2)	15%	15%	15%	15%	8.202.17

(1) Si no cumplen los áridos con esta exigencia, se podrán utilizar previa incorporación de un aditivo que mejore la adherencia en obra.

(2) Sólo se exigirá cumplimiento en obras ubicadas en las Regiones XIª y XIIª y en la alta cordillera o cuando lo indique el Proyecto.

Fuente: Manual de Carreteras Vol. 5 (2015). Tabla 5.408.201.B

2.5.3 Mezcla de Áridos

Las distintas fracciones de áridos deberán combinarse en fracciones tales, que la mezcla resultante cumpla con los requisitos especificados en tabla 5.

Tabla 5: Requisitos para Árido Combinados, MAF

ENSAYE	TIPO DE MEZCLA ASFALTICA				METODO
	RODADURA	INTERMEDIA	BASE		
			GRUESA	ABIERTA	
Sales Solubles (máx.)	2%	3%	3%	3%	8.202.14
Equivalente de Arena (mín.)	50%	45%	40%	50%	8.202.9

Fuente: Manual de Carreteras Vol. 5 (2015). Tabla 5.408.201.D

Las mezclas de áridos deberán ajustarse a las bandas granulométricas según el tipo de mezcla requerido siguientes:

Tabla 6: Granulometría de Áridos: Granulometría Densa

Denominación		IV-10 (1)	IV-12 (2)	IV-20 (2)	IV-25 (2)
Tamices (mm)	ASTM	% QUE PASA EN PESO			
40	1 1/2"	-	-	-	100
25	1"	-	-	100	80 - 100
20	3/4"	-	100	80 - 95	-
12,5	1/2"	100	80 - 95	65 - 80	-
10	3/8"	80 - 100	67 - 85	57 - 75	55 - 75
5	N°4	55 - 75	46 - 65	45 - 63	45 - 62
2,5	N°8	35 - 50	35 - 48	33 - 48	35 - 50
0,63	N°30	18 - 29	15 - 25	17 - 29	19 - 30
0,315	N°50	13 - 23	13 - 23	13 - 23	13 - 23
0,16	N°100	8 - 16	8 - 16	7 - 14	7 - 15
0,08	N°200	4 - 10	4 - 10	4 - 8	0 - 8

(1) La banda IV-10 solo podrá utilizarse para ciclo vías

(2) Estas bandas se utilizarán cuando sobre ellas se coloque una mezcla drenante u otras de similares características

Fuente: Manual de Carreteras Vol. 5 (2015). Tabla 5.409.201.A

3 Capítulo III: METODOLOGÍA

3.1 Metodología Experimental

A continuación se presenta la metodología de trabajo que es utilizada, esta corresponde a la determinación del porcentaje óptimo de emulsión determinando el porcentaje de absorción del árido (Kc) mediante el apartado 8.302.35 del MC-V8 del 2015 (ver anexo 1), una vez encontrado el porcentaje de absorción, mediante una tabla se encuentra el porcentaje de emulsión, posterior a esto se realiza una corrección del porcentaje de emulsión ocupando distintas cantidades de emulsión y agua para mezclas patrones de 500 gr de áridos combinados realizando una inspección visual como lo especifica el manual de carreteras, para rectificar que el porcentaje de emulsión es el correcto, luego se procede al reemplazo del filler por cemento portland puzolánico y se le incorpora la emulsión y el agua para corroborar los parámetros con la mezcla patrón si no se comporta de igual forma se repite el procedimiento pero esta vez con el árido combinado con cemento para encontrar los nuevos porcentajes de agua y emulsión. Una vez habiendo encontrado la dosificación se procede a realizar la fabricación de las probetas con las distintas muestras, para que estas sean sometidas a los ensayos señalados y posteriormente analizados sus resultados.

3.2 Definición de las variables

a) Variable independiente

- Contenido de cemento: Este porcentaje varió entre un 8,0%; 8,5%; 9,0%; 9,5% y un 10%, reemplazando el filler de la granulometría.

b) Variable Dependiente

- Resistencias mecánicas sujetas a compresión, flexotracción y desgaste superficial. Con estos parámetros se pudo evaluar si el reemplazo de filler logra optimizar los adofaltos.

3.3 Factorial de ensayo

Dentro de esta investigación se realizarán 5 muestras, compuestas cada una de 3 probetas. Cada muestra corresponde a un porcentaje de cemento diferente variando en un 0,5%, entre sí, partiendo del 8% y llegando hasta un 10%.

Tabla 7: Diseño factorial para la muestra en base a contenido de cemento.

Muestra	% de cemento	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio
1	8%	X,Y	X,Y	X,Y	X_P, Y_P
2	8,50%	X,Y	X,Y	X,Y	X_P, Y_P
3	9%	X,Y	X,Y	X,Y	X_P, Y_P
4	9,50%	X,Y	X,Y	X,Y	X_P, Y_P
5	10%	X,Y	X,Y	X,Y	X_P, Y_P

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Dónde:

X= ensayo de resistencia a la compresión.

Y= ensayo de resistencia a la tracción.

A cada probeta se le realizará un ensayo de compresión y flexotracción dando un total de 30 probetas a fabricar. Todas las probetas tendrán el mismo porcentaje de emulsión y el mismo porcentaje de agua ya que estos corresponden al óptimo encontrado.

Además el ensayo de desgaste se le realizará a la muestra que mejor se comporte a la compresión.

4 Capítulo V: DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 Selección de materiales

4.2 Agregados pétreos seleccionados

Los agregados pétreos, son áridos de polaridad negativa provenientes del río Aconcagua, suministrados por la empresa Bitumix, para su posterior ensaye.

4.2.1.1 Características del Árido Grueso suministrado:



Figura 2 Árido grueso seco
Fuente: Elaboración propia, 2017.

Tabla 8: Ensayes realizados al Árido Grueso

Ensaye	Obtenido	Requisito	Método
Desgaste Los Ángeles	14%	Máx. 25%	8.202.11
Desintegración en Sulfato de Sodio	1,32%	Máx. 12%	8.202.17
Partículas Chancadas	98%	Min 90%	8.202.6
Partículas Lajeadas	0%	Máx. 10%	8.202.6
Adherencia Método Estático	95%	Min 95%	8.302.29

Fuente: Bitumix, planta Con-Con, V Región. Año 2017.

4.2.1.2 Características del Árido Fino suministrado:



Figura 3: Árido fino seco
Fuente: Elaboración propia, 2017.

Tabla 9: Ensayes realizados al Árido Fino

Ensaye	Obtenido	Requisito	Método
Índice de Plasticidad	NP	NP	8.102.4
Adherencia Riedel – Weber	4 - 10.	Min 0 - 5	8.302.30
Desintegración Sulfato de Sodio	1,32%	15%	8.202.17

Fuente: Bitumix, planta Con-Con, V Región. Año 2017.

4.2.1.3 Características del Árido Combinado

- Las propiedades físicas (densidad real, densidad neta y absorción de agua) se determinaron en laboratorio.

