

**UNIVERSIDAD DEL BIOBÍO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

**Profesor Guía: Marcos Pardo Rojas.**

**“DISEÑO DE MICROAGLOMERADO  
DISCONTINUO EN CALIENTE MODIFICADO CON  
POLÍMERO RECICLADO”**

**Proyecto de Título presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título  
de Ingeniero Civil**

**LUIS ALBERTO MUÑOZ VÁSQUEZ**

**Concepción, marzo del 2013.**

*Dedicado a mi Madre y Abuelo.*

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi esposa, por el apoyo incondicional, paciencia y cariño brindado en esta etapa tan importante, por su infinito amor, por ser la luz de mi vida, mi fuente de energía y mi alegría.

A mi madre, por ser mi ejemplo de lucha y superación, por ser mi pilar fundamental al momento de tomar las decisiones más importantes en mi vida, por ser incondicional, por ser una madre dedicada, que siempre tuvo una palabra de llena de amor y ternura en los momentos difíciles.

A mi hermano, simplemente por estar siempre junto a mí disfrutando de la vida, llenándola de alegría.

A mi abuela Charo, por confiar siempre en mí, por alentarme a ser cada día mejor, por el inmenso cariño y amor que me ha dado siempre.

A mis abuelos, por su sabiduría, perseverancia y amor, por ser un ejemplo de amor y vida, por acompañar en silencio cada paso que di en la vida.

A mi profesor guía, por su dedicación y vocación de maestro, por estar siempre para atender mis dudas y consultas.

A mis compañeros, por los hermosos momentos vividos, la alegría y la amistad que se formo acompañada de libros y cuadernos, por que de seguro los llevare siempre junto a mis más preciados recuerdo, porque cumplimos la meta, por somos Ingenieros Civiles de la Universidad del Biobío.

## TABLA DE CONTENIDOS

	Página
<b>DEDICATORIA</b> .....	ii
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	iii
<b>TABLA DE CONTENIDOS</b> .....	iv
<b>RESUMEN</b> .....	1
<b>ABSTRACT</b> .....	2
1. INTRODUCCIÓN.....	3
1.1. Objetivos.....	5
1.1.1. Objetivo general.....	5
1.1.2. Objetivos específicos.....	5
1.2. Metodología.....	6
2. MARCO TEÓRICO.....	7
2.1. Microaglomerados Discontinuos en Caliente.....	7
2.1.1. Definición Actual.....	8
2.1.2. Clasificación.....	9
2.1.3. Características.....	9
2.2. Cemento asfáltico.....	10
2.2.1. Definición.....	10
2.2.2. Clasificación.....	10
2.3. Polímeros.....	11
2.3.1. Definición.....	11
2.3.2. Propiedades.....	11
2.3.3. Clasificación.....	12
3. DISEÑO EXPERIMENTAL.....	14

3.1.	Selección de Variables .....	14
3.2.	Diseño Factorial.....	15
3.3.	Tamaño Muestral .....	16
4.	RECOLECCIÓN DE DATOS .....	19
4.1.	Caracterización de los Materiales .....	19
4.2.	Metodología de Trabajo en Laboratorio .....	20
4.2.1.	Equipos y Materiales .....	20
4.2.2.	Procedimiento.....	21
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	23
5.1.	Análisis Mezcla Patrón .....	23
5.1.1.	Análisis de Perdida por Desgaste .....	24
5.1.2.	Análisis de Huecos de Aire en la Mezcla (VA) .....	25
5.2.	Análisis Mezcla Modificada.....	26
5.2.1.	Análisis de Perdida por Desgaste .....	26
5.2.2.	Análisis de Huecos de Aire en la Mezcla .....	28
6.	CONCLUSIONES .....	30
7.	RECOMENDACIONES .....	32
8.	REFERENCIAS .....	33
9.	ANEXOS.....	35

## **DISEÑO DE MICROAGLOMERADO DISCONTINUO EN CALIENTE MODIFICADO CON POLÍMERO RECICLADO**

Luis Alberto Muñoz Vásquez

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío Bío

lmunozva@alumnos.ubiobio.cl

Marcos Pardo Rojas

Ministerio de Obras Públicas, Región del Bío Bío

marcos.pardo@mop.gov.cl

### **RESUMEN**

Los Microaglomerados Discontinuos en Caliente son mezclas asfálticas basadas en la utilización de áridos de granulometría discontinua y cementos asfálticos modificados con elastómeros, permitiéndole potenciar sus características mecánicas.

En la actualidad, la producción de residuos plásticos se presenta como un importante problema ambiental. Esto genera la necesidad de encontrar nuevos métodos y técnicas que permitan reutilizarlos.

En esta investigación se propuso sustituir el cemento asfáltico con elastómeros, por un cemento asfáltico tradicional que incorpora polímero reciclado, de tal forma evaluar sus características mecánicas en base al Método de Pérdida por Desgaste, el cual caracteriza una mezcla a partir de la pérdida por desgaste y los huecos de aire en mezcla. Los resultados muestran que al incorporar polímero reciclado, los huecos de aire en la mezcla aumentan hasta un punto porcentual por sobre la curva de diseño normal, y la pérdida por desgaste presenta su mínimo valor para el 5% de polímero reciclado incorporado.

Esto indica que resulta imprescindible atender a la solicitud de fomentar estudios que permitan generar nuevas y mejores formas de tratar los residuos plásticos.

**Palabras Clave:** Microaglomerados, Residuos plásticos, Diseño Cántabro.

6421 Palabras Texto+5 Figuras/Tablas\*250+0 Figuras/Tablas\*500 = 7671 Palabras Totales

## **DISCONTINUOUS MICROAGLOMERADO DESIGN HOT MODIFIED POLYMER RECYCLING**

Luis Alberto Muñoz Vásquez

Department of Civil and Environmental Engineering, Universidad del Bío Bío

lmunozva@alumnos.ubiobio.cl

Marcos Pardo Rojas

Ministerio de Obras Públicas, Región del Bío Bío

marcos.pardo@mop.gov.cl

### **ABSTRACT**

The Microasphalt Hot Discontinued are based on the use of open graded aggregates and asphalt cement with elastomers, allowing enhance its mechanical properties. Currently, the waste plastics production presented as a serious environmental problem. This creates the need for new methods and techniques for reuse.

In this investigation was to replace the asphalt cement with elastomers, for traditional asphalt cement incorporating recycled polymer in such a way to evaluate their mechanical properties based on the Attrition Loss Method, which characterizes a mixture from the wear loss and air voids in a mixture. The results show that incorporation of recycled polymer, air voids in the mix increased to one percentage point above the curve of the normal pattern, and loss by attrition presents its minimum value to 5% of recycled polymer incorporated. This indicates that it is essential to comply with the request to promote studies to generate new and better ways to treat plastic waste.

**Keywords:** Microasphalt Hot Discontinued, Waste plastics, Design Cantabrian.

## 1. INTRODUCCIÓN

La tecnología de los Microaglomerados Discontinuos en Caliente ha sido objeto de numerosos estudios con el fin de mejorar su comportamiento mecánico, apuntando a mejorar dos aspectos fundamentales en su diseño, la pérdida por desgaste y los huecos de aire en la mezcla. La primera, con la finalidad de mejorar la resistencia a la abrasión, y la segunda, para generar una mezcla abierta que permita obtener una mayor rugosidad, por lo tanto mayor adherencia, puesto que este tipo de mezclas son comúnmente utilizadas para proporcionar o restituir propiedades superficiales a los pavimentos, como: drenabilidad superficial y resistencia al deslizamiento.

La problemática principal de esta investigación, se sustentó en dos pilares fundamentales, estos son:

- a) La innovación
- b) El medio ambiente

La innovación debe ser el motor de la ingeniería, la búsqueda constante de mejoras en métodos, procesos productivos y productos, esto siempre coherente con el compromiso medio ambiental, logrando un equilibrio entre ambos conceptos.

De acuerdo a lo anterior, se planteó la necesidad de utilizar materiales reciclados, para ello, se encontró un campo de aplicación que está constantemente en proceso de mejora e innovación, como lo es la tecnología de los asfaltos, en específico, aplicado al diseño de mezclas asfálticas discontinuas monogranulares. Estas mezclas utilizan cementos asfálticos modificados con polímeros, del tipo elastómero-termoplástico, es decir que tiene propiedades de extensibilidad y poseen un estado líquido a elevadas temperaturas. Este tipo de polímero está presente en distintos productos plásticos, como por ejemplo botellas. De aquí se desprende la idea de utilizar cementos asfálticos tradicionales y modificarlos con polímeros reciclados, de esta forma, se reutiliza un material altamente contaminante, por su

abundancia y su baja biodegradabilidad, así se innova en un producto que cada vez es más utilizado en la construcción de caminos, debido a su buen comportamiento.

Por lo tanto, en este trabajo se evaluó el comportamiento mecánico de una mezcla discontinua monogranular en caliente modificada con polímero reciclado bajo los requisitos establecidos en el Método de Pérdida por Desgaste Cántabro.

## **1.1. Objetivos**

En consecuencia con lo expuesto en el ítem anterior, se presentan los siguientes objetivos:

### *1.1.1. Objetivo general*

- Evaluar el comportamiento mecánico de un Microaglomerado Discontinuo en Caliente Modificado con Polímero Reciclado.

### *1.1.2. Objetivos específicos*

- Formular el marco teórico.
- Diseñar un experimento para evaluar el comportamiento mecánico de las muestras en estudio.
- Evaluar los requisitos de diseño para la mezcla modificada con polímero reciclado y cemento asfáltico tradicional según diseño experimental.
- Realizar un análisis comparativo entre la Mezcla Discontinua Patrón y la Mezcla Discontinua Modificada con Polímero Reciclado.

## 1.2. Metodología

La investigación comenzó con una recopilación de información correspondiente a las propiedades y características de los materiales usados, y de los procedimientos correspondientes al trabajo en laboratorio, esto con el objetivo de dar a conocer la importancia e incidencia de cada factor en el estudio.

Luego, gran parte del desarrollo de la investigación se realizó en laboratorio, donde se confeccionan y ensayan las probetas correspondientes a la mezcla patrón, la cual es una mezcla del tipo discontinua monogranular (M10), y las probetas en las cuales se incorpora polímero reciclado. A partir de esto, se recopiló la información necesaria para generar una base de datos y su posterior procesamiento, así establecer una comparación entre ambos diseño.

