

## **CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN**

### **1.1. GENERALIDADES**

La tendencia actual en el tratamiento de residuos es el aprovechamiento máximo de recursos mediante su reutilización o reciclado antes del vertido y eliminación, con el objetivo de cuidar el medio ambiente, evitar la masificación de los vertederos y contribuir a la disminución en el uso de materias primas naturales. Las posibilidades que tiene el reciclado son amplias, como el reciclaje de la carpeta de rodadura, que actualmente es una tendencia en alza para la rehabilitación de carreteras.

El reciclado es una técnica que consiste en la reutilización de materiales procedentes de las capas que conforman el paquete estructural del pavimento que ya han estado en servicio: materiales que han perdido algunas de sus propiedades iniciales por el uso o envejecimiento (cohesión, textura, composición, geometría) pero que tienen el potencial de ser reutilizados para integrar nuevas capas.

Uno de los motivos que impulsó las técnicas de reciclado de pavimentos, fue la crisis de precios del petróleo en los años 70. Esta crisis no sólo hizo subir el precio del cemento asfáltico, sino que además surgió el planteamiento de un ahorro de energía.

### **1.2. JUSTIFICACIÓN**

En nuestra ciudad existen kilómetros correspondientes a la Red Fundamental de caminos y carreteras pavimentadas, cada año varios de estos pavimentos requieren de rehabilitaciones mayores y menores. Los pavimentos deteriorados se caracterizan por viajes incómodos y por tener mal formaciones físicas como grietas, huecos, ahuellamientos, deformaciones y desmoronamientos por lo que el deterioro de los pavimentos se acelerará después de varios años de servicio pero una rehabilitación a tiempo con tratamientos como la adición de una nueva capa de rodadura mediante el reciclaje o recuperación de los asfaltos envejecidos pueden devolver la calidad del pavimento y extender la vida útil de la carretera. La capa de rodadura de los pavimentos flexibles está compuesta por ligante asfáltico y agregados minerales los que en muchas

regiones son escasos, haciendo que la ejecución de proyectos de pavimentación asfáltica sean más costosos.

El reciclado de asfalto es una nueva técnica utilizada para el aprovechamiento efectivo de asfaltos envejecidos y reduciendo la cantidad de agregados utilizados en la mezcla asfáltica por lo tanto disminuyendo los residuos los que constituyen un gran problema medioambiental. El reciclado se realiza en caliente y en frío la aplicación del asfalto en caliente requiere calentar la mezcla y por tanto el agregado, por lo cual se genera una leve contaminación ambiental debido a la evaporación de algunos constituyentes del asfalto, en general este proceso ofrece una buena adhesión, pero tarda en enfriar por lo que el uso de la carretera se demora, las emulsiones asfálticas implican un proceso de emulsión y son aplicables en frío, de manera general no contaminan, pues no hay evaporación ni de solventes ni de constituyentes del asfalto. Por lo tanto teniendo en cuenta que en las vías de nuestra ciudad ya no se podrá realizar un recapado debido a que ya se realizó hace unos años atrás, en esta investigación se ofrece una alternativa en la cual podemos tener un aprovechamiento máximo de los recursos minimizando costos y recursos naturales mediante el reciclado de carpetas asfálticas elaboradas con emulsiones asfálticas la cual someteremos a una evaluación para ver su comportamiento.

Los procedimientos de construcción y conservación de carreteras consumen fundamentalmente dos tipos de recursos: naturales y energía. Mediante la aplicación de los reciclados, se reduce el consumo de ambos recursos. Este trabajo tratará de reflejar lo que pasa en el mundo, viendo que es una gran opción para nuestra ciudad donde estaremos aplicando nuevas técnicas de rehabilitación de vías.

### **1.3. DISEÑO TEÓRICO**

#### **1.3.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

##### **1.3.1.1. Situación Problémica**

El deterioro del pavimento se debe a una serie de factores lo que hace que sufra un proceso progresivo de deterioro, lo que lleva a una disminución de los niveles

de seguridad y confort del tráfico y teniendo en cuenta que en las vías urbanas de nuestra ciudad ya no se podrá realizar un recapado como rehabilitación vial, debido a que ya se realizó hace unos años atrás y con otro subiría el nivel de la calzada, dejando sin el complemento cordón-calzada que forma la cuneta, donde se evacuan las aguas pluviales, tal caso causaría problemas en la estructura de la carpeta dañándola por la mala evacuación del agua, causando incomodidad en el tráfico vehicular y peatonal, como también inundaciones que podrían darse en las viviendas. Todos estos factores más los problemas ambientales, justifican la búsqueda de nuevas técnicas como el reciclado de carpetas asfálticas utilizando emulsión, en nuestro medio sería una técnica innovadora, con la finalidad de preservar el medio ambiente, proteger los recursos naturales y requerir un bajo costo en su ejecución.

#### **1.3.1.2. Problema**

¿Se podrá aplicar el reciclado de carpetas asfálticas utilizando emulsión asfáltica para las vías de la ciudad de Tarija?

### **1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **1.4.1. OBJETIVO GENERAL**

Analizar el comportamiento de mezclas asfálticas elaboradas con reciclado de carpetas asfálticas utilizando emulsión asfáltica, cuyo comportamiento va a ser evaluado en su estabilidad, deformación, % de vacíos, % de huecos ocupados por la emulsión y peso volumétrico.

#### **1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Describir las características de la emulsión asfáltica y sus propiedades.
- Realizar un muestreo de materiales para realizar la investigación en cuanto se refiere a material reciclado.
- Realizar la caracterización del material reciclado realizando los ensayos de granulometría.

- Realizar la caracterización de la emulsión asfáltica en su viscosidad, destilación y peso específico.
- Realizar un proceso investigativo con diferentes porcentajes de emulsión tomando como base el material reciclado de manera de evaluar el comportamiento de la mezcla con emulsión.
- Realizar un análisis de resultados sobre el comportamiento de la mezcla asfáltica reciclada con emulsión.
- Redactar conclusiones y recomendaciones.

### 1.5. HIPÓTESIS

Si realizamos un reciclado de carpetas asfálticas con distintos porcentajes de emulsión donde podemos realizar un análisis de resultados sobre el comportamiento en estabilidad, deformación, % de vacíos, % de huecos ocupados por la emulsión y peso volumétrico, entonces la misma podrá ser aplicada con éxito en nuestra ciudad.

### 1.6. CONCEPTUALIZACIÓN Y OPERACIONALIZACIÓN

#### 1.6.1. VARIABLE INDEPENDIENTE

- Porcentaje de emulsión.

*Tabla 1. Variable Independiente*

VARIABLE NOMINAL	CONCEPTUALIZACIÓN	OPERACIONALIZACIÓN		
		DIMENSIÓN	INDICADOR	VALOR ACCIÓN
Porcentaje de emulsión	Se refiere a la aplicación de distintos porcentajes de emulsión a una mezcla reciclada	Carpeta Asfáltica	Emulsión Asfáltica	Viscosidad Saybolt
				Residuo por Destilación
				Peso Especifico
			Material Reciclado	Granulometría

*Fuente:* Elaboración Propia

## 1.6.2.VARIABLE DEPENDIENTE

- Estabilidad.
- Deformación.
- % de vacíos.
- % de huecos ocupados por la emulsión asfáltica.
- Peso volumétrico.

**Tabla 2. Variable Dependiente**

VARIABLE NOMINAL	CONCEPTUALIZACIÓN	OPERACIONALIZACIÓN		
		DIMENSIÓN	INDICADOR	VALOR ACCIÓN
Estabilidad	Ensayo para determinar valores de estabilidad de los pavimentos asfálticos ideado por Bruce G. Marshall del Departamento de Caminos del Estado de Mississippi (EEUU)	Carpeta asfáltica	Marshall	Equipo para Marshall
Deformación	Ensayo para determinar valores de deformabilidad de los pavimentos asfálticos ideado por Bruce G. Marshall del Departamento de Caminos del Estado de Mississippi (EEUU)	Carpeta asfáltica	Marshall	Equipo para Marshall
Peso Volumétrico	Pruebas de los especímenes	Carpeta asfáltica	Ecuación	Peso
				Volumen
% de Vacíos	Son vacíos o bolsas de aire	Carpeta asfáltica	Ecuación	Volumen de Emulsión
				Volumen total de huecos
% de huecos ocupados por la emulsión asfáltica	Es el volumen total de huecos que existiría si el material pétreo no tuviera emulsión	Carpeta asfáltica	Ecuación	Densidad Relativa (pétreos)
				Peso Volumétrico
				Densidad Relativa (emulsión)
				% de Emulsión

*Fuente:* Elaboración Propia

## 1.7. DISEÑO METODOLÓGICO

### 1.7.1. UNIDADES DE ESTUDIO Y DECISIÓN MUESTRAL

#### 1.7.1.1. Población

Siendo la población la siguiente:

- Estabilidad.
- Deformación.
- % de vacíos.
- % de huecos ocupados por la emulsión asfáltica.
- Peso volumétrico.

#### 1.7.1.2. Muestra

### COMPORTAMIENTO DE RECICLADO EN FRÍO CON EMULSIÓN



#### 1.7.1.3. Muestreo de Materiales

Recolección de muestras de tres puntos de la ciudad basando en las empresas y/o instituciones que operan en la misma:

- Alcaldía Municipal: La toma de muestra se realizara del centro de la ciudad específicamente de la calle General Trigo.
- Sedeca: Se tomara la muestra del tramo Iscayachi San Lorencito.
- Otras empresas: Se tomara la muestra del campus universitario de la U.A.J.M.S.

## **1.8. MÉTODOS Y TÉCNICAS EMPLEADAS**

### **1.8.1. RELEVAMIENTO DE LA INFORMACIÓN**

#### **1.8.1.1. Reconocimiento del Sitio de Aplicación**

Teniendo en la ciudad de Tarija una zona de conflicto por el hecho de no poder realizar un recapado debido a que ya se realizó uno hace unos años atrás y no se puede recapar por tercera vez porque subiría el nivel de la calzada casi al nivel de la a las aceras quitando casi toda la capacidad de evacuación de las aguas de lluvia a las cunetas y percibiendo el actual problema mundial de contaminación y tratando de reducir el impacto ambiental que produce la rehabilitación de un camino se propone la rehabilitación mediante el reciclado.

El sitio de aplicación es la ciudad de Tarija-Cercado, y realizando el reconocimiento del sitio se observa que hay puntos en la ciudad donde la carpeta no está dañada y otros puntos donde hay distintos tipos de fallas como piel de cocodrilo, fisuras transversales y longitudinales, baches y hasta fallas estructurales, haciendo que la técnica de reciclado sea aplicable tanto a carpetas dañadas como a carpetas que ya han cumplido su tiempo de vida útil y no tienen daños considerables.

#### **1.8.1.2. Criterios a Establecer**

##### **1.8.1.2.1. Muestreo**

Para el muestreo elegiremos tres puntos en la ciudad de recolección de carpeta asfáltica para reciclar, tratando de utilizar las empresas y/o instituciones que operan en nuestra ciudad con el objetivo que sea lo más representativa posible y teniendo en los puntos escogidos carpetas dañadas y carpetas si daños considerables.

##### **1.8.1.2.2. Caracterización**

La caracterización se realizara de los siguientes materiales:

- Material reciclado

- Emulsión asfáltica

Realizando tres ensayos por muestra para que sea más segura.

#### **1.8.1.2.3. Laboratorios**

Para los laboratorios se utilizará el manual de ensayos de suelos y materiales asfálticos de la ABC que es un manual Boliviano donde muchas normas son adoptadas de la AASHTON, por lo mismo cualquier ensayo que se requiera y no se encuentre en el manual de la ABC se acudirá a la norma AASHTON.

#### **1.8.1.3. Caracterización de Materiales**

##### **1.8.1.3.1. Material Reciclado**

- Método para determinar el contenido de ligante de mezcla asfáltica por centrifugación-ensayo de extracción.
- Método para análisis granulométrico de áridos provenientes de extracciones (AASHTON T30).
- Peso específico agregado grueso.
- Peso específico agregado fino.