Tabla 10: Ensayes en Laboratorio Universidad de Valparaíso, realizados al Árido

Ensayo	Unidad	Valor
Densidad Aparente	Kg/m ³	1532
Densidad Real Seca	Kg/m ³	2635
Densidad Neta	Kg/m ³	2742
Porcentaje de Absorción	%	1,1

Fuente: Elaboración propia en base a los resultados obtenidos en laboratorio.

4.2.1.4 Banda Granulométrica seleccionada

Se selecciona la banda granulométrica cerrada denominada IV – 10, porque esta tabla dentro de las bandas que hay para granulometrías cerradas es la única que no requiere de una mezcla drenante sobre el elemento. Se trabaja con los porcentajes retenidos en peso para luego determinar cantidades de cada tamaño para la formación de mezclas de prueba.

Tabla 11: Banda granulométrica IV – 10

Denominación		IV-10 (1)
Tamices (mm)	ASTM	% QUE PASA EN PESO
40	1 1/2"	-
25	1"	-
20	3/4"	-
12,5	1/2"	100
10	3/8"	(80 - 100)
5	N°4	(55 - 75)
2,5	N°8	(35 - 50)
0,63	N°30	(18 - 29)
0,315	N°50	(13 - 23)
0,16	N°100	(08-16)
0,08	N°200	(04-10)

Fuente: Manual de Carreteras Vol. 5 (2015). Extracto de Tabla 5.409.201.A



Figura 4: Tamices utilizados en banda IV – 10.

Fuente: Elaboración propia, 2017.

4.2.1.5 Tabla de tanteos de áridos

Para la elaboración del árido combinado se consideraron distintas opciones de mezcla para introducir a la banda.

Tabla 12: Mezcla de áridos en banda.

Tanteos	Arena (%)	Grava (%)	Filler (%)	Cemento (%)
T 1 (REEMPLAZO)	73.3	18.3	0	8,4
T 2 (INCORPORACION)	65.9	16.5	7.6	10
T 3 (INCORPORACION)	55.0	27.4	7.6	10

Fuente: Elaboración propia en base a banda granulométrica.



Figura 5: Mezcla de áridos.

Fuente: Elaboración propia, 2017.

4.2.1.6 Curvas granulométricas

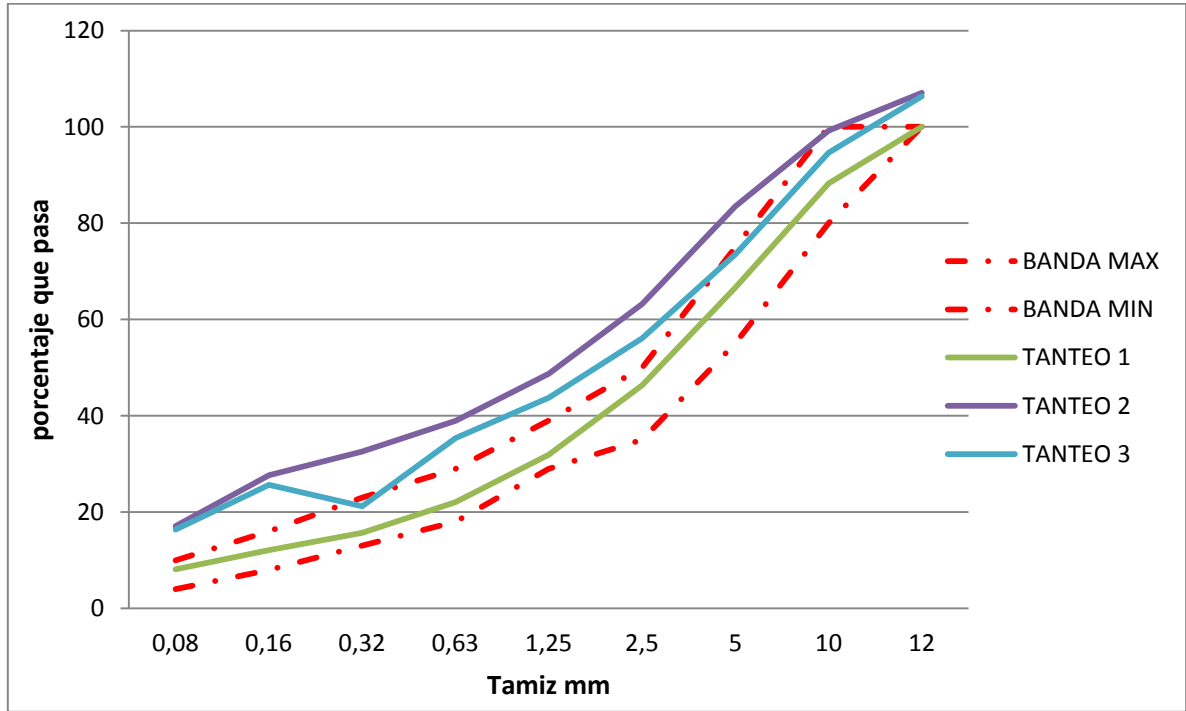


Figura 6: Banda granulométrica
Fuente: Elaboración propia, 2017.

Luego de realizar las iteraciones de los tanteos e introducirlos en la banda granulométrica se llega a la conclusión que la mejor combinación de áridos es el tanteo 1 para realizar la experiencia de laboratorio.

4.2.2 Asfalto

Alcances: Se empleará una Emulsión Catiónica CSS-1h de quiebre lento suministrada por Bitumix.

- **Características de la Emulsión Asfáltica suministrada:**

Tabla 13: Ensayes realizados a la Emulsión CSS-1h

Parámetro	Un	Valor	Especificación
Viscosidad Saybol Furol a 25 °C	sSF	40	20 – 100 sSF
Estabilidad de almacenamiento a 24 hrs.	%	0,2	Máx. 1%
Tamizado Retenido N° 20	%	0	Máx. 0,1%
Mezcla con Cemento	%	1	Máx. 2%
Ensayo de Carga de Partícula		Positiva	Positiva
Destilación			
Aceite Destilado	%	0	Informar
Residuo Asfalto	%	65	min 57%
Ensayo del residuo de la destilación			
Penetración a 25 °C	0,1 mm	55	40 - 90
Ductilidad a 25 °C. 5cm/min	cm	89	min 40 cm
Solubilidad en Tricloroetileno	%	99,9	min 97, 5 %
Ensaye de la Mancha	% Xilol	25 -	Máx. 25%

Fuente: Bitumix, planta Con-Con, V Región. Año 2017.