**Tabla 1. Metodología de Trabajo**

<b>ETAPA</b>	<b>SUB ETAPA</b>		<b>HITO</b>
ESTUDIO DE ANTECEDENTES	Mezclas modificadas con polímeros	Métodos para agregados pétreos y asfalto	ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEORICO
DISEÑO EXPERIMENTAL	Estudio y selección de variables	Tamaño muestral	MATRIZ FACTORIAL DEFINITIVA
ELABORACIÓN Y ENSAYE DE PROBETAS	Caracterización de áridos	Elaboración y ensaye probetas patrón y modificadas con polímero	BASE DE DATOS
ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS	Análisis y comparación de VA	Análisis y comparación Perdida por Desgaste	ANALISIS COMPARATIVO DE REQUISITOS DE DISEÑO
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	Conclusiones	Recomendaciones	INFORME FINAL

## **2. MARCO TEÓRICO**

En este capítulo se incluye la información relevante, adecuada y esencial que permite la apreciación global y actualizada sobre la tecnología de los Microaglomerados Discontinuos. En el Anexo B se adjunto información complementaria.

### **2.1. Microaglomerados Discontinuos en Caliente**

La técnica de los Microaglomerados comenzó a utilizarse en los años 40, principalmente en trabajos de conservación de vías urbanas. Consistían en mezclas muy finas, compuestas por Filler y utilizaban como ligante betunes blandos o incluso alquitranes. Con estas mezclas se pretendía conseguir de manera prioritaria una buena manejabilidad y flexibilidad, estando su resistencia mecánica fundamentada en la cohesión aportada por el mástico Filler-Ligante. Estas mezclas en caliente poseían una serie de características muy interesantes, entre las que destacaban las siguientes:

- Elevada capacidad de auto reparación, buen comportamiento a la fatiga y elevada flexibilidad.
- Textura microrrugosa áspera que la hacía muy apropiada para vías de baja velocidad.
- Muy bajo nivel sonoro.

Sin embargo, una serie de importantes inconvenientes se presentaban como principales objetos de mejora, entre estos destacan:

- Baja estabilidad mecánica, con riesgo de fluencia plástica.
- Baja resistencia al deslizamiento, especialmente frente a velocidades altas.

- Mala resistencia al punzonamiento.

Debido a lo anterior, estas mezclas eran casi exclusivamente utilizadas en trabajos de pavimentación de vías urbanas o en la conservación de carreteras secundarias.

A lo largo de estos últimos años, la técnica de los Microaglomerados ha mejorado de manera notable los aspectos comentados anteriormente, especialmente en cuanto a la deficiente rugosidad ante tráficos rápidos y las bajas características mecánicas, modificando su esqueleto mineral mediante la eliminación total o parcial de alguna fracción del árido, y con la sustitución de los cementos asfálticos tradicionales por cementos asfálticos modificados con polímeros y/o fibras.

De tal forma, las actuales mezclas presentan una elevada macrorrugosidad debido a su alto contenido en árido grueso y discontinuidad granulométrica, además de una alta resistencia a la deformación plástica, la cual le confiere el Cemento Asfáltico Modificado.

### *2.1.1. Definición Actual*

Los Microaglomerados se basan en la utilización de cementos asfálticos modificados con elastómeros y áridos de granulometría discontinua. Se utilizan principalmente en la rehabilitación de pavimentos, como carpeta de rodado de pequeños espesores con aporte estructural, presentando mejores características de drenabilidad, durabilidad y seguridad.

Estas mezclas asfálticas discontinuas poseen árido de tamaño máximo de 12,0 mm y se ponen en obra en capas de espesor igual o menor a 3,5 cm. Debido a su aporte estructural y buen rozamiento interno, proporcionan o restituyen características superficiales a los pavimentos.

Su diseño se basa en el método Marshall y/o Cántabro según sea el tipo.

### 2.1.2. Clasificación

Las Mezclas Discontinua se normalizaron en España en 2 tipos:

- Mezclas Tipo F (capas finas)
- Mezclas Tipo M (Monogranulares)

Los máximos tamaños de áridos utilizados en estas mezclas son 8,0 y 10,0 mm respectivamente, caracterizándose por tener un contenido de árido grueso que va del orden del 70 a 80%, y como máximo un 10% de árido fino.

### 2.1.3. Características

Las principales características que destacan a las mezclas discontinuas en caliente con respecto a las mezclas asfálticas tradicionales son:

- Dada su macro-rugosidad, ofrece al usuario un camino con buena drenabilidad superficial y excelente comportamiento frente al deslizamiento.
- Baja sonoridad y mejor regularidad de la textura.
- Buena resistencia al envejecimiento, lo que se traduce en pavimentos de mayor duración, y debido al tipo y elevado contenido de ligante, adquiere un excelente comportamiento a la deformación y fisuración.

## **2.2. Cemento asfáltico**

### *2.2.1. Definición*

Mención aparte se debe hacer a los cementos asfálticos, puesto que será una de las variables que se modificara, y por tanto conocer sus propiedades es de suma importancia.

Los cementos asfálticos, provienen de fuentes naturales o del refinamiento del petróleo, se presentan en estado sólido a temperatura ambiente y se clasifican por su consistencia de acuerdo al grado de penetración o viscosidad. Cualquiera sea su composición, tienen por objetivo brindar propiedades de impermeabilidad, flexibilidad y durabilidad, aun en presencia de agentes externos, como el clima y el tráfico.

### *2.2.2. Clasificación*

Los cementos asfálticos se pueden clasificar en:

- Cementos asfálticos tradicionales: provienen de la fracción pesada de la destilación del petróleo crudo. Se caracteriza por ser un ligante flexible, impermeable y duradero. Comúnmente se utiliza del tipo CA-24 para zonas cálidas y CA-14 para zonas con bajas temperaturas.
- Cementos asfálticos modificados: son a los cuales se les han incorporado polímeros, con el fin de obtener un producto con mejores propiedades, como aumentar la elasticidad y disminuir la susceptibilidad térmica. Se destacan los tipos 60-80 y 80-100.
- Cementos asfálticos multigrado: es un asfalto modificado sin polímero, cuya principal característica es amplio rango de temperaturas de servicio, debido a la mejora en su relación viscosidad-temperatura, conservando sus propiedades.

## **2.3. Polímeros**

### *2.3.1. Definición*

Los polímeros son estructuras complejas o macromoléculas cuya formación se basa en la unión de pequeñas moléculas llamadas monómeras. Los monómeros son una especie de eslabón que va formando grandes cadenas que puede estar compuesto por miles de millones de moléculas, estas cadenas forma a redes de variados tipos y estructuras, como ramificados, lineales, tridimensionales, etc.

La polimerización es la reacción por la cual se sintetiza un polímero a partir de los monómeros. El tamaño de cada cadena depende de la temperatura y tiempo de reacción, generándose cadenas de distinto tamaño y por ende distinto peso molecular.

### *2.3.2. Propiedades*

Dentro de las principales propiedades de los polímeros, se destacan las siguientes:

- **Eléctricas:** se utilizan principalmente en la fabricación de aislantes para cascaras de equipos y cables eléctricos, sustituyendo con ventajas a las porcelanas y vidrio. Sus propiedades eléctricas están determinadas principalmente por su naturaleza química en cuanto a enlaces de mayor o menor polaridad.
- **Físicas:** el ordenamiento de las moléculas es principalmente cristalino, con regiones que evidencian defectos del cristal de carácter amorfo. Su comportamiento tiene estricta relación con la temperatura, a medida que esta disminuye, los polímeros se vuelven más duros producto de la pérdida de movimiento entre las cadenas de formación.

- **Mecánicas:** dentro de sus características destacan: resistencia, elongación, modulo y dureza. Estas características son fuertemente influenciadas por el peso molecular y el grado de polimerización, y en menor medida por la estructura cristalina, es decir, a mayor peso molecular y grado de polimerización, mayor será la resistencia de los polímeros.

### 2.3.3. Clasificación

Según su origen:

- **Polímeros naturales:** son los formados por los seres vivos, como las proteínas, los ácidos nucleicos, polisacáridos, etc.
- **Polímero semisintéticos:** son resultado de la modificación de un monómero natural, como la nitrocelulosa y el caucho vulcanizado.
- **Polímeros sintéticos:** se obtienen por síntesis y están formados a base de un monómero natural.

Según su aplicación:

- **Elastómeros:** poseen una alta extensibilidad y bajo modulo de elasticidad, debido a esto son capaces de absorber grandes cantidades de energía al ser sometidos a esfuerzos, lo que les permite una alta deformación, pudiendo volver a su estado inicial al eliminar el esfuerzo.
- **Plásticos:** son polímeros que al estar sometidos a un esfuerzo suficientemente intenso, sufren deformaciones irreversibles.

- Fibras: de alto modulo de elasticidad y baja extensibilidad, permiten la confección de tejidos de dimensiones estables.
- Recubrimientos: se adhieren a otros materiales, normalmente de forma líquida, para otorgarle o potenciar alguna propiedad.
- Adhesivos: permite unir 2 o más cuerpos con una sustancia de alta adhesión y cohesión.

Según su comportamiento al elevar su temperatura:

- Termoplásticos: pasan a estado líquido al calentarlos y vuelven al estado sólido al enfriarlos. Su estructura molecular presenta pocos entrecruzamientos.
- Termoestables: al aumentar su temperatura comienzan a descomponerse químicamente, esto a causa de los muchos entrecruzamientos que no permiten desplazamientos relativos entre las moléculas.
- Elastómeros: de comportamiento elástico y de fácil deformabilidad sin ser necesario modificar su estructura o quebrar enlaces.

### **3. DISEÑO EXPERIMENTAL**

Con el fin de identificar y cuantificar las causas dentro de un estudio, es preciso utilizar la técnica estadística del Diseño Experimental, de tal forma establecer qué y cuántas variables se manipularan, y medir el efecto que estas tienen en las variables de interés. Además de determinar cuántas repeticiones hay que realizar del experimento, con el fin de establecer un grado de confianza.

En el caso particular de esta investigación, las variables manipuladas fueron el porcentaje de polímero reciclado incorporado a la mezcla y el porcentaje de asfalto, el cual es la principal variable que se manipuló en el diseño de mezclas asfálticas. Este conjunto de circunstancias son llamados tratamientos y comprenden las respuestas a la hipótesis de la investigación y son el centro de la misma. Junto con esto, se define como unidad experimental a cada probeta que es expuesta al tratamiento y que es independiente de otras unidades, y que constituye una sola replica del tratamiento.

#### **3.1. Selección de Variables**

Las variables son características que pueden tomar diferentes valores o estados, y las cuales se busca describir e interrelacionar, para así establecer su influencia o dependencia en las unidades experimentales. De acuerdo con los intereses de esta investigación, se distinguen los siguientes tipos de variables:

- Variable Dependiente: es cualquier aspecto medido para evaluar los efectos de la variable independiente manipulada.
- Variable Independiente: es cualquier variable manipulada para determinar su efecto en la variable dependiente.

A continuación, en la Tabla 2, se presentan las variables dependientes e independientes involucradas en la investigación.