##### **1.8.1.3.2. Emulsión Asfáltica**

- Método para determinar la viscosidad Saybolt (ASTM D 244).
- Método de residuo por destilación (ASTM D6997 AASHTO T59-97)
- Peso Específico.

##### **1.8.1.4. Ensayos Marshall en Mezclas Recicladas en Frio**

- Método de Diseño Marshall Modificado (AASHTO-AGC-ARTBA).

### **1.9. PROCEDIMIENTO PARA EL ANÁLISIS Y LA INTERPRETACIÓN DE LA INFORMACIÓN**

<b>TIPO DE ESTUDIO</b>	<b>TAMAÑO MINIMO DE MUESTRAS</b>
Descriptivo	30 casos por grupo o segmento de la muestra

## **1.10. ALCANCE**

### **1.10.1 CAPÍTULO I**

En el primer capítulo se presenta la situación actual de la Ciudad de Tarija dando a conocer nuevas técnicas de rehabilitación de vías, familiarizando y dando a conocer el uso del reciclado con emulsiones asfálticas que como se ha dicho anteriormente son poco usadas.

### **1.10.2. CAPÍTULO II**

En el capítulo segundo se muestra el marco teórico para tener todo el conocimiento sobre las emulsiones y el reciclado con las mismas, además de todas las normativas tanto para la caracterización de materiales como la dosificación.

### **1.10.3. CAPÍTULO III**

En el capítulo tres se da a conocer paso a paso la fabricación y el análisis de una mezcla asfáltica con emulsión y material reciclado mostrando las ventajas de la preparación en obra, asimismo se presenta el desarrollo de los ensayos y el proceso de dosificación.

### **1.10.4. CAPÍTULO VI**

Finalmente, se presenta las conclusiones generales y algunas recomendaciones resultantes de la investigación.

## **CAPITULO II: ESTADO DE CONOCIMIENTO SOBRE MEZCLAS RECICLADAS CON EMULSIÓN ASFÁLTICA**

### **2.1. INTRODUCCIÓN**

El pavimento de una carretera está sujeto a la acción continua del tráfico y de la meteorología. Estos dos factores, junto con el envejecimiento natural de los materiales, hacen que el firme sufra un proceso de progresivo deterioro. Este envejecimiento y deterioro del firme conlleva una disminución paulatina en los niveles de seguridad y confort del tráfico, que al sobrepasar ciertos valores hacen necesaria una operación de conservación.

La conservación de la red es en la actualidad un aspecto de gran importancia debido a los recursos que moviliza. El presupuesto necesario para el mantenimiento, así como los problemas ambientales que de él se derivan, justifican la búsqueda de nuevas técnicas que permitan reducir costos y sean respetuosas con el medio. En este contexto, el reciclado de firmes, como medio de racionalizar los recursos, toma un renovado protagonismo y se convierte en una necesidad.

La creciente sensibilización social acerca de la necesidad de preservar el medio ambiente ha hecho que la legislación sea hoy mucho más proteccionista que en el pasado. Esto dificulta la obtención de materias primas adecuadas, aumentando su costo y el de su transporte hasta la obra, ya que casi nunca se producen en el lugar donde se necesitan. De igual manera, es creciente la dificultad para encontrar un vertedero para los materiales retirados del firme a precio razonable. Estos problemas son especialmente ciertos en ámbitos urbanos.

El desecho de los materiales envejecidos del firme, además de provocar problemas relacionados con la adquisición de nuevas materias y con su vertido, resulta contraproducente desde el punto de vista técnico, ya que pese a estar envejecidos, conservan buena parte de sus cualidades. El fresado y reutilización del conglomerado asfáltico comporta un gran ahorro, ya que requiere sólo de un 1% a un 4% de betún o

emulsión adicional, mientras que un nuevo hormigón asfáltico puede necesitar más del 6%. Este aspecto, junto con el reducido costo de transporte y la escasa energía necesaria para la producción de un firme reciclado, hacen que el ahorro energético sea importante respecto de la construcción convencional de pavimentos.

## **2.2. EMULSIÓN ASFÁLTICA**

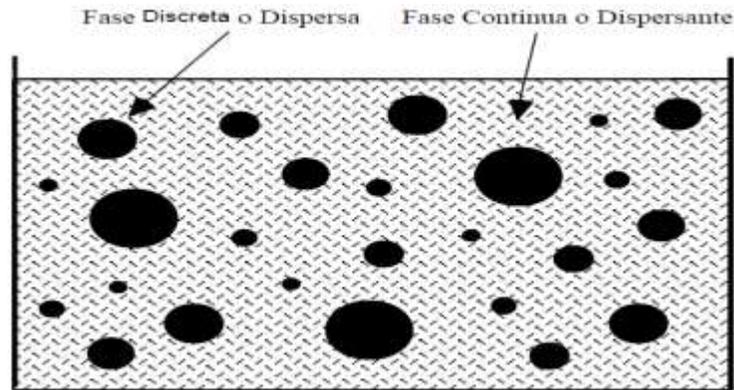
Una emulsión asfáltica consiste en una dispersión de finas gotas de asfalto, estabilizadas en una fase acuosa, los cuales son no miscibles entre sí y están unidos por la presencia de un agente emulsificante, emulsionante o emulgente, obteniéndose un producto relativamente fluido, básicamente una emulsión asfáltica consiste de tres ingredientes básicos; asfalto, agua y un agente emulsivo. En algunas ocasiones, la emulsión puede contener otros aditivos, como estabilizantes, mejoradores de recubrimiento, mejoradores de adherencia, o agentes de control de rotura.

Es bien sabido que el agua y el asfalto no se mezclan, excepto en condiciones cuidadosamente controladas, utilizando equipos de alta especialización y aditivos químicos. Mezclar agua y asfalto es una tarea similar a la del mecánico que intenta lavar, solo con agua, sus manos engrasadas. Solo con detergente o con agente jabonoso la grasa puede ser exitosamente removida. Las partículas de jabón rodean a los glóbulos de grasa, rompen la tensión superficial que los mantiene unidos, y permiten que sean eliminados.

Algunos de los mismos principios físicos y químicos se aplican a la formulación, producción y uso de emulsiones asfálticas. El objetivo es lograr una dispersión estable del cemento asfáltico en el agua, suficientemente estable para ser bombeada, almacenada durante tiempo prolongado, y mezcladas. Más aun, la emulsión deberá romper rápidamente tras entrar en contacto con el agregado en un mezclador, o tras ser distribuida sobre la cancha, rotura es la separación del agua del asfalto. Al curar, el residuo asfáltico conserva toda la capacidad adhesiva, la durabilidad y la resistencia al agua propias del cemento asfáltico con el cual fue elaborado.

Las emulsiones son sistemas formados por dos fases parcial o totalmente inmiscibles, en donde una forma la llamada fase continua (o dispersante) y la otra la fase discreta (o dispersa). Esto puede apreciarse en la Figura 1, en donde se muestra un dibujo esquemático de una emulsión.

**Figura 1. Diagrama esquemático de una emulsión**



*Fuente:* Emulsiones asfálticas, Rogelio Rodríguez Talavera, Víctor Manuel Castaño Meneses, Miguel Martínez Madrid, Documento Técnico No. 23 Sanfandila, Qro, 2001

A partir de estas fases tenemos que mencionar que existen dos tipos de emulsión según la concentración de cada una de esas fases:

- Las emulsiones directas: son aquellas en las que la fase hidrocarbonada está dispersa en la parte acuosa.
- Las emulsiones inversas: son aquellas en las que la fase acuosa está dispersa en la fase hidrocarbonada.

Las emulsiones que utilizamos en la industria de las carreteras son las directas. Y es preferible su utilización debido a su baja viscosidad a temperatura ambiente.

### **2.2.1. COMPONENTES DE LA EMULSIÓN**

Para comprender porque las emulsiones asfálticas funcionan como funcionan, es esencial examinar el papel de los tres principales constituyentes asfalto, agua y emulsivo.

### **2.2.1.1. Asfalto**

El cemento asfáltico es el elemento básico de la emulsión asfáltica y, en la mayoría de los casos, constituye entre un 50 y un 75 % de la emulsión. La química del asfalto es una materia compleja, y no es necesario, para el caso, examinar todas las propiedades del cemento asfáltico. Algunas propiedades del cemento asfáltico sí afectan significativamente la emulsión final. Sin embargo, no hay una correlación exacta entre las propiedades del asfalto y la facilidad con que el asfalto puede ser emulsionado. Si bien la dureza de la base del cemento asfáltico puede variar, la mayoría de las emulsiones es hecha con asfaltos con un rango de penetración 60-250. En ocasiones, las condiciones climáticas pueden requerir una base asfáltica más dura o más blanda. En cualquier caso, la compatibilidad química entre el agente emulsivo y el cemento asfáltico es esencial para la producción de una emulsión estable.

La compleja interacción de las diferentes moléculas hace casi imposible predecir con precisión el comportamiento de un asfalto que será emulsificado. Por esta razón, sobre la producción de emulsiones asfálticas se realizan constantemente controles de calidad. Cada fabricante de emulsiones tiene sus propias formulaciones y técnicas de producción. Ellas han sido desarrolladas para alcanzar óptimos resultados con el cemento asfáltico y los químicos emulsivos empleados.

### **2.2.1.2. Agua**

El segundo componente en una emulsión asfáltica es el agua. Su contribución a las propiedades deseadas en el producto final no puede ser minimizada. El agua puede contener minerales u otros elementos que afectan la producción de emulsiones asfálticas estables. Consecuentemente, el agua potable puede no ser adecuada para las emulsiones asfálticas.

El agua encontrada en la naturaleza puede ser inadecuada debido a impurezas, sea en solución o en suspensión coloidal. Preocupa particularmente la presencia

de iones de calcio y de magnesio. Estos iones favorecen la formación de una emulsión catiónica estable. De hecho, frecuentemente se adiciona cloruro de calcio a las emulsiones catiónicas, con el objeto de aumentar la estabilidad durante el almacenamiento, estos mismos iones, sin embargo, pueden ser perjudiciales para emulsiones aniónicas.

Aguas que contienen partículas no deberían utilizarse en la elaboración de emulsiones. Dichas aguas pueden ser particularmente perjudiciales para las emulsiones catiónicas. Comúnmente, tales partículas están cargadas negativamente, y absorben rápidamente los agentes emulsivos, desestabilizando la emulsión. El uso de aguas impuras puede resultar en un desequilibrio en los componentes de la emulsión, lo que puede afectar en forma adversa la performance o causar una rotura prematura.

#### **2.2.1.3. Agentes Emulsivos**

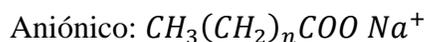
Las propiedades de las emulsiones asfálticas dependen en gran medida en los agentes químicos utilizados como emulsivos. El emulsivo es un agente tensioactivo o surfactante. El agente emulsivo mantiene las gotitas de asfalto en suspensión estable y controla el tiempo de rotura. Es también el factor determinante en la clasificación de las emulsiones como aniónicas, catiónicas o no-iónicas.

En la primera época de la elaboración de emulsiones asfálticas, se utilizaban como agentes emulsivos sangre de buey, arcillas y jabones. Al aumentar la demanda de emulsiones, se encontraron agentes emulsivos más eficaces. Muchos agentes emulsivos están ahora comercialmente disponibles. Los agentes emulsivos aniónicos más comunes son los ácidos grasos, que son productos derivados de la madera, como aceites (resinas, ligninas, etc.). Los emulsivos aniónicos son saponificados (convertidos en jabón) al reaccionar con hidróxido de sodio o hidróxido de potasio.

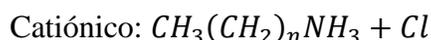
Los agentes emulsivos catiónicos, en su mayoría, son aminas grasas, por ejemplo, diaminas, imidazolininas y amidoaminas. Las aminas se convierten en jabón al reaccionar con un ácido, usualmente ácido clorhídrico. Otro tipo de agente emulsivo, las sales grasas cuaternarias de amonio, se emplea para producir emulsiones catiónicas, son sales solubles en agua, y no requieren la adición del ácido, son agentes emulsivos estables y efectivos.