4.3 Determinación del contenido de asfalto

El contenido de asfalto se calcula mediante el procedimiento del manual de carretera volumen 8, apartado número 8.302.51 donde se determinó que el porcentaje retenido de aceite fue de 1,86% y el cual según la siguiente fórmula se corrigió dando:

$$\% \text{ Aceite Retenido Corregido} = 1,86 \times \frac{2742}{2650} = 1.92\%$$

Lo que según tabla nos entrega un K_c de 0.82

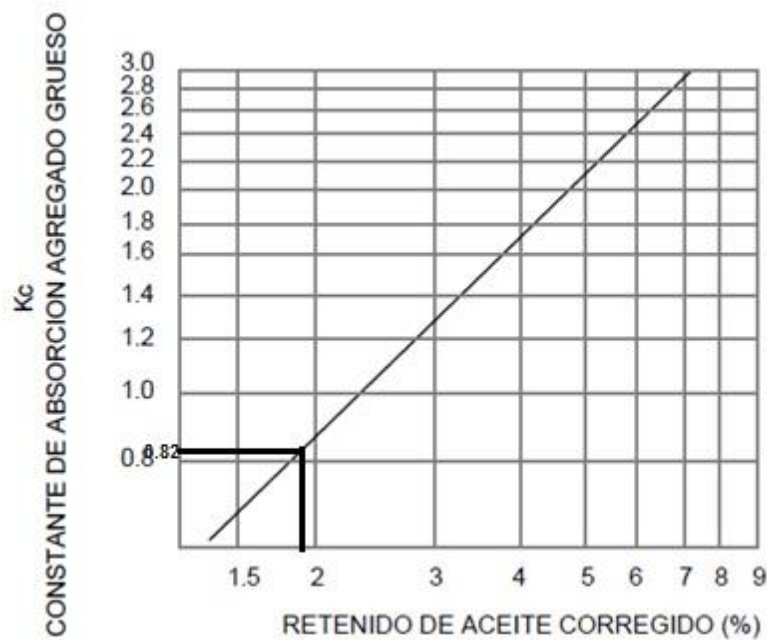


Figura 7: Gráfica para determinar constante K_c (MC-V8, 2015)

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Ya habiendo encontrado el valor de la constante, se procedió a encontrar el valor del porcentaje de emulsión de asfalto, el cual se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$E(\%) = 1,5 * Kc + 3,5$$

Donde reemplazando k_c nos queda:

$$E(\%) = 1,5 * 0.82 + 3,5 = 4.73$$

Una vez que se encontró este porcentaje de asfalto se procedió a la inspección visual mediante el apartado 8.302.48 el cual indica que se separan muestras de 500 gr de áridos combinados en banda, para ser mezclados con la emulsión y el agua, comenzando a inspeccionar visualmente los siguientes parámetros:

- Espesor de cubrimiento
- Porcentaje de partículas cubiertas
- Exceso de asfalto
- Trabajabilidad

Tabla 14: Muestra de 500 gr.

Denominación		IV-10 (1)			
Tamices		% QUE PASA EN PESO BANDA	% QUE PASA	%RETENIDO	GR EN 500
(mm)	ASTM				
40	1 1/2"	-		0	
25	1"	-		0	
20	3/4"	-		0	
12,5	1/2"	100	100	0	
10	3/8"	80 - 100	88	12	60
5	N°4	55 - 75	67	21	105
2,5	N°8	35 - 50	46	21	105
0,63	N°30	18 - 29	22	26	130
0,315	N°50	13 - 23	16	6	30
0,16	N°100	08-16	12	6	30
0,08	N°200	04-10	8	8	40

Fuente: Elaboración propia en base a granulometría ajustada.



Figura 8: Masa muestral para encontrar porcentaje óptimo de emulsión.

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Para la elaboración de las mezclas se debe trabajar con porcentajes de emulsión por debajo y sobre el determinado por el método. En este caso se decide iniciar con el porcentaje de emulsión encontrado anteriormente que es 4,7%.

Para inspeccionar y evaluar visualmente se le debe ir incorporando agua aumentando esta en 0,5 puntos porcentuales.

El contenido de asfalto de diseño se selecciona evaluando los datos registrados a los cuales se le deben verificar las exigencias determinadas en el método que son, porcentaje cubrimiento, espesor de cubrimiento, exceso de asfalto y trabajabilidad

4.4 ELABORACIÓN DE MEZCLAS

Para la primera tanda de mezclas se decide trabajar con los siguientes porcentajes.

Tabla 15: Tanteos de agua y emulsión.

% Emulsión	4,70			
Gr. emulsión	24			
	M1	M2	M3	M4
% Agua	1%	1,5%	2%	2,5%
Gr. agua	5	7,5	10	12,5

Fuente: Elaboración propia

MEZCLA 4



Figura 9 Mezcla nº 4 de la tabla 14 para porcentaje de emulsión 4,7%.

Fuente: Elaboración propia, 2017.

- Inspección:

Inspección Visual M4 – 4,7%, según Método 8.302.48 del MC-V8 del 2015

Tabla 16: Resultados muestra 4.

M4 - 4,7%		
Ensaye	Inspección	Requisito
Espesor de cubrimiento	Delgada	Medio a Grueso
Porcentaje de partículas cubiertas	85	90 - 100%
Exceso de asfalto	no drena	Inferior a 0,15 puntos porcentuales
Trabajabilidad	si	trabajable por más de 15 s

Fuente: Elaboración propia.

NOTA: A pesar que la mezcla es trabajable por más de 15 s y si el exceso de asfalto inferior al 15% esta mezcla es demasiado seca y no sirve su adherencia entre partículas. Se muestra que a mayor cantidad de agua las partículas quedan más cubiertas, pero aun así con un porcentaje de 4,7% de emulsión esta mezcla no es factible, por lo que se procede a aumentar el porcentaje de asfalto a un 5,7%.

Segundo tanteo de muestras:

Tabla 17: Tanteos de agua y emulsión.

% Emulsión	5,70			
Gr. emulsión	29			
	M5	M6	M7	M8
% Agua	1,5%	2%	2,5%	3%
Gr. agua	7,5	10	12,5	15

Fuente: Elaboración propia

MEZCLA 8



Figura 10: Mezcla nº 8 de la tabla nº 16 para porcentaje de emulsión 5,7%.
Fuente: Elaboración propia, 2017.

- Inspección:

Inspección Visual M8 – 5,7%, según Método 8.302.48 del MC-V8 del 2015

Tabla 18: Resultados muestra 8.

M8 - 5,7%		
Ensaye	Inspección	Requisito
Espesor de cubrimiento	Delgada	Medio a Grueso
Porcentaje de partículas cubiertas	100	90 - 100%
Exceso de asfalto	0,05	Inferior a 0,15 puntos porcentuales
Trabajabilidad	si	trabajable por más de 15 s

NOTA: aunque la muestra 8 cumple con 3 de los criterios, aún se nota una mezcla carente de fluidez y poco cohesiva, por ende se descarta y se procede a aumentar a un 6,7% al igual que en la mezcla anterior.

Tercer tanteo de mezclas:

Tabla 19: Tanteos de agua y emulsión.

% Emulsión	6,70		
gramos	34		
	M9	M10	M11
% Agua	1,5%	2%	2,5%
gramos	7,5	10	12,5

Fuente: elaboración propia

MEZCLA 11



Figura 11: Mezcla nº 11 para porcentaje de emulsión 6,7%.

Fuente: Elaboración propia, 2017.

- Inspección:

Inspección Visual M11 – 6,7%, según Método 8.302.48 del MC-V8 del 2015

Tabla 20: Resultados muestra 11.

M11 - 6,7%		
Ensaye	Inspección	Requisito
Espesor de cubrimiento	grueso	Medio a Grueso
Porcentaje de partículas cubiertas	100	90 - 100%
Exceso de asfalto	0,18	Inferior a 0,15 puntos porcentuales
Trabajabilidad	si	trabajable por más de 15 s

NOTA: La mezcla 11 es una mezcla que cumple casi todos los parámetros inspeccionados, sin embargo no cumple el porcentaje de exceso de asfalto por lo que se toma la decisión de trabajar con la mezcla nº 10 la cual cumple con todos los parámetros.