**Tabla 2. Variables dependientes e independientes**

Variable	Tipo	Descripción
Porcentaje de Cemento Asfáltico	Independiente	Corresponde a la cantidad de Cemento Asfáltico presente en la mezcla
Porcentaje de Polímero Reciclado	Independiente	Corresponde a la cantidad de Polímero Reciclado incorporado en la mezcla
Porcentaje de Huecos de Aire en la Mezcla	Dependiente	Corresponde al aire presente entre las partículas cubiertas del agregado en una mezcla
Porcentaje de Pérdida por Desgaste	Dependiente	Corresponde a la pérdida de masa de la mezcla

### 3.2. Diseño Factorial

El diseño factorial consiste en realizar todas las combinaciones posibles de los niveles de tratamiento de los distintos factores. Con frecuencia, los experimentos con diseños factoriales se conocen como experimentos factoriales.

En este estudio se utilizó el diseño factorial  $2^k$  debido a que existen 2 tipos de tratamientos de interés, estos son:

- Factor A: contenido de Cemento Asfáltico (%).
- Factor B: contenido de Polímero Reciclado (%).

Existen 4 niveles de tratamiento para el factor A y 5 niveles para el factor B, en total 20 niveles de tratamiento. La matriz factorial se muestra en la Tabla 3.

**Tabla 3. Matriz Factorial**

		% de Polímero Reciclado				
		3%	4%	5%	6%	7%
% de Cemento Asfáltico	4,5%					
	5,0%					
	5,5%					
	6,0%					

### 3.3. Tamaño Muestral

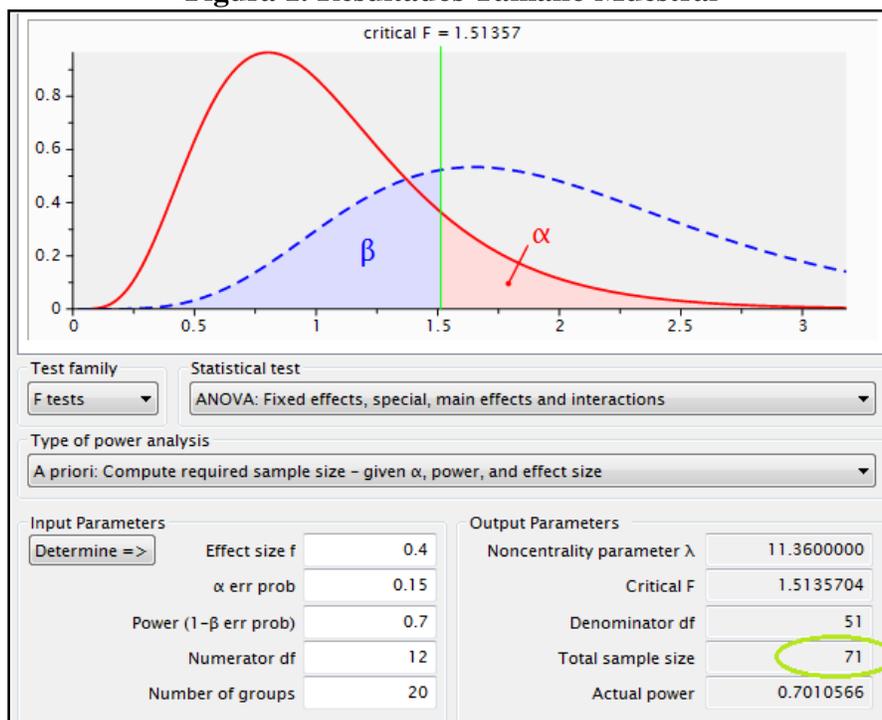
Por medio del software G\*power se estimó el tamaño de la muestra, para esto se consideró los siguientes parámetros estadísticos en el estudio, expuestos en la Tabla 4.

**Tabla 4. Parámetros Estadísticos**

Error Tipo I	0.15
Efecto Tamaño de Muestra	0.40
Poder	0.70

El software entregó el tamaño de la muestra para la matriz factorial antes expuesta, junto con los parámetros necesarios para realizar el contraste de hipótesis. A continuación en la Figura 1, se muestran los resultados obtenidos en la simulación.

**Figura 1. Resultados Tamaño Muestral**



A continuación, en la Tabla 5, se presenta la estimación de la cantidad de muestras para ejecutar el experimento con una potencia estadística del 70%, un efecto tamaño de muestra grande, que corresponde a 0.4 y un error tipo I de 0.15.

**Tabla 5. Tamaño Muestral Para ANOVA**

Factor	Grados de Libertad	Numero de Grupos	N muestral
A	3	20	
B	4	20	
AxB	12	20	72

Conforme a los datos obtenidos, se elaboró la matriz factorial definitiva para un tamaño muestral de 72 unidades experimentales. En la Tabla 6, se presentan la cantidad de replicas por nivel de tratamiento.

**Tabla 6. Matriz Factorial Definitiva**

	% de Polímero Reciclado				
	3%	4%	5%	5%	6%
4.5%	4	4	4	4	4
5.0%	4	4	4	4	4
5.5%	4	4	4	4	4
6.0%	4	4	4	4	4

En total, se estudiaron 80 unidades, comprendidas en 4 repeticiones por grupo.

#### 4. RECOLECCIÓN DE DATOS

Como método de diseño para las Mezclas Discontinuas en Caliente del Tipo Monogranular, se propuso el conocido Método Cántabro de pérdida por desgaste, esto debido a que este tipo de mezclas debe resistir la acción abrasiva y disgregadora del tráfico y del agua, debiéndose comprobar la cohesión y adhesividad de la mezcla mediante este ensayo. Por lo tanto, los criterios de dosificación de estas mezclas se establecen a partir del contenido de huecos en la mezclas y de la valoración de la resistencia a la abrasión.

##### 4.1. Caracterización de los Materiales

Los materiales utilizados en la confección de las muestras en estudio se presentan en la Tabla 7.

**Tabla 7. Materiales utilizados en las mezclas.**

	Cemento Asfáltico	Polímero	Áridos	Observación
Mezcla Patrón	60/80	no aplica	Gravilla 1/2	Aplicación por vía seca
			Polvo de Roca	
			Filler	
Mezcla Modificada	CA-24	Polipropileno Reciclado	Gravilla 1/2	Aplicación por vía húmeda
			Polvo de Roca	
			Filler	

Como fue antes expuesto, los áridos que participaran en ambos diseños son idénticos, solo siendo modificado el tipo de cemento asfáltico, el cual en el caso de la mezcla patrón corresponde a un cemento asfáltico modificado con elastómeros, y para el caso de la mezcla modificada corresponde a un cemento asfáltico tradicional, utilizado principalmente para mezclas asfálticas, modificado con polímero reciclado del tipo polipropileno.

En la Tabla 8 se presentan las bandas granulométricas utilizadas para cada árido.

**Tabla 8. Caracterización de áridos.**

Tamiz		Áridos			Mezcla	Banda de diseño	
		M1: Gravilla 1/2	M2: Polvo de roca	M3: Filler			
1/2"	12.5	100%	100%	100%	100	100	
3/8"	10	73%	100%	100%	77	75	97
5/16"	8	34%	100%	100%	44	-	-
n°4	5	1%	96%	100%	15	15	28
n°8	2.5	0%	69%	100%	12	12	25
n°30	630	0%	33%	100%	9	9	18
n°200	80	0%	12%	90%	6	5	8
% chancado		100%	100%	100%			
% laja		0%	0%	0%			
% mezcla		84.00	10.00	6.00			

## 4.2. Metodología de Trabajo en Laboratorio

A continuación se describe el procedimiento para determinar el valor de la pérdida por desgaste utilizando la máquina de Los Ángeles, y el contenido de huecos en la mezcla a partir del peso y volumen determinado de forma geométrica. Junto con esto, se presenta una breve descripción de los equipos y materiales utilizados.

### 4.2.1. Equipos y Materiales

A continuación se describen los principales equipos y materiales utilizados en el trabajo de laboratorio.

- Equipo de compactación: Consta de molde, collar, placa base y martillo de compactación.

- Maquina de Los Ángeles: consiste en un tambor cilíndrico de acero que gira en posición horizontal. Este cilindro está provisto de una abertura para introducir la muestra que se desea ensayar y un entrepaño para conseguir el volteo del material.
- Termómetros: Para medir las temperaturas de los áridos, ligante y mezcla bituminosa, con escala hasta 200 °C.
- Balanzas: Una balanza de 2 kg de capacidad y sensibilidad 0.1 g para pesar probetas, y otra de 5 kg de capacidad y sensibilidad de 1 g para preparación de las mezclas.
- Materiales generales: Bandejas, pailas, espátulas, guantes termoaislantes, papel filtro.

#### 4.2.2. Procedimiento

El procedimiento de laboratorio se divide en dos etapas, la preparación de probetas y la realización de ensayos. La primera etapa lo conforman los siguientes ítems.

- Preparación de áridos: Las distintas fracciones de áridos que componen la mezcla se secan en estufa u horno hasta masa constante a una temperatura de 105 a 110 °C.
- Preparación de mezclas: Se pesan sucesivamente en una paila las cantidades de cada fracción de los áridos necesarias para la fabricación de una probeta, de tal modo que la cantidad total de áridos sea de unos 1100 g. Luego se colocan en el horno a junto al cemento asfáltico, de tal forma alcanzar la temperatura de mezcla. Al alcanzar la temperatura de mezcla, los áridos se ponen en un recipiente metálico sobre la balanza, de esta forma se determina el peso de cemento asfáltico y polímero reciclado que es preciso incorporar. Se procede a colocar el recipiente sobre la

estufa y se comienza a revolver con la espátula de punta redonda hasta que se observa una mezcla homogénea y completamente cubierta de cemento asfáltico, para luego colocar la mezcla dentro del molde, el cual fue previamente calentado en el horno, lubricado con desmoldante y puesto el filtro inferior. Finalmente, utilizando la espátula se apisona la mezcla en el centro del molde y en su perímetro, para terminar colocando el filtro superior.

- Compactación de la mezcla: Se coloca el molde dentro del aparato de compactación tipo Marshall, se sujeta con el collar y se monta el martillo. La energía de compactación será de 50 golpes por cara.

Para la segunda etapa, que consta de los ensayos de huecos de aire en la mezcla y desgaste, se describe lo siguiente.

- Densidad y Análisis de Huecos: Una vez desmoldadas las probetas, luego de 24 horas, se determina su densidad y contenido de huecos de aire a partir de la medida geométrica de su volumen y densidad máxima de la mezcla sin compactar.
- Perdida por Desgaste: Se determina la masa de cada probeta con aproximación de 0.1 g y se anota este valor como p1. Se procede a introducir la probeta a la máquina de Los Ángeles, y sin la carga abrasiva de las bolas de acero, se hace girar el tambor a 30 rpm durante 300 vueltas. Al final del ensayo se saca la probeta y se pesa de nuevo con la misma precisión y se anota este valor como p2. El valor se obtiene mediante la diferencia porcentual entre la masa inicial y final.