Utilizando una definición general, los agentes químicos tensio-activos son sustancias solubles en agua, cuya presencia en la solución cambia marcadamente las propiedades del solvente y de las superficies con las que entran en contacto. Se clasifican por la forma en que se disocian o ionizan en agua. Básicamente, hay tres tipos de surfactantes que son clasificados según sus características de disociación en el agua:

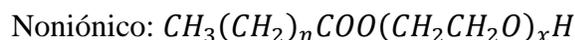
- Surfactantes aniónicos.- En los que el grupo polar electrovalente de hidrocarburos es parte del ion cargado negativamente, cuando el compuesto se ioniza:



- Surfactantes catiónicos.- En los que el grupo polar y electrovalente de hidrocarburos es parte del ion cargado positivamente cuando el compuesto se ioniza:



- Surfactantes no-iónicos.- En los que el grupo hidrofílico es covalente y polar; se disuelve sin ionización:



El agente emulsivo es, de los componentes individuales de la emulsión asfáltica, el más importante. Para ser un agente emulsivo eficaz, el surfactante debe ser soluble en agua. El agente emulsivo, empleado en combinación con un asfalto aceptable, agua de buena calidad y adecuados procedimientos mecánicos, es el factor principal en la emulsificación, la estabilidad de la emulsión y en la

performance de la aplicación final en el camino. Cada fabricante tiene su propio procedimiento para el empleo de surfactantes en la producción de emulsiones asfálticas. En la mayoría de los casos, el surfactante se combina con el agua con anterioridad a su incorporación al molino coloidal. Sin embargo, puede ser combinado con el cemento asfáltico inmediatamente antes de ingresar en el molino coloidal.

### **2.2.2. CLASIFICACIÓN DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS**

Las emulsiones asfálticas se clasifican en tres categorías: aniónica, catiónica, y no iónica. En la práctica, las dos primeras son las más ampliamente utilizadas en la construcción y mantenimiento de carreteras. Las no iónicas pueden ganar en importancia a medida que la tecnología de emulsiones avance. Las denominaciones aniónica y catiónica se refieren a las cargas eléctricas que rodean a las partículas de asfalto. Este sistema de identificación se basa en una ley de electricidad básica, las cargas iguales se repelen y las cargas opuestas se atraen.

Cuando una corriente eléctrica circula a través de un líquido en el que están sumergidos dos polos (un ánodo y un cátodo), el ánodo se carga positivamente y el cátodo se carga negativamente.

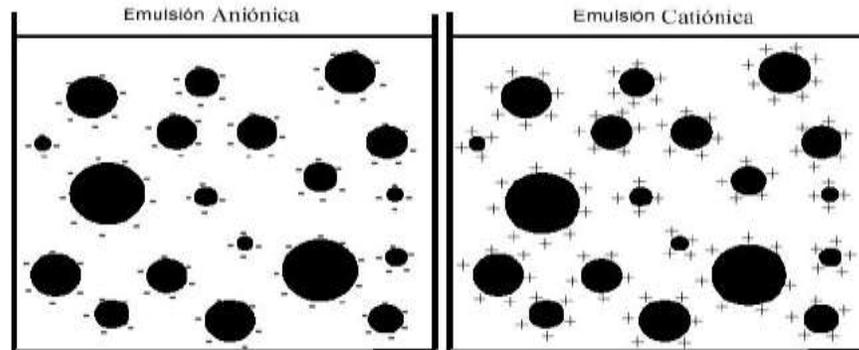
- **Emulsiones Aniónicas**

Si una corriente eléctrica pasa a través de una emulsión que contiene partículas de asfalto cargadas negativamente, estas migrarán al ánodo. De aquí en nombre de emulsión aniónica.

- **Emulsiones Catiónicas**

A la inversa, en el caso de emulsiones con partículas de asfalto cargadas positivamente, dichas partículas migrarán hacia el cátodo; se trata de una emulsión catiónica.

**Figura 2. Presentación Esquemática de una Emulsión Aniónica y Catiónica**



*Fuente:* “Guía Básica para el uso de Emulsiones asfálticas en la Estabilización de Bases en caminos de Baja Intensidad en el Salvador”, Wilfredo González Escobar, Mario Ernesto Jiménez Angulo, Ruby Javier López Cornejo

- **Emulsiones No Iónicas**

En el caso de emulsiones no iónicas, las partículas de asfalto son eléctricamente neutras y no emigran a polo alguno.

En una segunda clasificación de las emulsiones se considera una característica importante al caracterizar las emulsiones: la tasa de sedimentación, que cuantifica la rapidez con la cual coalescen las partículas suspendidas de asfalto o cuán rápido se rompe la emulsión por evaporación del agua, y que es afectada por el tipo y concentración de emulsificante, en tal sentido se emplean los términos; RS (rapid-setting, rotura rápida), MS (medium-setting, rotura media), SS (slow-setting, rotura lenta).

- **Emulsión RS (rapid-setting, rotura rápida).**

Las emulsiones de Rotura Rápida (RS) se utilizan principalmente en tratamiento de superficies. Estas emulsiones interactúan rápidamente con el agregado, y revierten la emulsión a asfalto. Este tipo de emulsiones produce películas resistentes y algunos grados (RS-2 y CRS-2) tienen altas viscosidades, para

prevenir el escurrimiento, y que una vez formada la capa, ésta no se despegue con facilidad. Estas propiedades la hacen ideal para aplicaciones de rociado, tales como en bacheos, sellos arenosos y tratamientos superficiales.

- **Emulsión MS (medium-setting, rotura media).**

Las emulsiones de Rotura Media (MS) son diseñadas para ser mezcladas con agregados, ya sea en frío o en caliente, y también para el tratamiento de superficies. Estas emulsiones no se rompen inmediatamente al contacto con el agregado, y por esta razón, algunas pueden ser elaboradas en una planta y la mezcla resultante, transportada al lugar de la pavimentación. Las emulsiones MS han sido usadas con éxito en mezclas de emulsiones de grado abierto, en reciclado de pavimentos y en mezclas en frío en plantas centrales.

Las emulsiones HF (High Float = de alta flotación) es una clase especial de emulsión aniónica de rotura media, tienen una calidad específica que permite una densa película asfáltica sobre el agregado, sin riesgo de escurrimiento.

Esta película gruesa asegura un mejor cubrimiento del agregado y baja susceptibilidad a la humedad. Las emulsiones HF crean una estructura de gel en el asfalto residual, que reduce la susceptibilidad a la temperatura del producto final. Estas presentan una espesa película de asfalto para mantener alta rigidez en un clima caliente y menor rigidez (más elástico) en climas fríos. Las HF son buenas para sellos baratos (bacheos) donde el cubrimiento del agregado es completo. En las emulsiones HF modificadas con polímeros, el rendimiento de las emulsiones HF es incrementado. El asfalto residual de estas emulsiones provee una mezcla con alta fuerza adherente, además de una buena capacidad para soportar cargas al ser el pavimento un poco más flexible.

- **Emulsión SS (slow-setting, rotura lenta).**

Las emulsiones de Rotura Lenta (SS) son diseñadas para un tiempo máximo de mezcla con los agregados. Su largo tiempo para la manipulación asegura buen cubrimiento con grados densos, de agregados con un alto contenido de finos. Su aplicación se extiende, además de la pavimentación, a otros usos industriales.

Para tales propósitos, la viscosidad de las emulsiones es baja y puede ser reducida aún más con la adición de agua. Si se desea aumentar la velocidad de rotura, puede ser añadido un pequeño porcentaje de cemento Portland o cal hidratada, durante la producción de la mezcla. Otras aplicaciones de estas emulsiones incluyen bases de grado denso y bases para estabilización. Una aplicación diferente a la pavimentación ha sido en el tratamiento de suelos que han sido sembrados y fertilizados. El asfalto forma una película delgada que retiene las semillas en su lugar, absorbe y conserva el calor solar requerido para la germinación.

Las emulsiones modificadas con polímeros (Polymer Modified Grades) son superiores a las de grado convencional, debido a la adición de un polímero. La base asfáltica en estas emulsiones es más adhesiva y elástica que los cementos asfálticos convencionales. Se obtienen buenos resultados en tratamientos de superficies con menos pérdida de agregados, y mejora la resistencia al corrimiento y al agrietamiento a bajas temperaturas. Con respecto a la nomenclatura para la identificación de las emulsiones, como se dijo anteriormente se utiliza el prefijo C en las emulsiones de tipo catiónicas, por ejemplo CSS y CRS representan emulsiones catiónicas de sedimentación lenta y rápida, respectivamente. Cuando no aparece la letra C se asume que la emulsión es del tipo aniónica o no-iónica. Este sistema también incluye la clasificación de la emulsión de acuerdo al grado de viscosidad que posea. De esta manera, se utilizan los sufijos 1 y 2 para designar a emulsiones cuyas viscosidades Saybolt Furol, a 122 °F, se encuentran en los rangos 20-100 y 100-400 s, respectivamente. Cuando se ha utilizado un asfalto duro (penetración de 40-50 a 77 °F) en la manufactura de la emulsión, se suele colocar la letra h como sufijo. Cuando no aparece la letra h se sobreentiende que se ha utilizado un asfalto con penetración entre 100-200. Por ejemplo, CSS-1h representa a una emulsión catiónica de sedimentación lenta con viscosidad entre 20 y 100 s, en la que se ha utilizado un asfalto con penetración 40 a 90.

***Tabla 3. Especificaciones Normalizadas para Emulsiones***

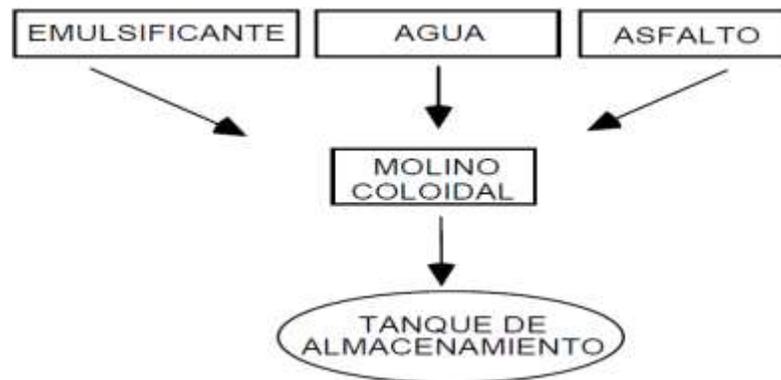
Emulsión Asfáltica (ASTM D977, AASHTO M140)	Emulsión Asfáltica Catiónica (ASTM D2397, AASHTO M208)
RS-1 (RR-1)	CRS-1 (CRR-1)
RS-2	CRS-2
HFRS-2	—
MS-1 (RM-1)	—
MS-2	CMS-2 (CRM-2)
MS-2h	CMS-2h
HFMS-1	—
HFMS-2	—
HFMS-2h	—
HFMS-2s	—
SS-1 (RL-1)	CSS-1 (CRL-1)
SS-1h	CSS-1h

*Fuente:* “Manual básico de emulsiones asfálticas”, manual N°19, AEMA, ASPHALT INSTITUTE

### 2.2.3. ESQUEMA DE PRODUCCIÓN

El equipo y producción para la fabricación de emulsiones es muy simple y fácil de conseguir en el mercado. El problema está en la formulación de las emulsiones que deben adaptarse a los materiales pétreos. Los requerimientos para la fabricación de las emulsiones asfálticas son sencillos, como se muestra en la Figura 4.

**Figura 3. Esquema para la Fabricación de la Emulsión Asfáltica**



*Fuente:* Emulsiones asfálticas, Rogelio Rodríguez Talavera, Víctor Manuel Castaño Meneses, Miguel Martínez Madrid, Documento Técnico No. 23 Sanfandila, Qro, 2001

La emulsión es el proceso mediante el cual se obtiene una emulsión a través de la agitación de una mezcla de agua, aceite y surfactante. Existen tres métodos generales para obtener emulsiones:

- Emulsificación física por ruptura de gotas.
- Emulsificación por inversión de fases.
- Emulsificación espontánea.

Los dos últimos métodos se pueden describir como procesos con basamento químico, ya que la naturaleza final de la emulsión es controlada principalmente por la química del sistema (naturaleza de los aditivos, temperatura, fracciones de las dos fases, etc.), mientras que el primer método, depende más de las propiedades reológicas y químicas de los componentes.