MEZCLA 10



Figura 12 Mezcla nº 10 para porcentaje de emulsión 6,7%.
Fuente: Elaboración propia, 2017.

- Inspección:

Inspección Visual M10 – 6,7%, según Método 8.302.48 del MC-V8 del 2015

Tabla 21: Resultados muestra 10.

M10 - 6,7%		
Ensaye	Inspección	Requisito
Espesor de cubrimiento	grueso	Medio a Grueso
Porcentaje de partículas cubiertas	100	90 - 100%
Exceso de asfalto	0,10	Inferior a 0,15 puntos porcentuales
Trabajabilidad	si	trabajable por más de 15 s

4.5 ELABORACIÓN DE PROBETAS

Una vez encontrado el porcentaje óptimo de emulsión y agua se procede a fabricar las 5 muestras con 6 probetas cada una con un total de 30 probetas.

Las probetas fabricadas fueron ejecutadas en moldes de madera terciada para darles las dimensiones que se requerían para esta investigación.

Para estas probetas se utilizó 3000 gr. de áridos combinados en banda secos, de los cuales se le extrajo el 8% que estaba constituido por filler, siendo reemplazado por cemento portland puzolánico.

Primero se le agrego 2% de agua mezclándose hasta quedar homogénea, una vez ocurrido esto se procedió a agregar el contenido de emulsión el cual fue de 6,7% mezclándose durante 30 minutos. Luego la compactación de la mezcla en el molde fue mediante impacto donde se utilizó un combo de 8 kg. de masa, compactando en 3 capas y 100 impactos cada capa.



Figura 13: Probeta fabricada.
Fuente: Elaboración propia, 2017.

NOTA: Al realizar el cambio de filler manteniendo los demás elementos constantes, se pudo apreciar que la mezcla carecía de lubricidad, esto se debe a que las partículas de cemento tienen una mayor superficie específica y por ende la mezcla quedo poco cohesiva. Al momento de desmoldar la muestra, el porcentaje de emulsión no fue suficiente para lubricar las partículas, debido al aumento de superficie especifica esta no poseía resistencia por lo cual estos contenidos de emulsión y agua para la mezcla con reemplazo de filler quedan descartados.



Figura 14: Probeta fracturada por baja resistencia.
Fuente: Elaboración propia, 2017.

Debido a lo anterior es que se procedió a realizar un nuevo tanteo el cual dio como resultado una muestra número 12 con un 7,7% de emulsión y un 3% de agua, lográndose una mezcla homogénea y trabajable para la investigación.

Ya realizadas las probetas y transcurridas 24 hrs de su fabricación, son puestas a secar durante 72 hrs en horno a 40 °C. Una vez retiradas del horno se dejaron enfriar y se les realizó un refrentado con azufre a la cara porosa que se apoyara en la prensa



Figura 15 Probeta refrentado con azufre.
Fuente: Elaboración propia, 2017.

5 CAPITULO VI: ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 RESULTADOS OBTENIDOS

- Los siguientes resultados son los obtenidos de ensayar las muestras a compresión.



Figura 16: Probeta ensayada a tracción.

Fuente: Elaboración propia, 2017.

DETERMINACION RESISTENCIA A LA COMPRESION										
MUESTRAS	PROBETAS	CEMENTO (%)	DIMENSION (cm)			PESO gr	VOLUMEN cm3	CARGA kgf	RESIST. kg/cm2	RESIST. PROME.
			ANCHO	LARGO	ALTO					
M1	P1	8	10	20	7	3080	1400	8180	40,93	
	P2	8	10	20	7	3095	1400	8366	41,83	41,53
	P3	8	10	20	7	3053	1400	7958	39,65	
M2	P4	8,5	10	20	7	3102	1400	9076	45,38	
	P5	8,5	10	20	7	3120	1400	9664	48,32	47,34
	P6	8,5	10	20	7	3118	1400	9204	46,02	
M3	P7	9	10	20	7	3121	1400	10070	50,35	
	P8	9	10	20	7	3110	1400	10240	51,2	50,92
	P9	9	10	20	7	3200	1400	10316	51,58	
M4	P10	9,5	10	20	7	3210	1400	8064	40,32	
	P11	9,5	10	20	7	3215	1400	8304	41,52	41,27
	P12	9,5	10	20	7	3218	1400	8396	41,98	
M5	P13	10	10	20	7	3224	1400	6478	32,39	
	P14	10	10	20	7	3245	1400	7662	38,31	36,19
	P15	10	10	20	7	3238	1400	7572	37,86	

Tabla 22: Resultados ensayos resistencia a compresión.

Fuente: Elaboración propia en base a resultados obtenidos ensayos a compresión.

En la siguiente grafica se puede mostrar de mejor forma los resultados obtenidos.

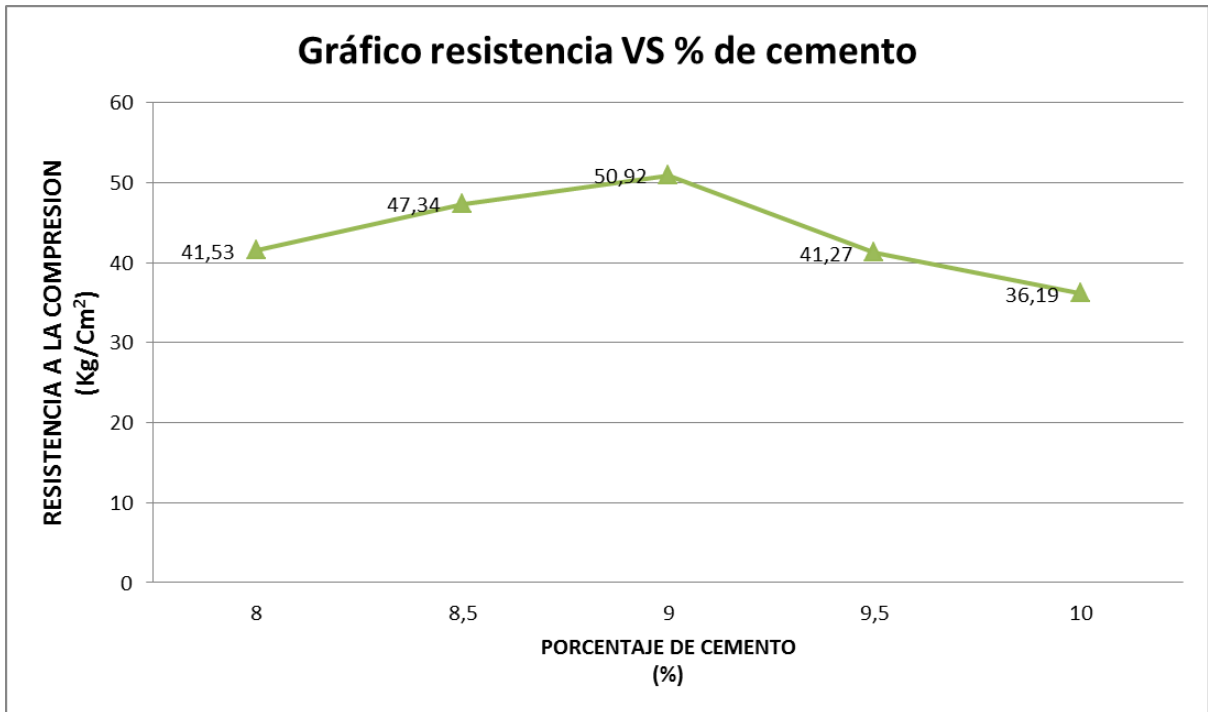


Figura 17 Grafica de resistencia a compresión vs % de cemento.