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

De acuerdo a lo establecido en el ítem de diseño y etapa experimental, se elaboraron 80 probetas de Mezcla Monogranular Modificada con Polímero Reciclado, estas fueron sometidas a los análisis de huecos en mezcla y pérdida por desgaste, aplicando rigurosamente cada procedimiento, de tal forma generar las condiciones ideales de estudio y obtener resultados coherentes.

### 5.1. Análisis Mezcla Patrón

Como primer elemento de estudio se elaboraron especímenes de Microaglomerados Discontinuos en Caliente al cual se le asigno el descriptor de Mezcla Patrón, puesto que será la muestra representativa del diseño estándar de Microaglomerado Discontinuo en Caliente.

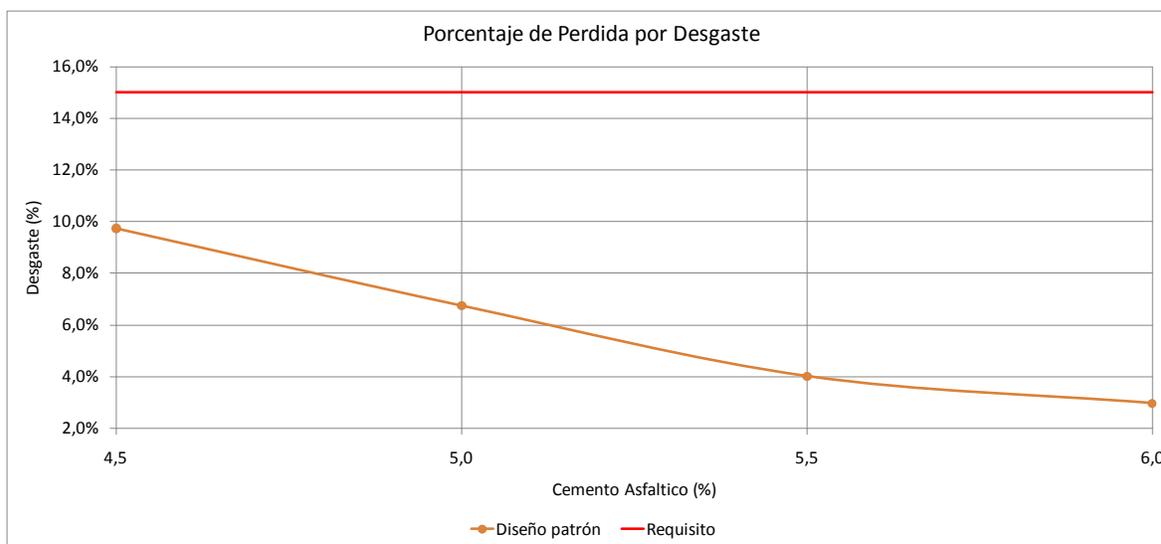
En la Tabla 9 se muestra el detalle del diseño de la Mezcla Patrón.

**Tabla 9. Diseño Mezcla Patrón**

Diseño patrón			
n° probeta	% asfalto	peso áridos (g)	peso asfalto (g)
1	4.5%	1104.4	49.7
2		1103.1	49.6
3		1108.8	49.9
4	5.0%	1104.0	55.2
5		1109.6	55.5
6		1108.7	55.4
7	5.5%	1112.5	61.2
8		1109.5	61.0
9		1103.9	60.7
10	6.0%	1114.0	66.8
11		1106.3	66.4
12		1109.5	66.6

### 5.1.1. Análisis de Perdida por Desgaste

De acuerdo a lo estipulado en el método para la caracterización de mezclas asfálticas abiertas por medio del ensayo Cántabro de pérdida por desgaste descrito en el Manual de Carreteras Volumen 8 sección 8.302.54, se presentan los resultados en la Figura 2.



**Figura 2. Resultado Perdida por Desgaste**

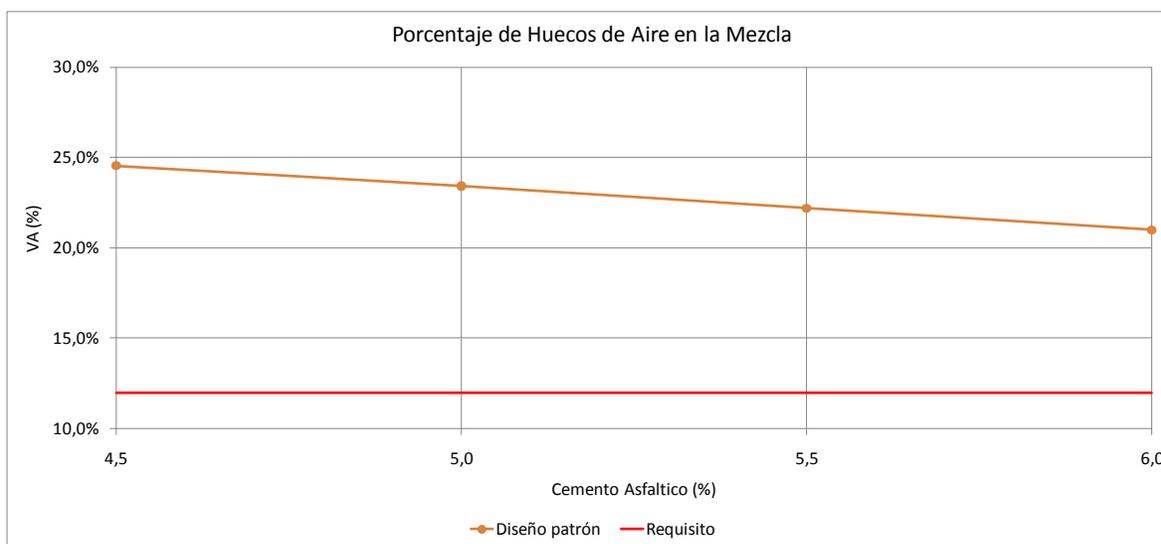
Como se puede apreciar en la grafica, la pérdida por desgaste máxima de 9.7% ocurre para el 4.5% de cemento asfáltico, conforme aumenta este, la perdida por desgaste comienza a disminuir, dándose una relación prácticamente lineal de pendiente negativa entre ambos parámetros de diseño.

Los resultados obtenidos concuerdan con los estudiados por bibliografía, además de cumplir con los requisitos de diseño que establecen una perdida por desgaste menor al 15%.

### 5.1.2. Análisis de Huecos de Aire en la Mezcla (VA)

A partir de los datos obtenidos del peso de las muestras y la medida geométrica de su volumen, se determinó la densidad compactada (G) para cada probeta, junto con esto se determinó la densidad máxima de la mezcla no compactada (Dmm) de acuerdo a lo señalado en Manual de Carreteras Volumen 8 sección 8.302.37. Con esto se obtuvo el porcentaje de huecos de aire en la mezcla de la manera explicada en el ítem Etapa Experimental.

A continuación, en la Figura 3, se muestran los resultados obtenidos del ensayo.



**Figura 3. Resultado Huecos de Aire en la Mezcla**

Es posible establecer una relación inversamente proporcional entre el porcentaje de huecos de aire en la mezcla y el porcentaje de cemento asfáltico, obteniendo su máximo valor de 24,5% para el menor valor porcentual de cemento asfáltico. De acuerdo a los requisitos establecidos para el diseño, estos se cumplen, puesto que se exige un mínimo de 12% de huecos de aire en la mezcla.

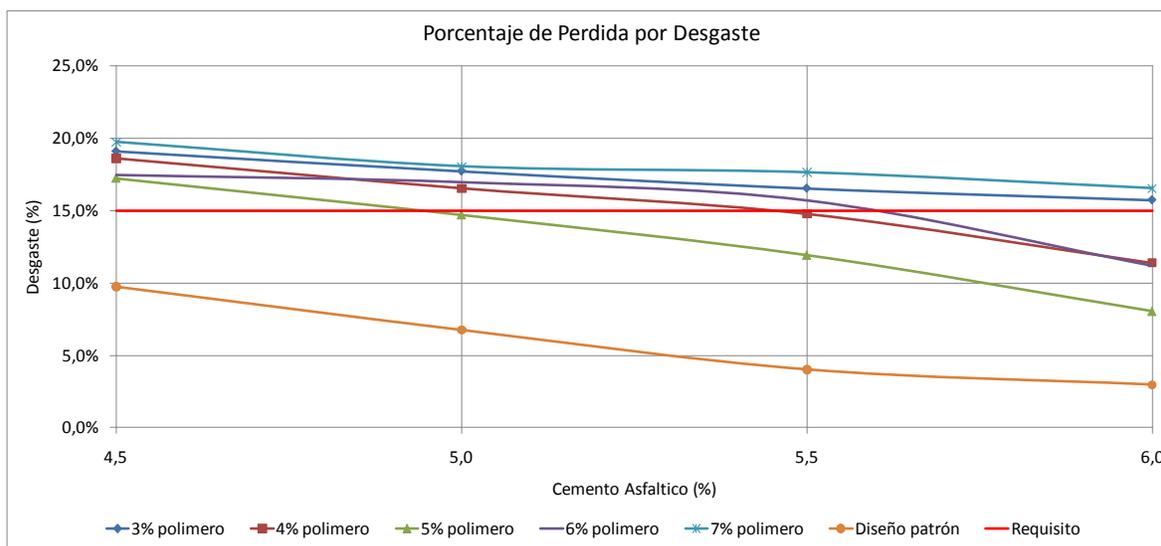
## 5.2. Análisis Mezcla Modificada

El diseño de mezcla modificada se realizó incorporando polímero reciclado a una mezcla patrón en medidas porcentuales a su peso, correspondientes a 3, 4, 5, 6 y 7%, con lo cual se obtuvieron 5 diseños de mezclas monogranulares modificadas con polímero reciclado, a las cuales se le asignó como descriptor el porcentaje de polímero que fue incorporado.

En coherencia con los procedimientos efectuados a las unidades experimentales de mezcla patrón, se realizaron idénticos ensayos a los especímenes de mezcla modificados.

### 5.2.1. Análisis de Perdida por Desgaste

En la Figura 4 se pueden apreciar los valores obtenidos en el ensayo de Perdida por Desgaste.



**Figura 4. Análisis de Perdida por Desgaste, Mezclas Modificadas**

De acuerdo al desarrollo de las curvas de desgaste presentadas en el gráfico anterior, se puede apreciar una clara tendencia a disminuir el porcentaje de pérdida por desgaste a medida que aumenta el porcentaje de cemento asfáltico, así mismo, si se analiza la variación de la Perdida por Desgaste para un porcentaje de cemento asfáltico constante, se

puede encontrar que para el 5% de polímero ocurre un punto en donde se ve minimizada la pérdida por desgaste, dejando a la vista que para este porcentaje de polímero incorporado se encuentra un óptimo de pérdida por desgaste.

Aun así, si se compara la curva para el 5% de polímero incorporado con la curva obtenida para la mezcla patrón, la primera presenta un aumento de aproximadamente 7.1 puntos porcentuales por porcentaje de asfalto, de tal forma, que dando fuera de norma el diseño para 4.5% de cemento asfáltico solamente.