Existe una gran variedad de equipos o métodos mecánicos para hacer emulsiones, la tabla 2 muestra una lista de ellos, no obstante, la práctica de muchos de estos métodos son limitados y de poca importancia.

**Tabla 4. Métodos mecánicos utilizados en la emulsión**

Método	Energía Suministrada	Proceso	Formación de Gotas
Barrido	L	B	T
Mezclado:			
Simple	L	B,C	T,V
Rotor,	M-H	B,C	T,V
estator	L	B,C	T,V
Vibrador	L-M	B,C	V
Raspador			
Flujo por tubería:			
Laminar	L-M	C	V
Turbulento	L-M	C	T
Molino de coloides	M-H	C	V
Molino de bola	M	B,C	V
Homogenizador	H	B,C	T,V,CV
Ultrasonido	M-H	B,C	CV,T
Inyección	L	B,C	T,V
Eléctrico	M	B,C	-
Condensación	L-M	B,C	-

L = baja, M = mediana, H = alta, B = batch, C = continuo, T = turbulento, V = fuerzas viscosas en flujo laminar, CV = cavitación.

*Fuente:* Emulsiones Asfálticas Usos – Rompimientos, Ronald Mercado, Carlos Bracho, Jorge Avendaño, Cuaderno F.I.R.P. S365-A, Versión #1 (2008)

Generalmente la fabricación de emulsiones asfálticas se realiza en molinos de coloides (ver figura 6), especialmente si se utiliza un agente emulsionante del tipo catiónico. Las emulsiones hechas con emulsionantes aniónicas frecuentemente pueden fabricarse con equipos de menor energía suministrada, como los mezcladores simples.

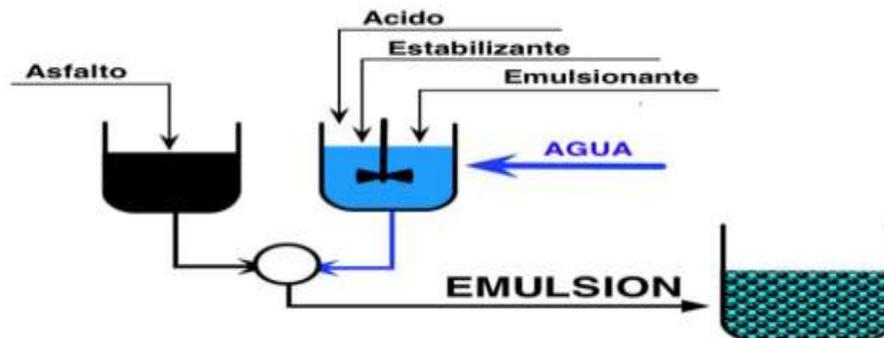
**Figura 4. Molino de Coloides**



*Fuente:* Emulsiones Asfálticas Usos – Rompimientos, Ronald Mercado, Carlos Bracho, Jorge Avendaño, Cuaderno F.I.R.P. S365-A, Versión #1 (2008)

El proceso llevado a cabo en un molino coloidal, consiste principalmente en introducir el asfalto caliente al molino, y al mismo tiempo se alimenta agua emulsionante a una temperatura apropiada (ver figura 7); el asfalto caliente asegura una baja viscosidad.

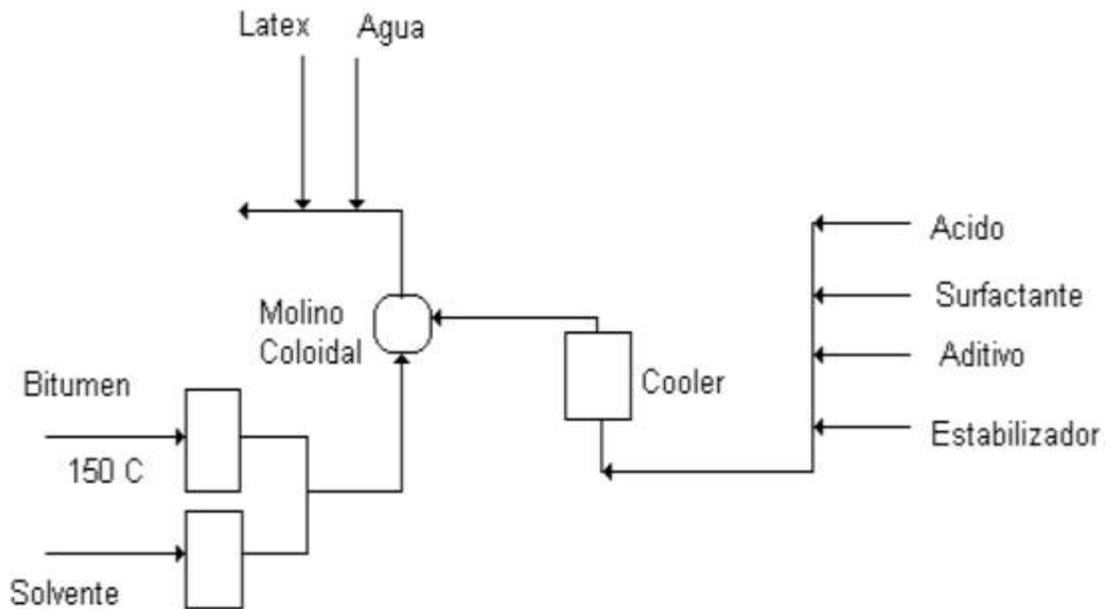
**Figura 5. Proceso industrial de emulsión**



*Fuente:* Emulsiones Asfálticas Usos – Rompimientos, Ronald Mercado, Carlos Bracho, Jorge Avendaño, Cuaderno F.I.R.P. S365-A, Versión #1 (2008)

El asfalto y el agua emulsionante, al pasar por el molino coloidal, se someten a intensas tensiones de cizallamiento, lo cual hace que el asfalto se divida en pequeñas gotas dentro del agua, dando lugar a la emulsión. La emulsión formada se bombea a través de un intercambiador de calor y el exceso de calor producido se utiliza para calentar el agua emulsionante antes de entrar al molino tal como se detalla en la figura 6 correspondiente a una planta típica de fabricación de emulsiones asfálticas.

**Figura 6. Esquema de una planta de fabricación de emulsiones asfálticas**



*Fuente:* Emulsiones Asfálticas Usos – Rompimientos, Ronald Mercado, Carlos Bracho, Jorge Avendaño, Cuaderno F.I.R.P. S365-A, Versión #1 (2008)

## 2.2.4. ROTURA Y CURADO

### 2.2.4.1. Rotura

Para que la emulsión asfáltica cumpla su objetivo final, esto es, actúe como ligante, el agua debe separarse de la fase asfáltica y evaporarse, esta separación se denomina rotura.

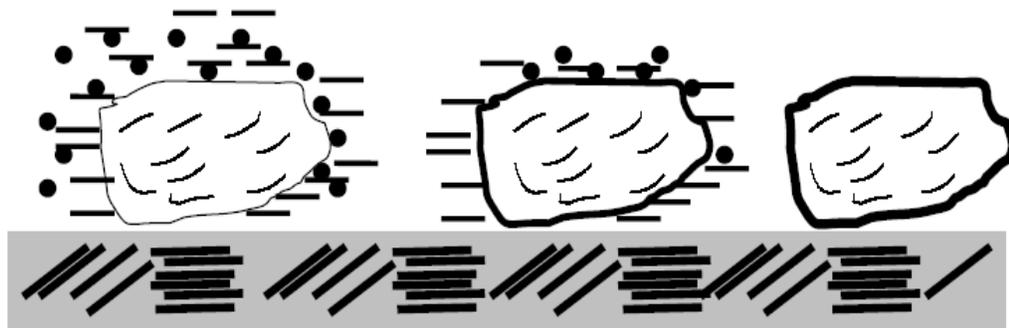
El tiempo de ruptura de una emulsión asfáltica está controlado principalmente por el tipo y cantidad de surfactante utilizado, además del tipo de agregado

utilizado para su rompimiento, su composición química y granulométrica, la temperatura y las condiciones climáticas donde se aplique.

De manera general, el tiempo de ruptura en las emulsiones catiónicas es más breve que las aniónicas, y puede ser utilizada a más baja temperatura. Las emulsiones aniónicas son utilizadas en el caso de que el agregado utilizado sea extremadamente electropositivo.

El tiempo de ruptura puede acelerarse por medios mecánicos como el uso de rodillos vibrantes. Mientras más porcentajes de finos tengan los áridos usados para la ruptura, el proceso de ruptura es acelerado debido a la alta superficie específica cargada eléctricamente.

**Figura 7. Ruptura de una Emulsión Asfáltica sobre un Material Pétreo**



*Fuente:* Emulsiones asfálticas, Rogelio Rodríguez Talavera, Víctor Manuel Castaño Meneses, Miguel Martínez Madrid, Documento Técnico No. 23 Sanfandila, Qro, 2001

#### **2.2.4.1.1. Rompimiento de emulsiones asfálticas aniónicas**

Los agentes tensoactivos empleados son normalmente jabones, resinas de ácidos grasos, etc. Se produce una gota de asfalto con una carga eléctrica superficial negativa, lo cual implica potenciales problemas de adherencia sobre los áridos ácidos o silíceos como el granito o las cuarcitas.

Estas emulsiones no rompen con el uso de áridos cargados negativamente sino solo hasta que el agua de la emulsión se haya evaporado. El uso de emulsiones

asfálticas de tipo aniónicas, son utilizadas normalmente cuando el árido empleado para su ruptura está cargado positivamente. En estos casos, los fenómenos involucrados en su ruptura, son análogos a los que ocurren en el proceso de ruptura de emulsiones catiónicas con agregados negativos. Sin embargo, estos áridos no son comúnmente utilizados debido a su disponibilidad.

#### **2.2.4.1.2. Rompimiento de emulsiones asfálticas catiónicas**

Los surfactantes utilizados para su fabricación son amonios cuaternarios o aminas. Estos compuestos le confieren a la gota de asfalto una carga eléctrica positiva.

Las emulsiones catiónicas rompen por adsorción del agente emulsionante sobre la superficie del agregado.

#### **2.2.4.1.3. Rompimiento de emulsiones asfálticas no iónicas**

Los surfactantes utilizados para fabricarlas son nonilfenoles etoxilados con un alto número de óxido de etileno. Este tipo de emulsiones no son muy estables, ya que las gotas carecen de carga eléctrica que impida su unión y posterior floculación. Este tipo de emulsiones son entonces de rápida ruptura y el rompimiento se debe netamente a la floculación de las gotas y evaporación del agua de la emulsión, es decir que se puede aumentar su velocidad de ruptura con el aumento de la temperatura.

#### **2.2.4.2. Curado**

El curado involucra el desarrollo de las propiedades mecánicas del cemento asfáltico. El resultado final es una película cohesiva continua que mantiene a los agregados con una fuerte unión de carácter adhesivo. Para que esto suceda, el agua debe evaporarse completamente, y las partículas de la emulsión asfáltica tienen que coalescer y unirse al agregado. El agua se elimina por evaporación, por la aplicación de presión (rodillado), y por absorción por el agregado. La evaporación del agua puede ser bastante rápida bajo condiciones climáticas

favorables, pero excesiva humedad, bajas temperaturas, o lluvias inmediatamente después de la aplicación pueden demorar un curado apropiado.

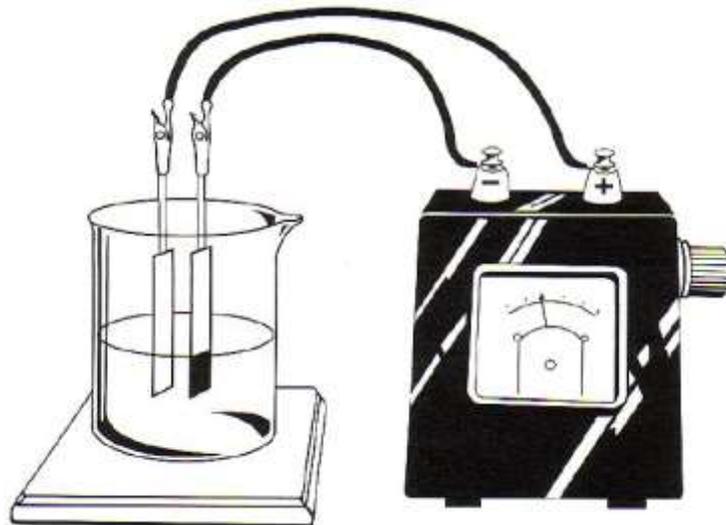
### 2.2.5. ENSAYOS CLÁSICOS DE EMULSIÓN

Estas pruebas se aplican para el control de calidad tanto en su fabricación como en su aplicación.