Fuente: Elaboración propia, 2017.



Figura 18: Ensayo de compresión.

Fuente: Elaboración propia, 2017.

- Los siguientes resultados son los obtenidos de ensayar las muestras a flexotraccion.

Tabla 23: Resultados ensayos resistencia a flexotraccion.

DETERMINACION RESISTENCIA A LA FLEXOTRACCION										
MUESTRAS	PROBETAS	CEMENTO (%)	DIMENSION (cm)			PESO gr	VOLUMEN cm ³	CARGA kgf	RESIST. kg/cm ²	RESIST. PROME.
			ANCHO	LARGO	ALTO					
M1	P1	8	10	20	7	3080	1400	637,83	19,52	
	P2	8	10	20	7	3095	1400	657,32	20,12	19,84
	P3	8	10	20	7	3053	1400	649,8	19,89	
M2	P4	8,5	10	20	7	3102	1400	791,27	24,22	
	P5	8,5	10	20	7	3120	1400	817,73	25,03	23,87
	P6	8,5	10	20	7	3118	1400	730,5	22,36	
M3	P7	9	10	20	7	3076	1400	665,16	20,31	
	P8	9	10	20	7	3111	1400	701,75	21,48	20,88
	P9	9	10	20	7	3218	1400	680,84	20,84	
M4	P10	9,5	10	20	7	3224	1400	600,29	18,38	
	P11	9,5	10	20	7	3228	1400	604,86	18,52	18,63
	P12	9,5	10	20	7	3230	1400	620,54	19	
M5	P13	10	10	20	7	3245	1400	553,59	16,95	
	P14	10	10	20	7	3243	1400	565,02	17,3	17,05
	P15	10	10	20	7	3250	1400	551,9	16,9	

Fuente: Elaboración propia en base a los resultados obtenidos en ensayos a flexotracción.

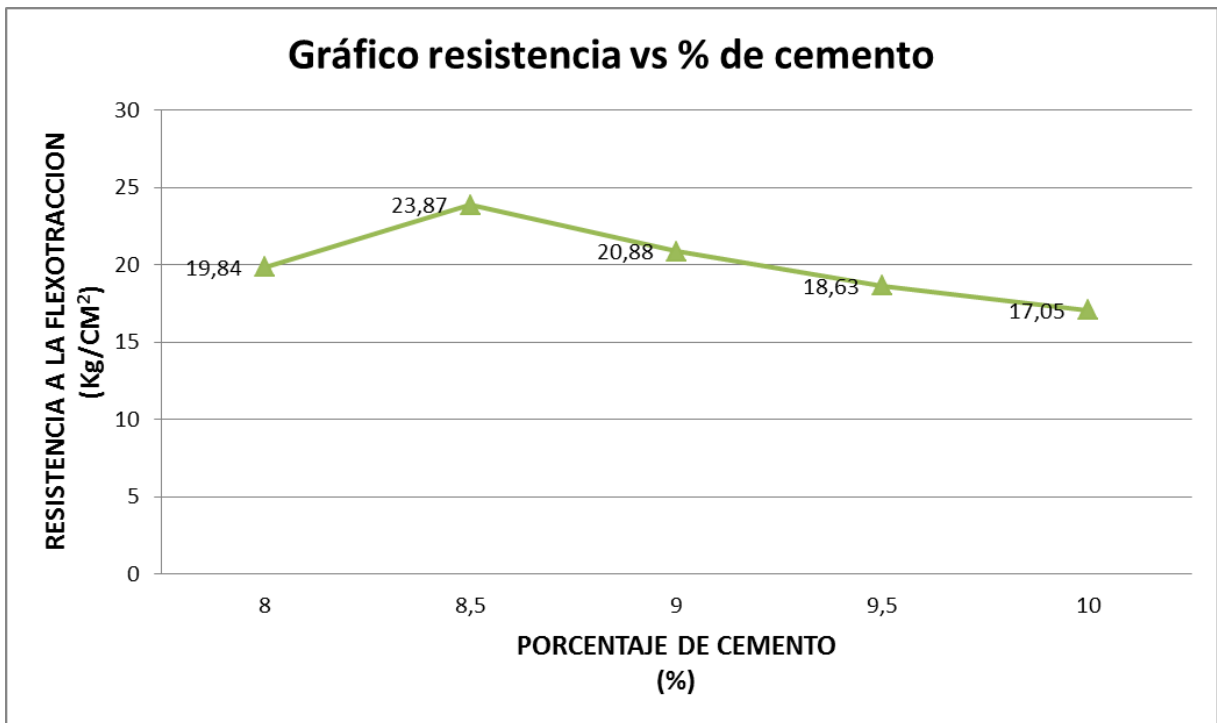


Figura 19: Grafico de resistencia a flexotraccion vs % de cemento.
Fuente: Elaboración propia, 2017.



Figura 20 Ensayo de flexotracción.
Fuente: Elaboración propia, 2017.

- En la tabla 24 podemos observar los resultados obtenidos en el ensayo de desgaste superficial el cual fue una adaptación del método de abrasión en medio húmedo para lechadas asfálticas, descrito en el apartado 8.302.46 del manual de carretera volumen 8, aplicado a las tres probetas de la muestra 1 con un contenido de 9% de cemento, 7,7% de emulsión y 3% de agua.

Tabla 24 Resultados ensayo de desgaste superficial.

DETERMINACIÓN DESGASTE SUPERFICIAL										
MUESTRA	PROBETA	CEMENTO (%)	DIMENSION (cm)		PESO gr	VOLUMEN cm ³	AREA DE CARGA m ²	PESO PERDIDO gr	DESGASTE gr/m ²	PROMEDIO gr/m ²
			DIAMETRO	ALTO						
M1	P1	9	27	2	2665	1144,5	0,01960668	6,038857363	308	319
	P2	9	27	2	2678	1144,5	0,016741547	5,390778215	322	
	P3	9	27	2	2658	1144,5	0,021382465	6,97068359	326	

Fuente: Elaboración propia en base a los resultados obtenidos en ensayos realizados en el Laboratorio de la Dirección de Vialidad del MOP, 2017.

5.2 Análisis de precio unitario

En el siguiente cuadro se muestra un análisis de costo de producción por unidad de adofaltos para su producción.

Tabla 25: Análisis de precio unitario.