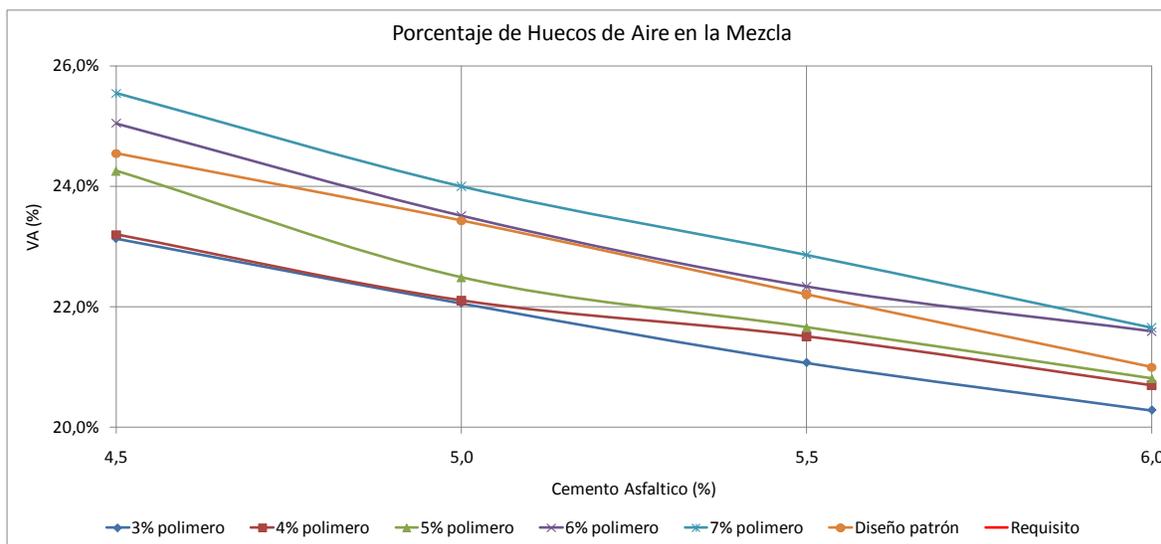
Con respecto a las curvas de 3, 4, 6 y 7% de polímero incorporado, se mantiene la relación inversamente proporcional entre las variables de diseño, lográndose apreciar que para los porcentajes 3 y 7 de polímero incorporado, la curva muestra una tendencia a disminuir su pendiente, infiriendo que para porcentajes de polímeros incorporados bajos, el asfalto logra absorber el polímero puesto que su temperatura es suficiente para cambiar de estado el polipropileno, en consecuencia, la cantidad de asfalto aumenta, lo que produce exudación en la muestra, y por ende, aumenta el desgaste.

Ocurre el mismo fenómeno para porcentajes altos de polímero incorporado, aunque por distintos motivos. En estos casos, el cemento asfáltico no logra absorber por completo el polímero, debido a que su temperatura resulta insuficiente para lograr el cambio de estado en toda la masa de polipropileno, por lo que queda material plástico en estado sólido y que comienza a comportarse como árido, pero con la gran diferencia que este presenta características mecánicas muy por debajo de las exigidas para los áridos utilizados en el diseño de Microaglomerados, lo que se traduce en un aumento de la pérdida por desgaste.

De esta forma, para el 5% de polímero incorporado, se obtiene el valor óptimo en el cual el cemento asfáltico es capaz de absorber la totalidad de polímero incorporado, evitando la exudación en la mezcla y evitando que quede material plástico trabajando como árido, logrando un comportamiento similar al de la mezcla patrón.

### 5.2.2. Análisis de Huecos de Aire en la Mezcla

Los resultados obtenidos en el análisis de huecos de aire en la mezcla se exponen en la Figura 5.



**Figura 5. Resultados Huecos de Aire en la Mezcla, Mezclas Modificadas**

Si se observa el comportamiento de las curvas, se aprecia una clara tendencia a aumentar el porcentaje de huecos de aire conforme se aumenta el porcentaje de polímero incorporado, por otro lado, las curvas correspondientes a un mismo porcentaje de polímero, muestran una tendencia a disminuir a medida que se aumenta el porcentaje de cemento asfáltico, lo que se muestra consecuente con el comportamiento de la mezcla patrón.

Los porcentajes de huecos de aire en la mezcla oscilan entre un 20.3% y un 25.5%, mostrando que los valores no son tan sensible a la incorporación de polímero en comparación a la mezcla patrón, obteniéndose solo un aumento promedio de 0.7 puntos porcentuales en comparación con la curva de 7% de polímero incorporado. Destacando que el desarrollo para las curvas con menores porcentajes de polímero incorporado, se muestra menor que la curva patrón.

Esto ocurre debido a que para valores de polímero incorporado bajos, el asfalto es eficiente en la absorción del plástico, propiciando un comportamiento viscoso, lo que permite que se llenen los vacíos de aire en el esqueleto mineral, por tanto, el porcentaje de vacíos disminuye.

Pero a medida que el porcentaje de polímero va aumentando, el cemento asfáltico comienza a ser insuficiente para cambiar de estado el polipropileno, y no precisamente en cuanto a cantidad, sino que en temperatura, provocando que quede material plástico en estado sólido. En consecuencia, el polímero comienza a participar en la formación del esqueleto mineral de la mezcla, provocando así, el aumento en el porcentaje de huecos de aire en la mezcla.

## 6. CONCLUSIONES

En relación al comportamiento mecánico de las muestras, se apreció una clara tendencia a aumentar la pérdida por desgaste en las mezclas modificadas, llegando a valores máximos de 19.7% para la mezcla con 7% de polímero incorporado. No obstante, se obtuvieron 3 puntos en la curva de pérdida por desgaste en la mezcla con 5% de polímero que cumplieron con el máximo valor permitido por los requisitos de diseño, cuyo valor corresponde al 15%. En cuanto los resultados obtenidos de porcentaje de huecos de aire en la mezcla, se observa que las curvas para 3, 4 y 5% de polímero incorporado, se mantienen por debajo de la curva de la mezcla patrón, con un porcentaje de huecos de aire inferior entre 1 a 2 puntos porcentuales, solo superando a la curva patrón las mezclas diseñadas con 6 y 7% de polímero. Sin embargo, las 5 curvas para mezclas modificadas con polímero reciclado cumplen con los requisitos de diseño, estableciendo este que los huecos de aire en la mezcla deben ser superiores al 12%.

Se encontró un factor determinante en el desarrollo y comportamiento de las curvas de diseño, el cual no fue considerado como una variable independiente sino más bien como una condición de diseño, este factor es la temperatura.

La temperatura es considerada una condición fija en el diseño de las mezclas, fuese patrón o modificada, y esta viene dada por los requisitos de diseño. Pero, al tratarse de un cemento asfáltico tradicional y al cual se le incorpora un polímero que presenta una temperatura de mezclado muy inferior (temperatura ambiente), esta condición pasa a ser un factor determinante a la hora de su eficiencia en la absorción del polímero.

Infiriendo en coherencia con los datos obtenidos de los ensayos y posterior análisis, de determino que para cantidades del orden del 3 a 4% de polímero, el cemento asfáltico presenta una capacidad calorífica suficiente para aumentar la temperatura del polímero y lograr una unión efectiva, de tal forma producir una sustancia viscosa homogénea. Pero, para porcentajes de polímero superiores al 5%, esta capacidad calorífica del cemento

asfáltico comienza a ser insuficiente, lo que se traduce en que parte de los pellets queda en estado sólido, no produciéndose la mezcla viscosa homogénea entre cemento asfáltico y polímero, por tanto el polímero en estado sólido comienza a comportarse como parte del esqueleto mineral de la mezcla. A este fenómeno se le atribuye el aumento en los huecos en la mezcla y el aumento de la pérdida por desgaste para altos porcentajes de polímero, no obstante, cabe destacar que el aumento de pérdida por desgaste para porcentajes menores (3% a 4%), se debe a que el cemento asfáltico al absorber todo el polímero, sobrepasa la cantidad tolerable para generar una mezcla equilibrada en cuanto a los áridos disponible se refiere, produciéndose el fenómeno de exudación.

De esta forma se propuso como diseño para un Microaglomerado discontinuo en caliente modificado con polímero reciclado, el correspondiente al 5% de cemento asfáltico y 5% de polímero incorporado, esto puesto que el 5% de cemento asfáltico es lo mínimo que se puede utilizar de acuerdo a los requisitos de diseño, y con un 5% de polímero, ya que este valor equilibra de manera adecuada la pérdida por desgaste (14.7%) y los huecos de aire en la mezcla (25.5%).

Finalmente se ha propuesto un diseño de mezcla discontinua monogranular en caliente modificada con polímero reciclado que cumple con los requisitos establecidos en el diseño, lo cual la hace técnicamente factible de utilizar, pese a que existe una pérdida de calidad de 14,7% en términos de pérdida por desgaste, y 24,5% en relación a los huecos de aire en la mezcla. Sin embargo, esta pérdida se puede aceptar en conformidad a requerimientos ambientales.

## **7. RECOMENDACIONES**

Se propone realizar tramos de prueba, de tal forma estudiar su comportamiento en terreno, evaluando su rugosidad, sonoridad, drenaje, etc. De esta forma corroborar los análisis expuestos en esta investigación o en su defecto, determinar las falencias y proponer mejoras en el diseño.

Además, se presenta como línea de investigación estudiar la incidencia de la temperatura en la eficiencia de mezcla del cemento asfáltico con el polímero reciclado, ya que se demostró que este factor es determinante en las propiedades mecánicas de la mezcla. De esta forma se presume que el desgaste debería disminuir para porcentajes superiores al 5% de polímero, puesto que no quedaría material plástico en estado sólido afectando la composición del esqueleto mineral, claro está, que en desmedro de esta disminución también deberían disminuir los huecos de aire en la mezcla.

## 8. REFERENCIAS

Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas. (2008). Manual de Carreteras, Vol. 8 *Especificaciones y Métodos de Muestreo, Ensaye y Control. Capítulo 8.300 Asfaltos*. Santiago, Chile.

Fernández, C. (2007). *Formulación de un proyecto de seguimiento para carpetas de rodaduras de Microaglomerados Discontinuos en Caliente*. Tesis Ingeniería Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

Kuehl, R. (2001). *Diseño de Experimentos: Principios estadísticos de diseño y análisis de investigación*. Thomson Learning, Inc., Buenos Aires, Argentina.

Minaya, S. y Ordóñez, A. (2006). *Diseño moderno de pavimentos asfálticos*. Instituto de la Construcción y Gerencia. Lima, Perú.

Montejo, A. (1997). *Ingeniería de pavimentos para carreteras*. Universidad Católica de Colombia Ediciones y Publicaciones, Bogotá, D.C.

Normas de Ensayo del Laboratorio del Transporte y la Mecánica de Suelos (NLT) Cedex, España.