#### 2.2.5.1. Ensayo de Carga de las Partículas

El ensayo de carga de las partículas es utilizado para identificar emulsiones catiónicas. Para su realización, se sumergen, en una muestra de la emulsión, un electrodo positivo (ánodo) y un electrodo negativo (cátodo); se conectan ambos a una fuente eléctrica de corriente continua controlada (Ver Figura 8). Finalizando el ensayo, se observan los electrodos para determinar si en el cátodo se ha depositado una apreciable capa de asfalto. De ser así, se trata de una emulsión catiónica.

**Figura 8. Ensayo de Carga de Partículas**

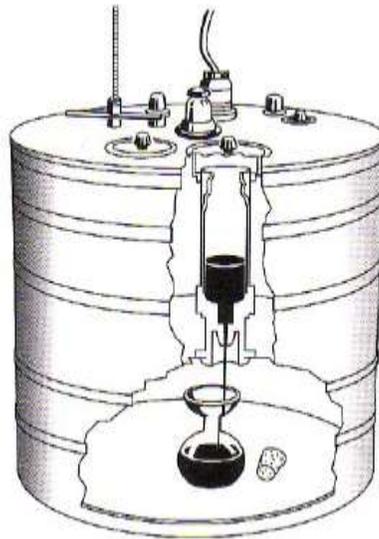


*Fuente:* “Manual básico de emulsiones asfálticas”, manual N°19, AEMA, ASPHALT INSTITUTE

### 2.2.5.2. Viscosidad de la Emulsión

La viscosidad es definida como la resistencia de un fluido a fluir. Para emulsiones asfálticas, el ensayo de viscosidad Saybolt Furol (Figura 9) es utilizado como una medida de la viscosidad. Los resultados se expresan en segundos Saybolt Furol. Dependiendo del tipo de emulsión. El ensayo se realiza a una de dos temperaturas, 25°C (77°F) o 50°C (122°F).

**Figura 9. Ensayo de Viscosidad Saybolt Furol**



*Fuente:* “Manual básico de emulsiones asfálticas”, manual N°19, AEMA, ASPHALT INSTITUTE

### 2.2.5.3. Ensayo de Desemulsión

El ensayo de desemulsión indica la velocidad relativa a la que los glóbulos de asfalto coloidales de una emulsión asfáltica de rotura rápida, romperán cuando se extienden en finas películas sobre suelo o agregado. El cloruro de calcio provoca la coalescencia de los minúsculos glóbulos de asfalto presentes en una emulsión asfáltica aniónica. Se mezcla completamente una solución de cloruro de calcio y agua con una emulsión de rotura rápida: la mezcla se vierte a través un tamiz para determinar el grado de coalescencia de los glóbulos de asfalto. Las

especificaciones prescriben la concentración de la solución y la mínima cantidad de asfalto a ser retenida por el tamiz (usualmente, el 60%). Es de esperar que las emulsiones de rotura rápida rompan casi inmediatamente luego de entrar en contacto con el agregado, como en el caso de los tratamientos superficiales. Un ensayo similar se realiza sobre emulsiones catiónicas de rotura rápida. Sin embargo, aquí se prefiere una solución de dioctyl-sulsuccinato de sodio a la solución de cloruro de calcio.

#### **2.2.5.4. Ensayo de Identificación de Emulsiones Catiónicas de Ruptura Rápida**

Este es un ensayo recientemente normalizado (ASTM D 244) que ha reemplazado al ensayo de clasificación. Al igual éste, consiste en el recubrimiento de arena silícea. En este nuevo ensayo, la arena es primero lavada con ácido clorhídrico y alcohol isopropílico, pero, a diferencia del ensayo de clasificación, no se emplea cemento Portland. La emulsión se mezcla con la arena durante dos minutos. Al finalizar el lapso de mezclado, un exceso en el área sin recubrir comparada con el área recubierta es considerado evidencia de que se trata de una emulsión catiónica de rotura rápida.

#### **2.2.5.5. Identificación de Emulsiones Catiónicas De Ruptura Lenta**

Este es también un ensayo relativamente nuevo (ASTM D 244), que se emplea si el resultado del ensayo de carga de las partículas no es concluyente. Se lava y luego se seca una determinada cantidad de arena silícea; se la mezcla con una determinada cantidad de emulsión catiónica de rotura lenta, hasta que los agregados estén completamente recubiertos. La cantidad de emulsión en la mezcla debe ser el 5% del peso total de arena. La mezcla se cura durante 24 horas y luego se la coloca en un vaso de precipitado con agua destilada hirviendo. Luego de 10 minutos, la muestra se coloca sobre una superficie plana y se observa el recubrimiento. Si el recubrimiento supera el 50%, de la mezcla total, se considera evidencia de que se trata de una emulsión catiónica de rotura lenta.

#### **2.2.5.6. Ensayos de Sedimentación Y de Estabilidad Para Almacenamiento**

Estos ensayos ponen de manifiesto la estabilidad de la emulsión durante el almacenamiento. Ellos detectan la tendencia de los glóbulos de asfalto a sedimentar a lo largo de un período de tiempo. Un dado volumen de emulsión se deja reposar en una probeta graduada durante un lapso especificado (cinco días para el ensayo de sedimentación y 24 horas para el ensayo de estabilidad para almacenamiento), Luego se toman muestras del fondo y de la superficie de la probeta. Cada muestra se coloca en un vaso de precipitado y es pesada y calentada hasta evaporar el agua. Luego se pesa el residuo. Los pesos obtenidos se utilizan para hallar la diferencia, si la hay, entre los contenidos de residuo asfáltico de las fracciones superior e inferior de la probeta. Dicha diferencia es una medida de la sedimentación. Muchas agencias (vialidades estatales) aceptan el ensayo de 24 horas de duración; otras exigen el ensayo de cinco días.

#### **2.2.5.7. Ensayo de Mezcla con Cemento**

El ensayo de mezcla con cemento representa para las emulsiones asfálticas de rotura lenta lo que el ensayo de desemulsión para las emulsiones de rotura rápida. En la obra, las emulsiones de rotura lenta son a menudo mezcladas con materiales finos y agregados con polvo. En este ensayo, una muestra de emulsión asfáltica se mezcla con cemento Portland finamente molido; la mezcla se lava sobre un tamiz de 1.40 mm de abertura (No 14). Las especificaciones limitan la cantidad de material retenido en el tamiz. El resultado del ensayo indica la capacidad de una emulsión asfáltica de rotura lenta para mezclarse, Sin romper, con un material de alta superficie específica.

#### **2.2.5.8. Ensayo de Tamiz**

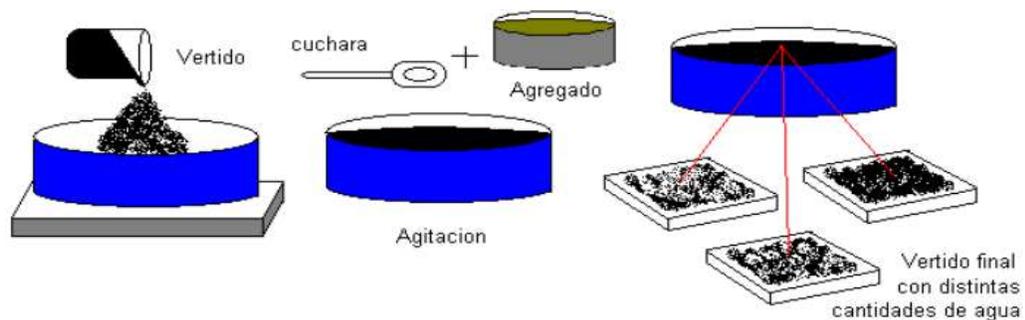
El ensayo de tamiz es otra forma de medir la calidad y la estabilidad de la emulsión. La retención de una excesiva cantidad de partículas de asfalto sobre un tamiz indica que puede haber problemas en la manipulación y aplicación del material. En este ensayo, una muestra representativa de emulsión asfáltica es

vertida a través de un tamiz de 850 mm (No 20). En el caso de emulsiones aniónicas, el tamiz y el asfalto retenido son lavados primero con una solución débil de oleato de sodio y luego con agua destilada. Para emulsiones catiónicas, el lavado solo se hace con agua destilada. Luego del lavado, el tamiz y el asfalto se secan en estufa, determinándose el peso del asfalto retenido.

#### 2.2.5.9. Adhesividad

Esta prueba se realiza con el propósito de determinar la facilidad con la que una emulsión puede recubrir completamente un material determinado (agregado), soportar una acción de mezclado al permanecer como una película sobre el agregado, y resistir la acción del agua de lavado, después de completar el mezclado, ver figura 10. El ensayo, útil en las emulsiones de rotura media y lenta, también permite determinar la estabilidad química de la emulsión, mediante la evaluación de la capacidad de cubrir uniformemente a un tipo de árido considerado, o a un árido que se desea ensayar en una determinada obra.

**Figura 10. Prueba de adhesividad e una emulsión asfáltica es sus distintas fases: vertido de la emulsión, inclusión del agregado y vertido final usando diferentes cantidades de agua de pre-mezclado**



*Fuente:* Emulsiones Asfálticas Usos – Rompimientos, Ronald Mercado, Carlos Bracho, Jorge Avendaño, Cuaderno F.I.R.P. S365-A, Versión #1 (2008)

#### 2.2.5.10. Ensayo de Recubrimiento en el Campo

Los ensayos de recubrimiento en el campo son realizados en el lugar del proyecto para determinar:

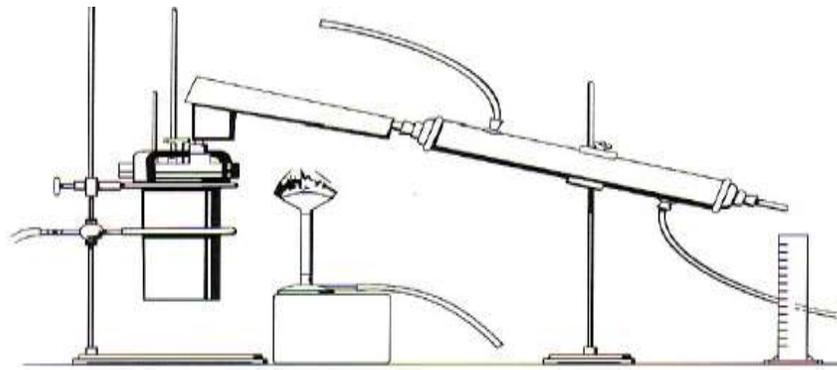
- La capacidad de una emulsión asfáltica para recubrir el agregado de la mezcla de diseño
- La capacidad de la emulsión para resistir los efectos del mezclado
- La resistencia al agua del agregado recubierto por la emulsión.

Se mezclan a mano cantidades dadas del agregado y de la emulsión de la mezcla de diseño. Se observa la capacidad del agregado a permanecer recubierto por la emulsión durante un ciclo de cinco minutos. La resistencia del recubrimiento al desprendimiento se determina llenado un recipiente con agua que contiene el material recubierto y vaciándolo cinco veces. Se examina visualmente y se califica el recubrimiento del agregado (bueno, regular o pobre). Una calificación de bueno significa que el material está completamente recubierto (excepto por orificios y bordes filosos). Una calificación de regular indica un predominio del área recubierta sobre el área descubierta. Una calificación de mala indica un exceso de área descubierta sobre el área recubierta.