ESPECIFICACION MATERIAL	UNIDAD	CANT.	VALOR IVA INC	P. U. (\$)	TOTAL (\$)
arena	m3	0,001124	\$ 14.000	11.765	13
gravilla	m3	0,000219	\$ 14.000	11.765	3
cemento	kg	0,3	\$ 143	120	36
emulsion	kg	0,204	\$ 1.434	1.205	246
molde	m2	0,0042	\$ 4.809	4.041	17
tornillos	un	1,2	\$ 49	41	49
A) TOTAL MATERIALES				TOTAL \$	364
MANO DE OBRA	B.I.	Valor H.D.	Cant	Tiempo (dias)	TOTAL (\$)
Maestro	\$ 421.875	\$ 21.094	0,03	1	\$ 703
B) TOTAL MANO DE OBRA				TOTAL \$	703
MAQUINAS Y HERRAMIENTAS	UNIDAD	CANT.	VALOR IVA INC	P. U. (\$)	TOTAL (\$)
sierra circular		0,00005	\$ 17.990	\$ 15.118	\$ 1
pizon o martillo combo		0,00005	\$ 7.000	\$ 5.882	\$ 0
				\$ 0	\$ 0
				\$ 0	\$ 0
C) MAQUINAS Y HERRAMIENTAS				TOTAL \$	1
	UNIDAD	CANT.			TOTAL (\$)
TOTAL COSTO DIRECTO NETO	\$	-			\$ 1.068
GASTOS GENERALES	%	15			\$ 160
IVA	%	19			\$ 203
costo de produccion					\$ 1.431

Fuente: elaboración propia en base a valores actuales en el mercado.

**Nota: el valor de la mano de obra, está considerado como costo empresa, es decir, incluye leyes sociales, implementos de seguridad, seguros, etc.

6 CAPITULO IV: CONCLUSIONES

A continuación, se presentan las conclusiones de la investigación acerca de la incorporación de cemento portland puzolánico como filler en las mezclas asfálticas en frío con granulometría cerradas para adoquines,

En esta investigación se determinó que el método de fabricación de los adofaltos es uno de los parámetros con mayor incidencia en los resultados obtenido por ende si se mejoran las condiciones de fabricación del elemento, este podría mejorar sus propiedades.

Se cumple con el objetivo principal el cual es evaluar las propiedades mecánicas de resistencia a la compresión, flexotracción y desgaste superficial en el adoquín con granulometría densa y reemplazo de filler por cemento.

Dentro del diseño de dosificación se determina que para un porcentaje de 7,7% de emulsión y un 3% de contenido de agua los mejores resultados obtenidos fueron con un remplazo de 9% de cemento como filler para mi árido.

Para analizar los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia se toman como referencia datos entregados por la investigación adofaltos.

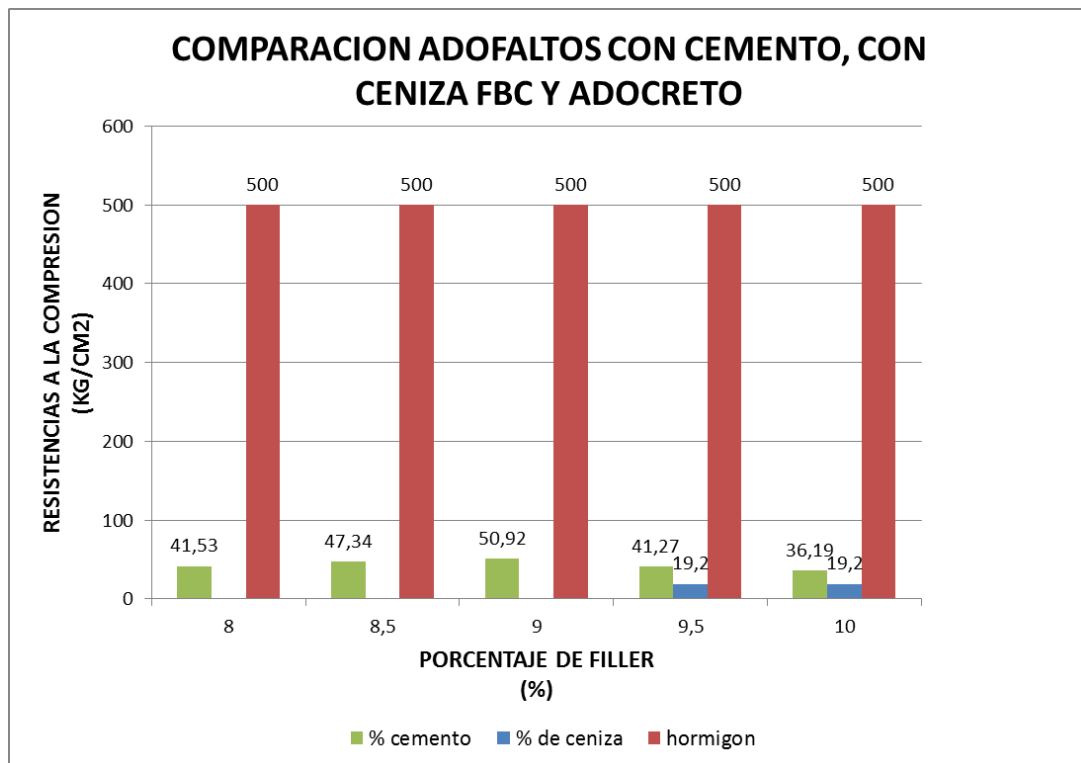


Figura 21: Análisis resistencia a compresión.
Fuente: Elaboración propia, 2017.

La incorporación de cemento en la mezcla asfáltica en frío actúa positivamente dentro de los resultados cuando esta se realiza hasta el 9%, una vez superado este porcentaje actúa negativamente, aunque dentro de esta grafica podemos apreciar que mejoran las resistencias que se obtuvieron en la investigación “adofaltos”.

Para la resistencia a flexotracción ocurre un fenómeno muy parecido pero este comienza su declive en las resistencias obtenidas una vez que se supera el porcentaje de 8,5% de incorporación de cemento a la mezcla, esto se puede visualizar de mejor manera en la siguiente gráfica.