Quezada, C. (2007). *Potencia estadística, sensibilidad y tamaño de efecto: ¿Un nuevo canon para la investigación?* ONOMÁZEIN 16, 159-170.

Rondón, H.; Fernández, W. y Castro, W. (2010). *Evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla densa en caliente modificada con un desecho de polietileno de baja densidad (PEBD)*. Revista Ingeniería de Construcción Volumen 5, 83-94.

Vargas, B., Sergio (2000). *Introducción a la Tecnología de los Microaglomerados Asfálticos en Frio y Discontinuos en Caliente*. Universidad de Chile, Santiago, Chile.

Walpole, R.; Myers, R.; Myers, S. and Ye, K. (2007). *Probability & Statistics for Engineers & Scientists*. Pearson Education International, Inc., London, UK.

## **9. ANEXOS**

## INDICE ANEXOS

ANEXO A .....	37
Diseño Mezcla Patrón.....	37
Diseño Mezcla Modificada 3% de Polímero Reciclado.....	40
Diseño Mezcla Modificada 4% de Polímero Reciclado.....	43
Diseño Mezcla Modificada 5% de Polímero Reciclado.....	46
Diseño Mezcla Modificada 6% de Polímero Reciclado.....	49
Diseño Mezcla Modificada 7% de Polímero Reciclado.....	52
ANEXO B .....	55
Microaglomerado Discontinuo en Caliente .....	55
Especificaciones de los Materiales .....	55
Requisitos de diseño de la mezcla .....	58
Polímeros .....	59
Proceso de reciclado .....	59
ANEXO C .....	62
Prueba de hipótesis con la razón F de Fisher .....	62

## ANEXO A

### Diseño Mezcla Patrón

#### Dosificación Mezcla Patrón

n° probeta	% asf	peso áridos	peso asfalto
1	4,5%	1104,4	49,7
2		1103,1	49,6
3		1108,8	49,9
4	5,0%	1104,0	55,2
5		1109,6	55,5
6		1108,7	55,4
7	5,5%	1112,5	61,2
8		1109,5	61,0
9		1103,9	60,7
10	6,0%	1114,0	66,8
11		1106,3	66,4
12		1109,5	66,6

#### Densidad Máxima de la Mezcla Sin Compactar para 5% de Asfalto

Mm	2014,0
MPa	6756,0
MPam	7968,0
$\rho_T$	997,3
Dmm	2504,4

#### Densidad de la Mezcla Compactada

Pb	5,0
Dmm	2504,4
$\rho_b$	1001,0
$\rho_E$	2707,79

#### Densidad Máxima de la Mezcla Sin Compactar

	4,5	5,0	5,5	6,0
Pb				
$\rho_E$	2707,79		2707,79	2707,79
$\rho_b$	1001,0		1001,0	1001,0
Dmm	2522,57	2504,44	2486,74	2469,45

**Densidad Máxima Compactada**

n° probeta	prom (D)	prom (H)	vol (m3)	peso (kg)	G	prom G
1	10,2	7,4	0,00059846	1,138	1901,3875	1903,50
2	10,2	7,4	0,00059846	1,140	1904,061	
3	10,2	7,4	0,00059846	1,140	1905,0636	
4	10,2	7,4	0,00059846	1,150	1922,1074	1917,76
5	10,2	7,4	0,00059846	1,144	1910,912	
6	10,2	7,4	0,00059846	1,149	1920,2694	
7	10,2	7,4	0,00059846	1,166	1949,0099	1934,70
8	10,2	7,4	0,00059846	1,152	1924,4468	
9	10,2	7,4	0,00059846	1,155	1930,6293	
10	10,2	7,4	0,00059846	1,160	1938,65	1951,02
11	10,2	7,4	0,00059846	1,173	1959,8712	
12	10,2	7,4	0,00059846	1,170	1954,5241	

**Porcentaje de Perdida por Desgaste**

n° probeta	P1	P2	%	Prom
1	1137,9	1031,4	9,4%	8,1%
2	1139,5	1057,7	7,2%	
3	1140,1	1049,9	7,9%	
4	1150,3	1076,6	6,4%	6,7%
5	1143,6	1057,8	7,5%	
6	1149,2	1076,6	6,3%	
7	1166,4	1134,2	2,8%	4,0%
8	1151,7	1100,7	4,4%	
9	1155,4	1099,4	4,8%	
10	1160,2	1117,2	3,7%	3,0%
11	1172,9	1151,6	1,8%	
12	1169,7	1130,3	3,4%	

**Porcentaje de Huecos de Aire en la Mezcla**

n° probeta	VA
1	24,5%
2	
3	
4	23,4%
5	
6	
7	22,2%
8	
9	
10	21,0%
11	
12	

### **Diseño Mezcla Modificada 3% de Polímero Reciclado**

#### **Dosificación Mezcla**

n° probeta	% asf	peso áridos	peso asfalto	peso polímero
1	4,5%	1099,9	49,5	33,0
2		1100,4	49,5	33,0
3		1099,5	49,5	33,0
4	5,0%	1102,1	55,1	33,1
5		1100,6	55,0	33,0
6		1103,1	55,2	33,1
7	5,5%	1101,7	60,6	33,1
8		1097,9	60,4	32,9
9		1101,1	60,6	33,0
10	6,0%	1102,5	66,2	33,1
11		1099,2	66,0	33,0
12		1100,0	66,0	33,0

#### **Densidad Máxima de la Mezcla Sin Compactar para 5% de Asfalto**

Mm	2014,0
MPa	6756,0
MPam	7968,0
$\rho_T$	997,3
Dmm	2504,4

#### **Densidad de la Mezcla Compactada**

Pb	5,0
Dmm	2504,4
$\rho_b$	1001,0
$\rho_E$	2707,79

#### **Densidad Máxima de la Mezcla Sin Compactar**

Pb	4,5	5,0	5,5	6,0
$\rho_E$	2707,79		2707,79	2707,79
$\rho_b$	1001,0		1001,0	1001,0
Dmm	2522,57	2504,44	2486,74	2469,45

**Densidad Máxima Compactada**

n° probeta	prom (D)	prom (H)	vol (m3)	peso (kg)	G	prom G
1	10,2	7,5	0,00060654	1,176	1938,5	1937,48
2	10,2	7,5	0,00060654	1,171	1930,3	
3	10,2	7,5	0,00060654	1,179	1943,6	
4	10,2	7,5	0,00060654	1,183	1950,9	1950,94
5	10,2	7,5	0,00060654	1,180	1945,8	
6	10,2	7,5	0,00060654	1,187	1956,2	
7	10,2	7,5	0,00060654	1,186	1955,0	1955,72
8	10,2	7,5	0,00060654	1,183	1949,9	
9	10,2	7,5	0,00060654	1,190	1962,3	
10	10,2	7,5	0,00060654	1,188	1958,0	1958,47
11	10,2	7,5	0,00060654	1,189	1960,6	
12	10,2	7,5	0,00060654	1,187	1956,8	

**Porcentaje de Perdida por Desgaste**

n° probeta	P1	P2	%	Prom
1	1168,5	937,0	19,8%	19,1%
2	1166,3	953,5	18,2%	
3	1170,2	944,0	19,3%	
4	1176,3	968,3	17,7%	17,7%
5	1174,9	953,8	18,8%	
6	1177,2	980,4	16,7%	
7	1177,0	980,0	16,7%	16,6%
8	1180,1	995,3	15,7%	
9	1173,4	970,9	17,3%	
10	1178,1	985,2	16,4%	15,7%
11	1174,2	997,2	15,1%	
12	1182,1	995,6	15,8%	

**Porcentaje de Huecos de Aire en la Mezcla**

n° probeta	VA
1	23,1%
2	
3	
4	22,1%
5	
6	
7	21,1%
8	
9	
10	20,3%
11	
12	

### **Diseño Mezcla Modificada 4% de Polímero Reciclado**

#### **Dosificación Mezcla**

n° probeta	%asf	peso áridos	peso asfalto	peso polímero
1	4,5%	1100,2	49,5	44,0
2		1099,8	49,5	44,0
3		1101,3	49,6	44,1
4	5,0%	1101,3	55,1	44,1
5		1101,8	55,1	44,1
6		1102,1	55,1	44,1
7	5,5%	1097,2	60,3	43,9
8		1099,3	60,5	44,0
9		1101,4	60,6	44,1
10	6,0%	1098,7	65,9	43,9
11		1103,2	66,2	44,1
12		1100,2	66,0	44,0

#### **Densidad Máxima de la Mezcla Sin Compactar para 5% de Asfalto**

Mm	2014,0
MPa	6756,0
MPam	7968,0
$\rho T$	997,3
Dmm	2504,4

#### **Densidad de la Mezcla Compactada**

Pb	5,0
Dmm	2504,4
$\rho b$	1001,0
$\rho E$	2707,79

#### **Densidad Máxima de la Mezcla Sin Compactar**

Pb	4,5	5,0	5,5	6,0
$\rho E$	2707,79		2707,79	2707,79
$\rho b$	1001,0		1001,0	1001,0
Dmm	2522,57	2504,44	2486,74	2469,45

**Densidad Máxima Compactada**

n° probeta	prom (D)	prom (H)	vol (m3)	peso (kg)	G	prom G
1	10,2	7,5	0,00060654	1,176	1938,5	1937,48
2	10,2	7,5	0,00060654	1,171	1930,3	
3	10,2	7,5	0,00060654	1,179	1943,6	
4	10,2	7,5	0,00060654	1,183	1950,9	1950,94
5	10,2	7,5	0,00060654	1,180	1945,8	
6	10,2	7,5	0,00060654	1,187	1956,2	
7	10,2	7,5	0,00060654	1,186	1955,0	1955,72
8	10,2	7,5	0,00060654	1,183	1949,9	
9	10,2	7,5	0,00060654	1,190	1962,3	
10	10,2	7,5	0,00060654	1,188	1958,0	1958,47
11	10,2	7,5	0,00060654	1,189	1960,6	
12	10,2	7,5	0,00060654	1,187	1956,8	

**Porcentaje de Perdida por Desgaste**

n° probeta	P1	P2	%	Prom
1	1175,8	1000,5	14,9%	18,6%
2	1170,8	871,5	25,6%	
3	1178,9	997,8	15,4%	
4	1183,3	983,2	16,9%	16,5%
5	1180,2	988,8	16,2%	
6	1186,5	990,5	16,5%	
7	1185,8	1013,6	14,5%	14,8%
8	1182,7	1002,1	15,3%	
9	1190,2	1017,1	14,5%	
10	1187,6	1043,9	12,1%	11,4%
11	1189,2	1063,1	10,6%	
12	1186,9	1050,9	11,5%	