#### **2.2.5.11. Residuo de Asfalto Y Destilado de Petróleo por Destilación**

Mediante la destilación se separa el agua del asfalto. Si el material contiene destilado de petróleo, este será separado junto con el agua. Las proporciones relativas de cemento asfáltico, agua y destilado de petróleo en la emulsión pueden medirse una vez que la destilación ha finalizado. Sobre el residuo de cemento asfáltico pueden realizarse ensayos adicionales, con el objeto de determinar las propiedades físicas del asfalto de uso final. En la destilación de emulsiones asfálticas se emplea un alambique de aleación de aluminio y quemadores de anillo (Ver figura 11) normalmente, se realiza la destilación a una temperatura de 260°C, durante 15 minutos. Debido a que la emulsión en la obra rara vez alcanza dicha temperatura, vale señalar que ciertas propiedades del residuo pueden ser alteradas, como por ejemplo las propiedades elásticas aportadas por la modificación del asfalto, con polímeros.

***Figura 11. Ensayo de Destilación para Emulsión Asfáltica***



*Fuente:* “Manual básico de emulsiones asfálticas”, manual N°19, AEMA, ASPHALT INSTITUTE

#### **2.2.5.12. Residuo por Evaporación**

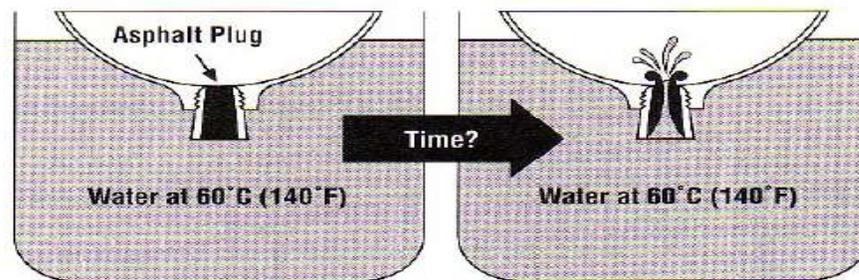
El ensayo de evaporación en estufa se lleva a cabo en una estufa a una temperatura de 163°C durante tres horas. Este ensayo puede realizarse en lugar del ensayo de destilación, pero usualmente los valores de penetración y de ductilidad del residuo son menores que los correspondientes al residuo del ensayo de destilación. Puede prescindirse del ensayo de evaporación si sobre el residuo se realizara el ensayo de flotación.

#### ***Figura 12. Determinación de residuo por evaporación de una emulsión asfáltica***



*Fuente:* Emulsiones Asfálticas Usos – Rompimientos, Ronald Mercado, Carlos Bracho, Jorge Avendaño, Cuaderno F.I.R.P. S365-A, Versión #1 (2008)

#### ***Figura 13. Ensayo de Flotación***

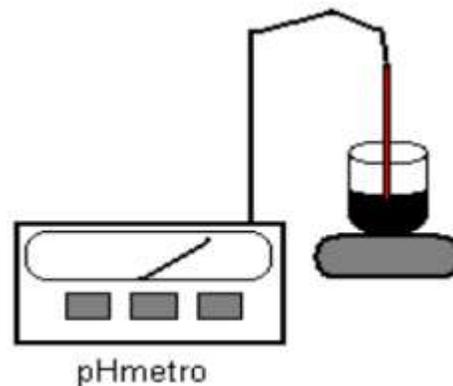


*Fuente:* “Manual básico de emulsiones asfálticas”, manual N°19, AEMA, ASPHALT INSTITUTE

### 2.2.5.13. Determinación del pH

Esta prueba permite verificar la acidez o alcalinidad de la solución acuosa del surfactante mediante un potenciómetro (ver figura 14). El pH de la emulsión es difícil de determinar, debido a que ésta se adhiere a las paredes de los electrodos del equipo de medición, y no se obtienen resultados exactos; sin embargo, se puede tener un valor aproximado, por cuanto el pH de las emulsiones varía entre 0.5 y 0.8 con respecto al pH de la solución acuosa.

**Figura 14. Determinación del pH de una emulsión asfáltica**



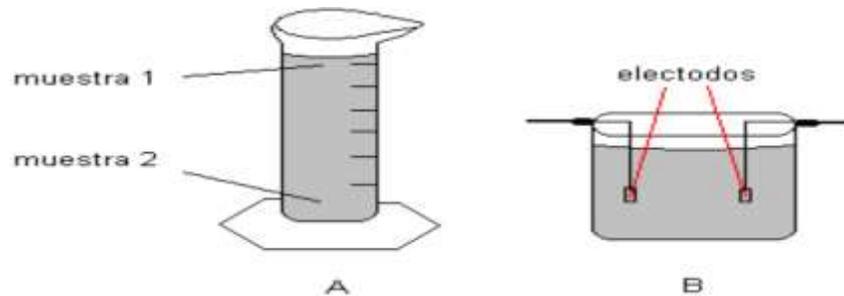
*Fuente:* Emulsiones Asfálticas Usos – Rompimientos, Ronald Mercado, Carlos Bracho, Jorge Avendaño, Cuaderno F.I.R.P. S365-A, Versión #1 (2008)

#### 2.2.5.14. Asentamiento

El objeto de la prueba es obtener un índice de la tendencia de las gotas de asfalto al sedimentarse durante el almacenamiento prolongado de la emulsión. El equipo típico utiliza dos cilindros de 500 ml de capacidad con tapón de corcho o vidrio, ver figura 15-A.

Se coloca en cada cilindro una muestra de 500 ml de emulsión y se dejan en reposo durante cierto tiempo a temperatura ambiente. Transcurrido ese tiempo, se destapan los cilindros y se toman 40 ml de la parte inferior y superior de cada uno, tratando de no alterar el resto de la muestra, y se examina el residuo asfáltico por evaporación. El asentamiento se reporta como la diferencia de los promedios porcentuales de asfalto de la parte inferior y superior. El valor máximo permisible de asentamiento es de 5% para cualquier tipo de emulsión.

**Figura 15. Equipos para determinación de (A) Asentamiento, (B) Carga eléctrica de una emulsión asfáltica**



*Fuente:* Emulsiones Asfálticas Usos – Rompimientos, Ronald Mercado, Carlos Bracho, Jorge Avendaño, Cuaderno F.I.R.P. S365-A, Versión #1 (2008)

#### 2.2.5.15. Diámetro de gota de la emulsión.

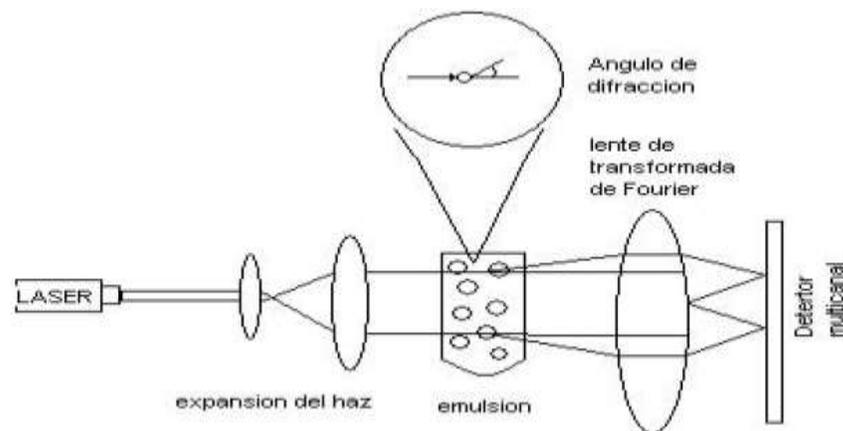
El tamaño de gota es un factor que tiene gran influencia, tanto en la viscosidad como en la estabilidad de una emulsión. Existen varios métodos de análisis de tamaño de gota, basados en diversos parámetros:

- Observación con un microscopio.

- Reflectancia, en el cual la intensidad de la coloración de una emulsión O/W, cuya fase interna contiene un colorante, decrece con el diámetro de gota.
- Turbidez, donde la cantidad de luz dispersada de un haz de luz monocromática que pasa a través de una emulsión mono-dispersa diluida es proporcional al cuadrado del diámetro de la gota y a una función llamada "coeficiente de dispersión".
- Métodos basados en el uso de un contador del tipo Coulter.
- Métodos que se basan en la difracción de un haz de luz coherente láser

De entre los citados, este último es el más preciso, aunque también el más costoso, ver figura 16.

**Figura 16. Equipo de medición de diámetro de gota**



*Fuente:* Emulsiones Asfálticas Usos – Rompimientos, Ronald Mercado, Carlos Bracho, Jorge Avendaño, Cuaderno F.I.R.P. S365-A, Versión #1 (2008)

#### 2.2.5.16. Índice de rotura

Este ensayo se basa en la actividad de una emulsión en presencia de materiales finos, y permite medir la velocidad de rotura de una emulsión en condiciones normalizadas, empleando un material de referencia que puede ser cemento Portland o polvo de sílice, según el tipo de emulsión a estudiar. En determinada

cantidad de emulsión se introduce el relleno a cierta velocidad (g/s) y con agitación constante para asegurar la homogeneidad, ver figura 17; el relleno se añade hasta la rotura de la emulsión, y el índice de rotura se expresa como una relación entre la cantidad de relleno añadido y la cantidad de emulsión ensayada.

**Figura 17. Medición del índice de rotura**



*Fuente:* Emulsiones Asfálticas Usos –  
Rompimientos, Ronald Mercado, Carlos Bracho,  
Jorge Avendaño, Cuaderno F.I.R.P. S365-A,  
Versión #1 (2008)

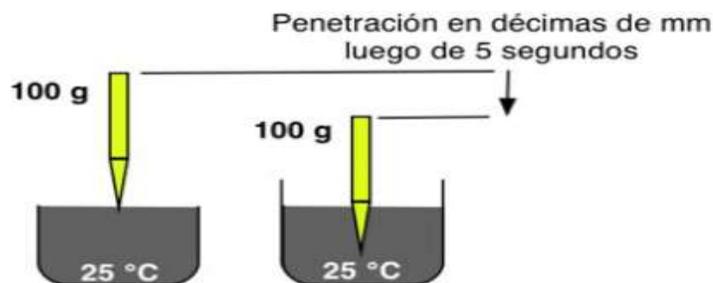
#### **2.2.5.17. Penetración**

Esta prueba se realiza al asfalto residual después de que se ha roto la emulsión, y se ha eliminado la fase acuosa. El procedimiento es similar al realizado al asfalto solo, antes de ser emulsificado (ver figura 18).

Existen además otros ensayos para las emulsiones asfálticas y para el residuo asfáltico:

- Demulsibilidad (A.S.T.M D 244 25/28).
- Miscibilidad con cemento Portland (A.S.T.M D 244 33/37).
- Miscibilidad con agua (A.S.T.M. D 244).
- Ductilidad del asfalto residual.