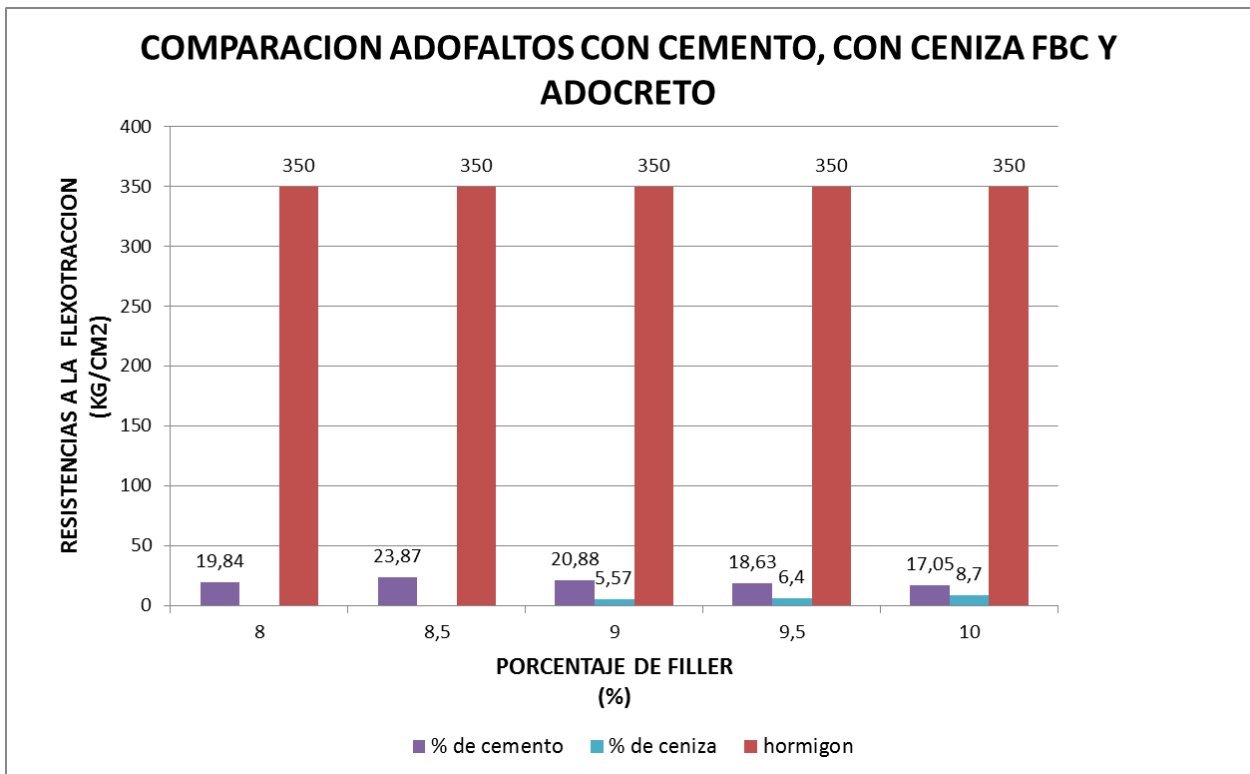


Figura 22: Análisis resistencia a compresión.
Fuente: Elaboración propia, 2017.

Por lo tanto se determina que si bien existe una mejora incorporando el cemento a la mezcla esta aún no consigue las resistencia necesarias para ser utilizada como adoquín, en vías con tránsito vehicular, esto debido que para ser utilizado en calles con tránsito vehicular el manual de diseño de adoquines solicita una resistencia a la compresión de 500 kg/cm² y una resistencia a la flexotracción de 350 kg/cm², sin embargo este puede utilizarse en calles peatonales y de forma ornamental.

Con respecto al ensayo de desgaste superficial de abrasión por vía húmeda del manual de carretera volumen 8 este acepta una tolerancia máxima de 550 gr/m². Cabe destacar que en esta investigación se le realizó el ensayo a la muestra número 3 en donde poseía un reemplazo de filler del 9%, un 7,7% de emulsión y un 3% de agua donde se consiguió que el elemento obtuviera un desgaste 319 gr/m² mejorando los parámetros obtenidos en la investigación adofaltos de Armijos donde su desgaste era de 1147 gr/m².

Con estos podemos concluir que el elemento también puede ser utilizado en ciclo-vías con capacidad de soportar hasta una motocicleta sobre él.

7 Recomendaciones y futuras investigaciones

Para conseguir los resultados esperados se debe ser cuidadoso en el proceso de fabricación y compactación del elemento.

Se recomienda para futuras investigaciones optimizar el método de fabricación del elemento, para así lograr reducir aún más el contenido de vacíos dentro del adoquín.

También es recomendable trabajar con una dosificación con mayor contenido de ligante para reducir el desgaste superficial y además evaluar el comportamiento de las resistencias mecánicas a mayor cantidad de tiempo esto debido que el cemento alcanza su resistencia máxima a los 28 días.

Para una futura investigación se recomienda analizar la mezcla para una carpeta de rodado y/o baches.

Además evaluar el trabajar con mezclas de asfaltos en caliente e incorporación de cemento.

8 Bibliografía

1. Centro de documentación ministerio de obras públicas (2015), programa de caminos básicos 5000.
2. Banco mundial de datos (IRF) (2010), federación internacional de carreteras.
3. HENRIQUEZ, C., AZÓCAR, G. y AGUAYO, M. (2006b). Cambio de uso del suelo y escorrentía superficial: Revista de Geografía Norte Grande, N° 36. pp. 61-74.
4. ROMERO, H. y LÓPEZ, C. (2007). Variaciones de la funcionalidad ambiental del mosaico de paisaje vegetal del Gran Santiago entre 1975 y 2007. Presentación al Coloquio
5. INDIRLI M. Y SOTERO M. (2010). revista ingeniería en construcción: proyecto "Mar vasto"
6. JUAN PATILLO, (1988). Revista de ing. En construcción n°4: consideraciones generales sobre diseño de pavimentos asfálticos.
7. RAYMOND ROLLINGS, (2008). Extracto de publicación: "pavimentos de bloques intertrabados de hormigón".
8. UNESCO (2003). WWW.REDCHILENA.CL: CIUDADES PATRIMONIO DE A HUMANIDAD.
9. JUAN ARNAO (2011), libros de pavimentos: diseños de pavimentos rígidos por el método de la asociación del cemento portland pca.
10. de los pavimentos. Boletín Técnico LNV N°3, Laboratorio Nacional de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas.
11. ANDRES JAMET (2008).
12. MIGUEL M. (2011), revista EMB. Pavimentos en Chile: apuntando a una mayor mantención y uso de nuevas tecnologías.
13. Construcción de pavimentos de adoquines de hormigón.
14. Tomas Echeveguren Navarro (2013). Manual de diseño de pavimentos de adoquines de hormigón.
15. Kim Jenkins (2000). MIX DESIGN CONSIDERATIONS FOR COLD AND HALF-WARM BITUMINOUS MIXES WITH EMPHASIS ON FOAMED BITUMEN

16. Álvaro Núñez (2008). ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRÍO CON EMULSIONES Y CENIZAS FBC PARA LA FABRICACIÓN DE ADOQUINES

17. Víctor Armijos (2011). ESTUDIO DEL DISEÑO ESTRUCTURAL Y CONSTRUCTIVO DE PAVIMENTOS ARTICULADOS EN BASE A BLOQUES DE ASFALTO

ANEXOS

ANEXO A: Procedimientos de laboratorio

En este capítulo se muestran los ensayos que se realizarán para la mezcla asfáltica fría con granulometría densa.

MÉTODO DE DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRÍO CON EMULSIÓN (APARTADO 8.302.51 DEL MC-V8 DEL 2015)

Alcances:

Este apartado describe el método de diseño para mezclas asfálticas frías con emulsión, con agregados densamente graduados con un tamaño máximo menor o igual a 25mm

Preparación del agregado:

1. Se somete el agregado pétreo a ensayos de calidad definidos por requisitos de la tabla 5.408.201.A del MC-V5 del 2015.
2. Separe el agregado en cada una de las siguientes fracciones: 25 - 20; 20 - 12,5; 12,5 – 5; y bajo 5 mm, de modo de reconstituir posteriormente la granulometría del material en mezclas de prueba.