### Porcentaje de Huecos de Aire en la Mezcla

n° probeta	VA
1	23,2%
2	
3	
4	22,1%
5	
6	
7	21,5%
8	
9	
10	20,7%
11	
12	

## **Diseño Mezcla Modificada 5% de Polímero Reciclado**

### **Dosificación Mezcla**

n° probeta	%asf	peso áridos	peso asfalto	peso polímero
1	4,5%	1098,4	49,4	54,9
2		1102,2	49,6	55,1
3		1098,9	49,5	54,9
4	5,0%	1101,9	55,1	55,1
5		1100,8	55,0	55,0
6		1103,2	55,2	55,2
7	5,5%	1101,1	60,6	55,1
8		1098,2	60,4	54,9
9		1102,7	60,6	55,1
10	6,0%	1099,4	66,0	55,0
11		1101,8	66,1	55,1
12		1099,6	66,0	55,0

### **Densidad Máxima de la Mezcla Sin Compactar para 5% de Asfalto**

Mm	2014,0
MPa	6756,0
MPam	7968,0
$\rho_T$	997,3
Dmm	2504,4

### **Densidad de la Mezcla Compactada**

Pb	5,0
Dmm	2504,4
$\rho_b$	1001,0
$\rho_E$	2707,79

### **Densidad Máxima de la Mezcla Sin Compactar**

Pb	4,5	5,0	5,5	6,0
$\rho_E$	2707,79		2707,79	2707,79
$\rho_b$	1001,0		1001,0	1001,0
Dmm	2522,57	2504,44	2486,74	2469,45

**Densidad Máxima Compactada**

n° probeta	prom (D)	prom (H)	vol (m3)	peso (kg)	G	prom G
1	10,2	7,7	0,00061868	1,182	1910,3703	1910,80
2	10,2	7,7	0,00061868	1,184	1914,2495	
3	10,2	7,7	0,00061868	1,180	1907,7841	
4	10,2	7,6	0,00061463	1,193	1940,9981	1941,38
5	10,2	7,7	0,00061868	1,200	1938,8181	
6	10,2	7,7	0,00061868	1,203	1944,3138	
7	10,2	7,6	0,00061463	1,200	1952,0616	1952,01
8	10,2	7,6	0,00061463	1,199	1951,2481	
9	10,2	7,6	0,00061463	1,200	1952,7124	
10	10,2	7,6	0,00061463	1,202	1955,3156	1955,70
11	10,2	7,6	0,00061463	1,203	1957,5934	
12	10,2	7,6	0,00061463	1,201	1954,1767	

**Porcentaje de Perdida por Desgaste**

n° probeta	P1	P2	%	Prom
1	1181,9	978,5	17,2%	17,2%
2	1184,3	981,1	17,2%	
3	1180,3	975,9	17,3%	
4	1193,0	1023,2	14,2%	14,7%
5	1199,5	1019,5	15,0%	
6	1202,9	1024,1	14,9%	
7	1199,8	1055,3	12,0%	11,9%
8	1199,3	1052,9	12,2%	
9	1200,2	1062,1	11,5%	
10	1201,8	1105,9	8,0%	8,0%
11	1203,2	1109,8	7,8%	
12	1201,1	1100,3	8,4%	

### Porcentaje de Huecos de Aire en la Mezcla

n° probeta	VA
1	24,3%
2	
3	
4	22,5%
5	
6	
7	21,7%
8	
9	
10	20,8%
11	
12	

## **Diseño Mezcla Modificada 6% de Polímero Reciclado**

### **Dosificación Mezcla**

n° probeta	%asf	peso áridos	peso asfalto	peso polímero
1	4,5%	1103,8	49,7	66,2
2		1101,9	49,6	66,1
3		1099,2	49,5	66,0
4	5,0%	1101,8	55,1	66,1
5		1099,9	55,0	66,0
6		1102,2	55,1	66,1
7	5,5%	1098,0	60,4	65,9
8		1099,1	60,5	65,9
9		1101,7	60,6	66,1
10	6,0%	1102,3	66,1	66,1
11		1101,2	66,1	66,1
12		1102,5	66,2	66,2

### **Densidad Máxima de la Mezcla Sin Compactar para 5% de Asfalto**

Mm	2014,0
MPa	6756,0
MPam	7968,0
$\rho_T$	997,3
Dmm	2504,4

### **Densidad de la Mezcla Compactada**

Pb	5,0
Dmm	2504,4
$\rho_b$	1001,0
$\rho_E$	2707,79

### **Densidad Máxima de la Mezcla Sin Compactar**

Pb	4,5	5,0	5,5	6,0
$\rho_E$	2707,79		2707,79	2707,79
$\rho_b$	1001,0		1001,0	1001,0
Dmm	2522,57	2504,44	2486,74	2469,45

**Densidad Máxima Compactada**

n° probeta	prom (D)	prom (H)	vol (m3)	peso (kg)	G	prom G
1	10,2	7,9	0,00063485	1,200	1890,20909	1890,73
2	10,2	7,9	0,00063485	1,204	1896,03724	
3	10,2	7,9	0,00063485	1,197	1885,95612	
4	10,2	7,8	0,00063081	1,208	1915,32504	1915,59
5	10,2	7,8	0,00063081	1,203	1907,24016	
6	10,2	7,8	0,00063081	1,214	1924,20256	
7	10,2	7,8	0,00062676	1,212	1933,26623	1935,23
8	10,2	7,8	0,00062676	1,213	1935,81903	
9	10,2	7,8	0,00062676	1,214	1936,61678	
10	10,2	7,8	0,00062676	1,212	1934,38308	1936,35
11	10,2	7,8	0,00062676	1,220	1945,87067	
12	10,2	7,8	0,00062676	1,209	1928,79883	

**Porcentaje de Perdida por Desgaste**

n° probeta	P1	P2	%	Prom
1	1200,0	989,8	17,5%	17,5%
2	1203,7	985,1	18,2%	
3	1197,3	997,3	16,7%	
4	1208,2	997,8	17,4%	17,0%
5	1203,1	1002,7	16,7%	
6	1213,8	1009,7	16,8%	
7	1211,7	1016,1	16,1%	15,7%
8	1213,3	1021,8	15,8%	
9	1213,8	1029,6	15,2%	
10	1212,4	1076,4	11,2%	11,2%
11	1219,6	1088,1	10,8%	
12	1208,9	1069,1	11,6%	

### Porcentaje de Huecos de Aire en la Mezcla

n° probeta	VA
1	25,0%
2	
3	
4	23,5%
5	
6	
7	22,3%
8	
9	
10	21,6%
11	
12	

**Diseño Mezcla Modificada 7% de Polímero Reciclado**

**Dosificación Mezcla**

n° probeta	%asf	peso áridos	peso asfalto	peso polímero
1	4,5%	1099,0	49,5	76,9
2		1094,1	49,2	76,6
3		1097,2	49,4	76,8
4	5,0%	1099,7	55,0	77,0
5		1096,3	54,8	76,7
6		1099,5	55,0	77,0
7	5,5%	1104,2	60,7	77,3
8		1101,9	60,6	77,1
9		1100,1	60,5	77,0
10	6,0%	1101,5	66,1	77,1
11		1098,4	65,9	76,9
12		1098,1	65,9	76,9

**Densidad Máxima de la Mezcla Sin Compactar para 5% de Asfalto**

Mm	2014,0
MPa	6756,0
MPam	7968,0
$\rho_T$	997,3
Dmm	2504,4

**Densidad de la Mezcla Compactada**

Pb	5,0
Dmm	2504,4
$\rho_b$	1001,0
$\rho_E$	2707,79

**Densidad Máxima de la Mezcla Sin Compactar**

Pb	4,5	5,0	5,5	6,0
$\rho_E$	2707,79		2707,79	2707,79
$\rho_b$	1001,0		1001,0	1001,0
Dmm	2522,57	2504,44	2486,74	2469,45

**Densidad Máxima Compactada**

n° probeta	prom (D)	prom (H)	vol (m3)	peso (kg)	G	prom G
1	10,2	7,9	0,00063889	1,201	1879,1849	1878,25
2	10,2	7,9	0,00063889	1,198	1875,2719	
3	10,2	7,9	0,00063889	1,201	1880,2805	
4	10,2	7,9	0,00063889	1,217	1904,6977	1903,50
5	10,2	7,9	0,00063889	1,212	1897,1847	
6	10,2	7,9	0,00063889	1,219	1908,6107	
7	10,2	7,9	0,00063485	1,221	1923,2878	1922,29
8	10,2	7,9	0,00063485	1,219	1920,7675	
9	10,2	7,9	0,00063485	1,221	1922,8152	
10	10,2	7,8	0,00063081	1,219	1933,0801	1934,77
11	10,2	7,8	0,00063081	1,218	1930,5437	
12	10,2	7,8	0,00063081	1,224	1940,6894	

**Porcentaje de Perdida por Desgaste**

n° probeta	P1	P2	%	Prom
1	1200,6	974,1	18,9%	19,7%
2	1198,1	951,1	20,6%	
3	1201,3	964,1	19,7%	
4	1216,9	1006,3	17,3%	18,1%
5	1212,1	987,3	18,5%	
6	1219,4	995,9	18,3%	
7	1221,0	1016,5	16,7%	17,6%
8	1219,4	998,6	18,1%	
9	1220,7	1000,1	18,1%	
10	1219,4	1002,1	17,8%	16,5%
11	1217,8	1023,1	16,0%	
12	1224,2	1030,3	15,8%	

### Porcentaje de Huecos de Aire en la Mezcla

n° probeta	VA
1	25,5%
2	
3	
4	24,0%
5	
6	
7	22,9%
8	
9	
10	21,7%
11	
12	

## ANEXO B

### Microaglomerado Discontinuo en Caliente

#### *Especificaciones de los Materiales*

De acuerdo a la categoría de tráfico pesado, los materiales utilizados en el diseño de las mezclas discontinuas monogranulares deben cumplir con los siguientes requisitos:

- Árido grueso: corresponde al árido total retenido en el tamiz 2.5 mm (n°8).

#### **Requisitos para Árido Grueso.**

<b>ENSAYES/CARACTERISTICAS</b>	<b>REQUISITOS</b>	<b>NORMA</b>
<b>Partículas fracturadas</b>		
Para categoría de tráfico T0,T1 y T2	100%	LNV 3
Para categoría de tráfico T3,T4 y bermas	Mínimo 75%	LNV 3
Contenido de impurezas	<0,5%	NLT - 172/86
<b>Índice de lajas</b>		
Para categoría de tráfico T0,T1 y T2	Máximo 25% (Mezclas tipo F) Máximo 20% (Mezclas tipo M)	LNV 3
Para categoría de tráfico T3,T4 y bermas	Máximo 30% (Mezclas tipo F y M)	LNV 3
<b>Abrasión de Los Ángeles</b>		
Para categoría de tráfico T0,T1 y T2	Máximo 20% (Mezclas tipo F) Máximo 15% (Mezclas tipo M)	LNV 75
Para categoría de tráfico T3,T4 y bermas	Máximo 25% (Mezclas tipo F y M)	LNV 75
<b>Pulimento acelerado</b>		
Para categoría de tráfico T0,T1 y T2	Mínimo 0,50	NLT - 174/93
Para categoría de tráfico T3,T4 y bermas	Mínimo 0,45	NLT - 174/93
Adhesividad ligante-árido en agua	≥95%	LNV 9

- Árido fino: corresponde al árido total que pasa por el tamiz 2.5 mm y queda retenido en el tamiz 80  $\mu\text{m}$  (n°200).