**Figura 18. Ensayo de penetración**



*Fuente:* Emulsiones Asfálticas Usos – Rompimientos, Ronald Mercado, Carlos Bracho, Jorge Avendaño, Cuaderno F.I.R.P. S365-A, Versión #1 (2008)

## 2.2.6. ESPECIFICACIONES

**Tabla 5. Especificaciones para emulsiones aniónicas**

TIPO DE ENSAYO	MS - 2		MS - 2h		HFMS - 2		HFMS - 2h		HFMS - 2s		SS - 1		SS - 1h	
	min	máx	min	máx	min	máx	min	máx	min	máx	min	máx	min	máx
<b>En la emulsión</b>														
Viscosidad Saybolt Furol a 25 °C (seg)	100	-	100	-	100	-	100	-	50	-	20	100	20	100
Porcentaje de estabilidad de almacenamiento en 24 h (%)	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1
Porcentaje de mezclado del cementante asfáltico (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.0	-	2.0
Porcentaje retenido en el tamiz (%)	-	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.10	-	0.10
Destilación Porcentaje de residuo (%)	65	-	65	-	65	-	65	-	65	-	57	-	57	-
<b>En el residuo</b>														
Penetración a 25 °C	100	200	40	90	100	200	40	90	200	-	100	200	40	90
Ductilidad a 25 °C (cm)	40	-	40	-	40	-	40	-	40	-	40	-	40	-
Porcentaje de solubilidad en tricloroetileno (%)	97.5	-	97.5	-	97.5	-	97.5	-	97.5	-	97.5	-	97.5	-
Flotamiento (s)	-	-	1200	-	-	-	1200	-	1200	-	-	-	-	-

*Fuente:* Tabla adaptada de AASHTO M 140 “Table 1: Requirements for emulsified asphalt”

**Tabla 6. Especificaciones para emulsiones catiónicas**

TIPO	Rotura Rápida				Rotura Media				Rotura Lenta			
	CRS-1		CRS-2		CMS-2		CMS-2h		CSS-1		CSS-1h	
	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
<b>PRUEBAS A LA EMULSION:</b>												
Viscosidad Saybolt Furol a 25°C, seg									20	100	20	100
Viscosidad Saybolt Furol a 50°C, seg	20	100	100	400	50	450	50	450				
Sedimentación*, 5 días, %		5		5		5		5		5		5
Estabilidad almacenamiento**, 24 h, %		1		1		1		1		1		1
Demulsibilidad***, 35 ml 0.8%, dioctilsulfosuccinato de sodio, %	40		40									
Tamizado, %		0.1		0.1	0.1	0.1		0.1		0.1		0.1
Mezcla con cemento, %										2		2
Destilación:												
Aceite destilado, por volumen de emulsión, %		3		3		12		12				
Residuo, %	60		65		65		65		57		57	
<b>PRUEBAS SOBRE EL RESIDUO DE LA DESTILACION:</b>												
Penetración, 25°C, 100 gr, 5 seg	100	250	100	250	100	250	40	90	100	250	40	90
Ductilidad, 25°C, 5 cm/min, cm	40		40		40		40		40		40	
Solubilidad en tricloroetileno, %	97.5		97.5		97.5		97.5		98		97.5	
<b>APLICACIONES TÍPICAS****</b>	Tratamiento superficial, macadam penetración, sello	Tratamiento superficial, macadam penetración, sello	Mezcla fría en planta, sello agregado queso	Mezcla fría en planta, mezcla caliente en planta, sello	Mezcla fría en planta, mezcla en vía, slurry seal, riego de liga, riego pulverizado, riego antipolvo.							

Fuente: Tabla adaptada de AASHTO M 208 "Table 1: Requirements and typical applications for cationic emulsified asphalt"

### 2.2.7. UTILIZACIÓN DE EMULSIONES ASFÁLTICAS

Cada grado de emulsión asfáltica ha sido diseñado para usos específicos, usado ampliamente en la construcción, la tabla 5 muestra los usos generales de tipos y grados normalizados de emulsiones asfálticas.

**Tabla 7. Uso Generales de las Emulsiones Asfálticas**

Tipo de Construcción	ASTM D977 AASHTO M208						ASTM D2397 AASHTO M 140								
	RS-1	RS-2	HFMS-2	MS-1, HFMS-1	MS-2, HFMS-2	MS-2h, HFMS-2h	HFMS-2s	SS-1	SS-1h	CRS-1	CRS-2	CMS-2	CMS-2h	CSS-1	CSS-1h
<b>Mezclas de Asfalto y Agregados:</b>															
Mezcla en Planta (en Caliente)						X <sup>A</sup>									
Mezcla en Planta (en Frío)															
Granulometría Abierta				X	X						X	X			
Granulometría Cerrada							X	X	X					X	X
Arena							X	X	X					X	X
<b>Mezclado In-situ</b>															
Granulometría Abierta				X	X						X	X			
Agregado bien Graduado							X	X	X					X	X
Arena							X	X	X					X	X
Suelo Arenoso							X	X	X					X	X
<b>Aplicaciones de Asfalto y Agregado</b>															
Tratamientos Superficiales (Simple y Múlti)	X	X	X							X	X				
SaSelado con Arena (Sand Seal)	X	X	X	X						X	X				
Lechada Asfáltica (Slurry Seal)							X	X	X					X	X
Micro-aglomerado (Micro-surfacing)															X <sup>E</sup>
Sellado Doble (Sandwich Seal)		X	X								X				
Cape Seal		X									X				
<b>Aplicaciones Asfálticas</b>															
Riego Pulverizado (Fog Seal)				X <sup>B</sup>				X <sup>D</sup>	X <sup>C</sup>					X <sup>E</sup>	X <sup>C</sup>
Imprimación (Prime Coat)					X <sup>B</sup>			X <sup>D</sup>	X <sup>D</sup>					X <sup>E</sup>	X <sup>C</sup>
Riego de Liga (Tack Coat)				X <sup>B</sup>				X <sup>D</sup>	X <sup>C</sup>					X <sup>E</sup>	X <sup>C</sup>
Paliativo de Polvo (Dust Palliative)								X <sup>D</sup>	X <sup>C</sup>					X <sup>E</sup>	X <sup>C</sup>
Protección con Asfalto (Mud treatment)								X <sup>D</sup>	X <sup>C</sup>					X <sup>E</sup>	X <sup>C</sup>
Sellado de Fisuras (Crack filler)								X	X					X	X
<b>Mezclas de Mantenimiento</b>															
Uso Inmediato							X				X	X			
Accipio							X								
<sup>A</sup> pueden emplearse otros grados que el HFMS-2h cuando la experiencia demuestre que han tenido un comportamiento satisfactorio <sup>B</sup> diluido en agua por el fabricante <sup>C</sup> diluido con agua <sup>D</sup> mezclado sólo para imprimación <sup>E</sup> el polímero debe incorporarse durante o previamente a la emulsificación															

Fuente: Manual básico de emulsiones asfálticas, manual N°19, AEMA, ASPHALT INSTITUTE

Como también estas se pueden usar para diversas aplicaciones dependiendo si contienen o no agregados.

### 2.2.7.1. Uso de emulsiones asfálticas sin agregados

Las emulsiones asfálticas se utilizan en distintas industrias: sellados, recubrimiento de cañerías, sellados de techos y azoteas, agricultura, fijación de médanos, pellets para deposición de residuos industriales y radiactivos, aislaciones, lagunas y reservorios de aguas o efluentes, impermeabilización de canales de riego y por supuesto trabajos viales.

#### 2.2.7.1.1. Riego

El riego consiste en la distribución, rociado uniforme de la emulsión asfáltica de manera tal que el mismo sea uniforme. Estos riegos no requieren la utilización de agregados. La forma más común de efectuar el riego de la emulsión asfáltica es utilizando un camión regador. Este regador debe estar provisto con una bomba para obtener un riego uniforme.

- **Riego de liga:** Es la aplicación de la emulsión asfáltica sobre un pavimento ya existente y se utiliza para obtener una buena adherencia con la nueva capa asfáltica a construir. La emulsión comúnmente usada para este trabajo es la emulsión de tipo catiónico de ruptura rápida. En algunos casos se utilizan emulsiones medias. El objetivo es lograr una capa fina y uniforme de emulsión la cual liberará el asfalto luego de romper. Es importante determinar la cantidad de emulsión a aplicar de acuerdo al estado de la carpeta existente. Esta cantidad será lo suficiente para lograr una adecuada adherencia entre las capas asfálticas evitando los excesos que podrían provocar exudación del asfalto. Una variante interesante y muy común en algunos países es la modificación de la emulsión con látex. Esto permite obtener una mejor adherencia entre las carpetas asfálticas, obtener una película asfáltica totalmente impermeable que tampoco permite el paso de cationes a través de ella (motivo de la aparición de ampollas en la superficie).
- **Riego de Curado:** Este riego se aplica sobre un agregado estabilizado con cemento o cal para evitar una evaporación excesiva y con esto

facilitar el fraguado. Las normas internacionales recomiendan la utilización de emulsiones de corte rápida para esta tarea. Este riego permite que el pavimento adquiera un color negro uniforme en toda su superficie, fijando cualquier material suelto (polvo) y sellando pequeñas fisuras.

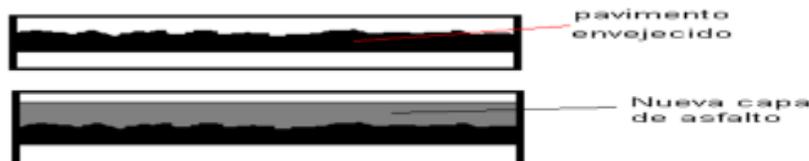
- **Riego Antipolvo:** Se realiza en caminos de tierra para fijar el material suelto de su superficie. El objetivo final es obtener una película delgada de asfalto a partir de riegos sucesivos efectuados con una emulsión muy diluida. En caminos de tierra, un automóvil produce 560 toneladas de polvo por Km. al año. Además, en estos caminos la tasa de accidentes es dos veces mayor que en otras calzadas.

#### 2.2.7.1.2. Tratamientos y sellado

En este caso, la emulsión se aplica sobre superficie de pavimentos envejecidos (ver figura 19) con el objeto de rejuvenecerla sellando pequeñas grietas y poros superficiales, o bien producir un puente de adherencia con una nueva carpeta asfáltica que la cubrirá.

También puede ser utilizada para sellar (impermeabilizar) la superficie de una carpeta nueva o de un tratamiento superficial de reciente confección.

**Figura 19. Tratamiento usando emulsión asfáltica**



*Fuente:* Emulsiones Asfálticas Usos – Rompimientos, Ronald Mercado, Carlos Bracho, Jorge Avendaño, Cuaderno F.I.R.P. S365-A, Versión #1 (2008)

## 2.2.7.2. Uso de emulsiones asfálticas con agregados

### 2.2.7.2.1. Tratamientos antifisuras

Las fisuras (ver figura 20) pueden clasificarse por la forma de agruparse, por sus características geométricas y por su origen. Su tratamiento puede hacerse mediante una emulsión asfáltica, esto retarda el nuevo inicio de las fisuras, aunque luego dependerá de la capa de aglomerado que pongamos sobre esta. Las lechadas asfálticas clásicas con emulsiones asfálticas se pueden modificar con la incorporación de fibras para poder incorporar una mayor cantidad del ligante.

**Figura 20. Fisuramiento de un pavimento**



*Fuente:* Emulsiones Asfálticas Usos – Rompimientos, Ronald Mercado, Carlos Bracho, Jorge Avendaño, Cuaderno F.I.R.P. S365-A, Versión #1 (2008)

En la actualidad se ha desarrollado un geotextil impregnado que sirve como elemento de retención absorbiendo una cantidad de ligante, mientras que el asfalto asegura la estanqueidad, facilita la unión entre las capas y disipa los movimientos horizontales entre los bordes de la fisura. Se utilizan emulsiones catiónicas modificadas.

### 2.2.7.2.2. Lechadas o Slurrys

Las lechadas asfálticas y los micropavimentos (microsurfacing) son técnicas modernas de tratamientos superficiales. Ambas se pueden usar para procedimientos preventivos o correctivos de la superficie del pavimento. Para aplicarlas comúnmente se utilizan equipos autopropulsados en los cuales se

realiza la mezcla de los componentes y su extendido aunque se pueden utilizar mezcladores comunes y extenderlas manualmente.

Las lechadas asfálticas son la combinación de un agregado denso con emulsión asfáltica, agua, filler mineral y aditivos (si son necesarios) la cual es aplicada en una fina capa para recubrir y proteger el pavimento. Es una mezcla rica en asfalto la cual se puede aplicar en rutas nacionales, provinciales, calles urbanas, aeropuertos, áreas de estacionamiento, caminos laterales, etc. Su espesor típico se encuentra entre 3 y 14 mm. Esta técnica se puede realizar sobre pavimentos nuevos o ya existentes, sobre asfalto o concretos, así como también sobre bases estabilizadas (por ejemplo suelo-arena-emulsión).

El principio de esta técnica consiste en obtener, por la combinación de todos los componentes, una mezcla con la consistencia de una lechada la cual es esparcida sobre el pavimento. Tan pronto como se realiza la mezcla un proceso químico comienza para culminar con el rompimiento de la emulsión y la cohesión de la mezcla. La combinación de un agregado adecuado con emulsión asfáltica permite optimizar esta técnica.

La velocidad de este proceso depende de la química del agregado y del filler, la formulación de la emulsión, el tipo y la concentración del aditivo y de la temperatura.