Determinación del contenido inicial de emulsión

El contenido de emulsión se determina de acuerdo a la expresión siguiente:

- **Para Mezclas con Emulsión Asfáltica:**

$$E(\%) = 1,5 * Kc + 3,5 \quad (\text{Ec. 4.1})$$

Dónde:

E (%): Porcentaje de emulsión tentativo referido al agregado grueso

Kc: constante de absorción del agregado grueso

MEZCLAS DE PRUEBA CON EMULSIÓN ASFÁLTICA.

- Reconstituya la granulometría del agregado pétreo escogida, en muestras representativas de 500 gr. Se constituyen entre 15 a 20 muestras en envases sellados para prevenir pérdidas de humedad.
- Determinar la humedad de las muestras, secándolas hasta pesa constante a una temperatura de 110 ± 5 °C.
- Coloque una muestra de 500 gr de agregado pétreo en un bol previamente tarado y añada agua en cada porción aumentando en 0,5 puntos porcentuales referido al peso del agregado, hasta que aprecie un exceso de líquido drenado.
- Agregue la cantidad de emulsión previamente determinada, confeccionando muestras con contenido de emulsión por debajo y sobre el determinado.
- Mezcle manualmente en el bol usando una espátula cuadrada (25 mm de ancho).
- Coloque la muestra en un embudo confeccionado con malla 0,063, el que se coloca sobre un recipiente previamente tarado. Deje que la mezcla drene por 30 min.

Si drene coloque el recipiente que contiene el exceso de líquido en un horno a 110 ± 5 °C, y seque hasta pesa constante. Determine el peso final y calcule el exceso de emulsión de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\text{Exceso de Asfalto \%} = \frac{\text{Peso Final} - \text{Tara}}{\text{Peso Agregado}}$$

- Saque la muestra del embudo y colóquela en un horno ventilado hasta pesa constante a una temperatura de 110 ± 5 °C.
- Evalué la mezcla, después de secada superficialmente de acuerdo a lo siguiente:
 - a) Espesor de cubrimiento: es una inspección visual y debe registrarse como delgada, media o gruesa.
 - b) Porcentaje de partículas cubiertas: también es una inspección visual y se debe registrar un valor estimado.
 - c) Cualquier otra observación que sea de interés.

Cálculos:

El contenido de asfalto efectivo, es el contenido de asfalto residual de la emulsión, menos el porcentaje de asfalto drenado.

Evaluación

El contenido de asfalto de diseño se selecciona evaluando los datos registrados; se deben verificar las siguientes exigencias:

- a) Cubrimiento : 90 a 100 %
- b) Espesor del cubrimiento: medio a grueso.
- c) Exceso de asfalto : inferior que 0,15 puntos porcentuales.
- d) Trabajabilidad : la mezcla con emulsión debe mantenerse trabajable durante 15s.

MÉTODO PARA DETERMINAR EL CONTENIDO DE LIGANTE MEDIANTE EL EQUIVALENTE CENTRIFUGO DE KEROSENE (ECK), (APARTADO 8.302.35 DEL MC-V8, 2015).

Alcances

Para determinar el equivalente centrífugo de kerosene es necesario determinar el factor Kc, el cual necesitamos para determinar el porcentaje tentativo de la mezcla con emulsión.

Kc se determina del porcentaje de aceite SAE N°10 retenido, que representa el efecto total de las propiedades absorbentes y rugosidad superficial del agregado.

Herramientas y Materiales:

- 1) Aceite SAE N°10
- 2) Embudos de metal, con su diámetro mayor, superior a 100 mm, una altura de 110 mm y su diámetro menor de 12 mm con un trozo de tamiz 2 mm (N°10) soldado en la parte inferior.

Procedimiento de ensayo para agregado grueso:

- 1- Cuartee 105 gr representativos del material que pasa en tamiz 10 mm y retenido en tamiz 5 mm.
- 2- Seque la muestra hasta pesa constante en un horno o placa caliente a 110 ± 5 °C
- 3- Deje enfriar.
- 4- Pese 100 gr y colóquelos en el embudo
- 5- Sumerja la muestra en Aceite SAE N°10 durante 5 minutos.
- 6- Drene por 2 minutos.
- 7- Coloque el embudo con la muestra en un horno a 60 °C, y drene por 15 min.
- 8- Vierta la muestra del embudo a una bandeja tarada, enfríe y pese aproximando 0,1 gr. Reste el peso original y registre la diferencia como porcentaje de aceite retenido (basado en 100 gr de agregado seco)

Determinación de Kc:

El factor Kc se determina según lamina 8.302.35.A, y se procede como sigue:

- 1) Luego de determinar el porcentaje de Aceite Retenido se debe verificar que:
 - La densidad neta del agregado grueso es mayor que 2700 kg/m^3 o menor que 2650 kg/m^3 , en caso contrario corrija el porcentaje de aceite retenido mediante la fórmula:

$$\% \text{ Aceite Retenido Corregido} = \% \text{ Aceite retenido} \times \frac{\rho N g}{2650}$$

- 2) Entre en la lámina 8.302.35.A con el valor del porcentaje de aceite retenido corregido, siga verticalmente hasta interceptar la línea diagonal y siga horizontalmente hasta interceptar el valor K_c . (el valor obtenido es la constante superficial para la fracción retenida en 5mm)

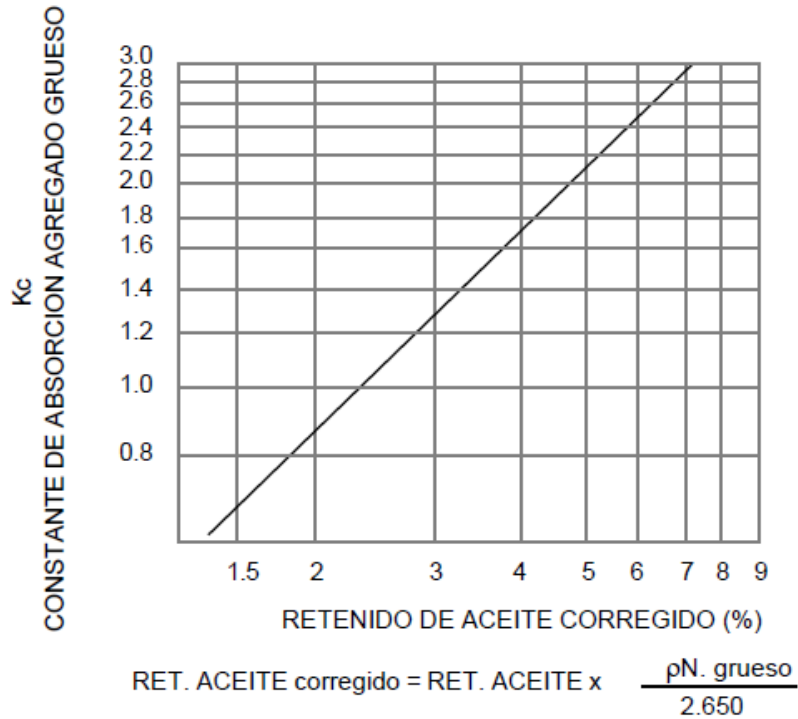


Figura A Gráfica para determinar constante K_c (MC-V8, 2015)