### Requisitos para Árido Fino.

ENSAYES	REQUISITOS	NORMA
Equivalente en arena	Mínimo 50%	LNV 71
Azul metileno	Máximo 1	NLT - 171/90
Adhesividad ligante-árido	>4%	LNV 10

Dependiendo del tipo de mezcla, existen 2 bandas granulométricas, se recomienda:

### Bandas Granulométricas para distintos tipos de mezcla discontinua.

Tamaño tamiz		Bandas				Tolerancia (%)
		M8 (% pasa)	M10 (% pasa)	F8 (% pasa)	F10 (% pasa)	
1/2"	12,5 mm		100		100	$\pm 4$
3/8"	10,0 mm	100	75 - 97	100	75 - 97	$\pm 4$
5/16"	8,0 mm	75 - 97		75 - 97		$\pm 4$
n° 4	5,0 mm	15 - 28	15 - 28	25 - 40	25 - 40	$\pm 4$
n° 8	2,5 mm	15 - 25	12 - 25	20 - 35	20 - 35	$\pm 3$
n° 30	630 $\mu\text{m}$	9 - 18	9 - 18	12 - 25	12 - 25	$\pm 3$
n° 200	80 $\mu\text{m}$	5 - 8	5 - 8	7 - 10	7 - 10	$\pm 1$

- Cemento Asfáltico: se utiliza cemento asfáltico modificado con elastómeros del tipo 60/80.

### Requisitos para Cemento Asfáltico.

ENSAYE	REQUISITOS	NORMA
Penetración (25°C, 100g, 5s)	60 - 80	LNV 34
Punto de reblandecimiento anillo y bola	Mínimo 65°C	LNV 48
Ductilidad (5 cm/min) a 5°C	Mínimo 50 cm	LNV 35
Índice de penetración	Mínimo +4	
Punto de fragilidad Fraass	Máximo -18°C	NLT 182
Punto de inflamación	Mínimo 235°C	LNV 36
Ductilidad (5 cm/min) a 25°C	Mínimo 80 cm	LNV 35
Recuperación elástica	Mínimo 60%	DIN 52013

- Polvo mineral o Filler: corresponde a la fracción del árido total que pasa por el tamiz 150  $\mu\text{m}$  (n°100) y queda retenida en el tamiz 80  $\mu\text{m}$  (n°200).

**Requisitos para Polvo Mineral.**

<b>ENSAYE</b>	<b>REQUISITOS</b>	<b>NORMA</b>
Densidad aparente	0,5 - 0,8 (g/cm <sup>3</sup> )	NLT - 176/92
		LNV 67

*Requisitos de diseño de la mezcla*

La mezcla debe cumplir con los requisitos correspondientes.

**Requisitos para Microaglomerados Discontinuos en Caliente.**

ENSAYE/CARACTERÍSTICA	REQUISITOS	NORMA/RECOMENDACIÓN
<b>Dotación media:</b>		
Tipo M8	25- 40	
Tipo M10	35 - 50	
Tipo F8	40 - 75	
Tipo F10	50 - 100	
<b>% Asfalto:</b>		
Tipo M8 y M10	≥5,0	
Tipo F8 y F10	≥5,5	
<b>Betún residual en riesgo de adherencia:</b>		
Tipo M8 y M10:		
Pavimento nuevo	>0,25	
Pavimento antiguo	>0,40	
Tipo F8 y F10:		
Pavimento nuevo	>0,20	
Pavimento antiguo	>0,35	
<b>Dosificación para mezclas tipo F:</b>		
Procedimiento Marshall (50 golpes)		LNV 46
→ Huecos en mezcla	Mínimo 4%	
→ Estabilidad	Mínimo 7,5 KN	
Velocidad de deformación en el intervalo de 105-120 min	12 - 15 µm/min	NLT - 173/84
Pérdida de resistencia (Ensaye de inmersión-compresión)	≤25%	NLT - 161/84
		NLT - 162/84
<b>Dosificación para mezclas tipo M:</b>		
Procedimiento Cántabro		NLT - 352/83
→ Tipo de probeta	Marshall	
→ N° de golpes por cara	50	
→ Pérdida por abrasión en seco (25°C)	<15%	
→ Huecos en mezcla	≥12%	

## Polímeros

### Proceso de reciclado

Los plásticos están elaborados con distintos tipos de polímeros, principalmente del tipo termoplástico, de esto se desprende la necesidad de crear un sistema de codificación que permita clasificarlos, de tal manera, llevar a cabo su correcta recolección y reciclaje. En la siguiente Tabla se muestran las distintas simbologías para cada polímero en cuestión.

### Clasificación de los Polímeros.

TERMOPLASTICO	SIMBOLOGIA		APLICACIONES	USOS POST-RECIKLADO
Polietileno tereftalato	PET		Botellas, envasado de productos alimenticios, moquetas, refuerzos neumáticos de coches.	Textiles para bolsas, lonas y velas náuticas, cuerdas, hilos.
Polietileno alta densidad	PEAD		Botellas para productos alimenticios, detergentes, contenedores, juguetes, bolsas, embalajes y film, láminas y tuberías.	Bolsas industriales, botellas de detergentes, contenedores, tubos.
Policloruro de vinilo	PVC		Marcos de ventanas, tuberías rígidas, revestimientos para suelos, botellas, cables aislantes, tarjetas de crédito, productos de uso sanitario.	Muebles de jardín, tuberías, vallas, contenedores.
Polietileno de baja densidad	PEBD		Film adhesivo, bolsas, revestimientos de cubos, recubrimiento contenedores flexibles, tuberías para riego.	Bolsas para residuos industriales, tubos, contenedores, film uso agrícola, vallado.
Polipropileno	PP		Envases para productos alimenticios, cajas, tapones, piezas de automóviles, alfombras y componentes eléctricos.	Cajas múltiples para transporte de envases, sillas, textiles.
Poliestireno	PS		Botellas, vasos de yogures, recubrimientos.	Aislamiento térmico, cubos de basura, accesorios de oficina.

A estos plásticos, elaborados con distintos tipos de polímero, se les pueden aplicar 4 tipos de reciclado: primario, secundario, terciario y cuaternario. Siendo el reciclaje primario el más relevante para esta investigación, estos son:

- a) Reciclaje primario: Los desechos plásticos se convierten en artículos con propiedades físicas y químicas idénticas al material original, y se divide en las siguientes etapas:
- Separación: existen 2 métodos de separación, macroseparación y microseparación, el primero consta de una separación sobre el producto completo, y se realiza de forma óptica discriminando por color y/o forma. El segundo, permite separar de acuerdo a las propiedades físicas que presenta el producto, como: tamaño, peso, densidad, etc.
  - Granulado: se muele y granula el plástico, similar en forma y tamaño a las hojuelas de cereal.
  - Limpieza: se separa el plástico granulado de elementos externos al proceso de reciclado, como: papel, piedras, pegamentos, etc.
  - Peletizado: el plástico se funde para modelarse de forma y espesor como un tallarín, luego se enfría en un baño de agua para, finalmente, ser cortado en pedacitos llamados pellets.
- b) Reciclaje secundario: En este tipo de reciclado se elimina el proceso de separación y limpieza de los plásticos, por lo cual, luego de ser molidos y fundidos, se obtienen materiales con propiedades inferiores al polímero de origen.
- c) Reciclaje terciario: Los polímeros son modificados tanto física como químicamente, de esta forma se obtienen compuestos químicos básicos y combustible.

- d) Reciclaje cuaternario: El plástico es utilizado como combustible, de tal forma, se pueden llevar a cabo otros procesos con la energía térmica que es liberada. Su desventaja, la generación de contaminantes gaseosos.

## ANEXO C

### Prueba de hipótesis con la razón F de Fisher

De manera de entender el concepto teórico detrás del análisis computacional que se llevara a cabo en el ítem siguiente, se explica la base matemática y estadística de la prueba de hipótesis utilizada en la investigación.

Para determinar el número de especímenes necesarios y para que los datos obtenidos sean representativos de una población, se aplicara el análisis de varianza (ANOVA) utilizando la prueba F de Fisher.

Para llevar a cabo el contraste de hipótesis:

$$H_0 = \sigma_1 - \sigma_2 = 0 \Rightarrow \text{Hipotesis Nula}$$

$$H_a = \sigma_1 - \sigma_2 \neq 0 \Rightarrow \text{Hipotesis Alternativa}$$

Es necesario estimar la razón F a partir del cociente entre la estimación intermedia y la estimación interna:

$$\text{Razón F} = \frac{s_x^2}{s_w^2}$$

El valor estadístico de prueba ( $F_{\text{prueba}}$ ) resultante se debe comparar con un valor tabular de F ( $F_{\text{tabla}}$ ), que indicara el máximo valor estadístico de prueba para considerar  $H_0$  verdadera.

La Razón F tabular depende del número de grados de libertad que estén asociados a ella. Para lo cual, la estimación intermedia de varianza o numerador, comprende la división de la suma de las diferencias elevadas al cuadrado entre el número de medias o muestras menos uno,  $(k-1)$  es el número de grados de libertad del numerador.

De forma similar, al calcular cada varianza muestral, la suma de las diferencias elevadas al cuadrado entre el valor medio de la muestra y cada valor de la misma se divide entre el número de observaciones de la muestra menos uno,  $n-1$ . Por lo tanto, el promedio de las varianzas muestrales se determina dividiendo la suma de las varianzas de las muestras entre el número de muestras, o  $k$ . entonces los grados de libertad para el denominador son  $k(n-1)$ . También es necesario obtener la razón F de prueba, la cual se obtiene a partir de los datos muestrales. Se expone el siguiente procedimiento:

- a) Calcular la estimación interna (denominador):

Determinar la varianza de cada muestra:

$$S^2 = \frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n-1}$$

Obtener la estimación interna de la varianza (varianza promedio de la muestra):

$$S_w^2 = \frac{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 + \dots + S_k^2}{k}$$

- b) Calcular la estimación intermedia (numerador):

Calcular la varianza de las medias muestrales:

$$S_x^2 = \frac{\sum(\bar{x} - \bar{\bar{x}})^2}{k-1}$$

Multiplicar las medias muestrales por  $n$ :

$$nS_x^2$$

Razón F:

$$F_{\text{prueba}} = \frac{S_x^2}{S_w^2}$$

Si  $F_{\text{prueba}}$  es menor que  $F_{\text{tabla}}$ , la hipótesis nula se aprueba.