#### **2.2.7.2.3. Reciclados**

El reciclado en frío puede ser realizado mediante emulsiones asfálticas en planta o insitu. En planta, el reciclado se logra mediante el transporte del material recuperado de un pavimento existente a un depósito central, donde el material se trabaja con una unidad de procesamiento (como un mezclador continuo). In-situ, el reciclado se logra utilizando una máquina recicladora móvil.

#### 2.2.7.2.4. Mezclas asfálticas

Es la combinación de un árido con un ligante asfáltico, que en una película continua, envuelve todas y cada una de las partículas minerales del árido. Esta mezcla se utiliza en la construcción de pavimentos flexibles de alta calidad, ya sea como bases asfálticas o como carpetas de rodamiento.

Según sea el proceso utilizado para lograr el cubrimiento de los áridos por el ligante asfáltico, las mezclas asfálticas se dividen en:

- **Mezclas asfálticas en caliente:** Las mezclas asfálticas en caliente son mezclas agregado-asfalto que utilizan como material ligante un cemento asfáltico que no es fluido a temperatura ambiente, por tanto, requiere ser calentado a altas temperaturas hasta lograr disminuir su viscosidad a un valor requerido. En el proceso de elaboración es necesario calentar el agregado a temperaturas similares a las del ligante a fin de mantener la viscosidad y en ningún caso, la diferencia de temperatura entre el asfalto y los áridos debe ser mayor a 10 °C.
- **Mezclas asfálticas en frío:** Las mezclas asfálticas en frío se subdividen en dos grupos según el proceso utilizado para fluidificar el asfalto base. Las mezclas en frío con asfaltos rebajados, son la combinación árido-asfalto que utilizan como ligante un cemento asfáltico rebajado, también conocido como asfalto líquido. Este asfalto, como se ha explicado anteriormente, se obtiene mediante la adición al asfalto base, de solventes de su misma naturaleza (kerosén, nafta, gasoil). Las mezclas en frío con emulsiones asfálticas son mezclas árido-asfalto que utilizan como ligante el mismo cemento asfáltico empleado en las mezclas en caliente y en frío con asfalto rebajados, con la diferencia de que éste se encuentra emulsionado en un fase acuosa.

## **2.3. RECICLADO DE PAVIMENTOS**

Es el aprovechamiento máximo de sus recursos mediante su reutilización antes de su vertido y eliminación, todo ello con el objetivo de cuidar el medio ambiente, evitar la masificación de los vertederos y contribuir a la disminución en el uso de materias primas naturales.

El reciclado es una técnica de rehabilitación de carreteras que consiste en la reutilización de materiales procedentes de las capas que conforman el paquete estructural del pavimento que ya han estado en servicio: materiales que han perdido algunas de sus propiedades iniciales por el uso o envejecimiento pero que tienen el potencial de ser reutilizados para integrar nuevas capas.

### **2.3.1. IMPORTANCIA DEL PROCESO DE RECICLAJE DE CARPETA ASFÁLTICAS**

El desecho de los materiales envejecidos del firme, además de provocar problemas relacionados con la adquisición de nuevas materias y con su vertido, resulta contraproducente desde el punto de vista técnico, ya que pese a estar envejecidos, conservan buena parte de sus cualidades. El fresado y reutilización del conglomerado asfáltico comporta un gran ahorro, ya que requiere sólo de un 1% a un 3% de betún adicional, mientras que un nuevo hormigón asfáltico puede necesitar más del 6%. Este aspecto, junto con el reducido costo de transporte y la escasa energía necesaria para la producción de un firme reciclado, hacen que el ahorro energético sea importante respecto de la construcción convencional de pavimentos.

### **2.3.2. VENTAJAS DEL RECICLADO COMO TÉCNICA DE CONSERVACIÓN**

El Reciclado tiene una serie de ventajas respecto a las alternativas tradicionales de rehabilitación:

#### **2.3.2.1. Materiales**

- Ahorro en asfalto

- Ahorro en áridos

#### **2.3.2.2. Medio Ambiente**

- Reducción por concepto de escombros.
- Reducción en la explotación y transporte de nuevos materiales, especialmente asociados al recurso árido Reducción de la contaminación por varios efectos asociados a los sistemas constructivos y productivos, siendo los principales: reducción del ruido, reducción de la emisión de polvo
- Reducción del consumo energético, etc.

#### **2.3.2.3. Aspectos Constructivos**

- Se eliminan o corrigen las causas que dieron origen al deterioro
- Se puede mantener cota original del pavimento

#### **2.3.2.4. Aspectos Económicos**

- Es muy económico cuando se agregan los costos exógenos

### **2.3.3. MÉTODOS DE RECICLAJE DE CARPETA ASFÁLTICA**

#### **2.3.3.1. Reciclado en Caliente**

Se trata de una técnica aplicable a materiales bituminosos. El reciclado se puede realizar en planta, este procedimiento permite reciclar el conjunto o sólo una cierta proporción de material envejecido mediante una central asfáltica adaptada, al ser el porcentaje de material envejecido relativamente bajo, esta metodología permite corregir problemas graves de dosificación o calidad de los materiales, o in situ, con unos requisitos especiales en el reciclado en situ, provistos de calefactores, que elevan la temperatura de la superficie del firme y facilitan la disgregación del material. Existen 3 modos básicos de aplicar esta técnica:

- El termorreperfilado.
- La termorregeneracion.
- Termorreциclado.

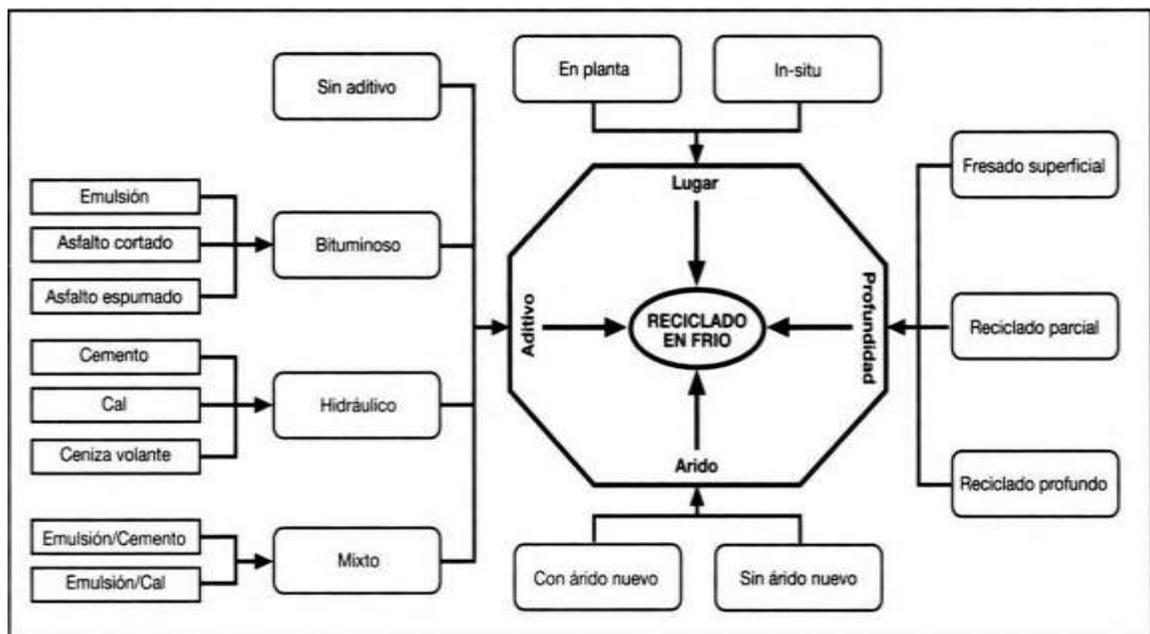
### 2.3.3.2. Reciclado en Frío

El reciclado en frío de pavimentos asfálticos, se define como el procesamiento y tratamiento con material bituminoso y/o aditivos químicos, de un pavimento asfáltico existente, sin aplicación de calor, para producir una capa de pavimento restaurado.

### 2.3.4. TIPOS DE RECICLADO EN FRÍO

Existen diferentes maneras de clasificar el reciclado en frío de pavimentos asfálticos. La figura 22, muestra un resumen de las combinaciones de elementos que pueden dar origen a variadas formas de reciclado.

**Figura 21. Etapas del reciclado y equipos usados**



*Fuente:* Revista Ingeniería de Construcción, Primera parte, Estudio de Técnicas de Reciclado en Frío, Guillermo Thenoux, Gabriel García, N° 20 Julio-Diciembre 1999.

Como se puede observar en la figura, el reciclado en frío puede ser realizado en planta o in-situ. En planta, el reciclado se logra mediante el transporte del material recuperado de un pavimento existente a un depósito central, donde el material se

trabaja con una unidad de procesamiento (como un mezclador continuo). In-situ, el reciclado se logra utilizando una máquina recicladora móvil.

### **2.3.5. RECICLADO EN FRÍO CON EMULSIONES**

#### **2.3.5.1. Reciclado “in situ”**

Esta técnica, permite reutilizar la totalidad de los materiales extraídos de la carpeta asfáltica envejecida en condiciones técnicas, económicas, sociales y ambientales muy favorables. El procedimiento usual y básico consiste fundamentalmente en las siguientes operaciones:

- Fresado en frío de un cierto grosor de la carpeta asfáltica.
- Mezclado del material obtenido con una proporción determinada de emulsión y otros aditivos.
- Extensión en obra de la nueva mezcla.
- Compactación energética.- Curado de la capa reciclada.
- Extensión de una capa delgada de rodadura a base de mezcla en caliente.

#### **2.3.5.2. Reciclado en planta**

Este procedimiento permite reciclar el conjunto o sólo una cierta proporción de material envejecido mediante una central asfáltica adaptada. Al ser el porcentaje de material envejecido relativamente bajo, esta metodología permite corregir problemas graves de dosificación o calidad de los materiales.

### **2.3.6. PROCESO DE DISEÑO RECICLADO EN FRÍO CON EMULSIÓN**

Análogamente al proceso de diseño de las mezclas asfálticas en caliente, en el caso de las mezclas recicladas también se compone de dos partes. La primera, relacionada con el diseño de la mezcla propiamente tal y que para este caso busca básicamente determinar la combinación de emulsión y RAP que le darán el mejor comportamiento a la mezcla como parte de la estructura de pavimento reciclado. La segunda, se refiere al diseño estructural y persigue determinar el espesor de la capa reciclada que mejor se comporte ante los tipos y volúmenes de carga previstos.

No existe en la actualidad un método de diseño de mezclas recicladas en frío con uso de emulsiones, mundialmente aceptado. No obstante, la mayoría de los métodos de diseño de mezclas recicladas que se están aplicando actualmente están basados en el método Marshall, pero con procedimientos diferentes de aquellos utilizados para el diseño de mezclas asfálticas en caliente.

El resumen las principales consideraciones a tener presente en la etapa de selección de un proyecto de reciclado en frío con emulsiones, se presenta en la Tabla 8.

**Tabla 8. Consideraciones para la selección del proyecto**

<b>EL RECICLADO EN FRÍO CON EMULSIONES :</b>
<b>NO ES RECOMENDADO</b>
Pavimentos con problemas evidentes en la subrasante
Áreas de trabajo que no puedan acomodar el volumen de tráfico
Pavimentos que exhiben ahuellamiento debido a mezclas exudadas e inestables
Condiciones atmosféricas muy frías y húmedas, incluyendo áreas con sombra permanente
Tratamientos al término del otoño o durante el invierno
Pavimentos menores a 50 mm de espesor
Cuando objetivo sea ensanchar calzada reduciendo espesor e incorporando material granular en la berma
<b>ES RECOMENDADO</b>
Pavimentos agrietados
Pavimentos con desprendimiento de áridos debido a envejecimiento
Pavimentos rugosos
Como nivelante y base para recarpeteos
Con TMD < 5.000, excepto en carreteras multicarril
Donde se requiera una rehabilitación selectiva (ej.: pista de camiones en carretera de 4 pistas)
Agregado de la zona es de pobre calidad o escaso

*Fuente:* Revista Ingeniería de Construcción Volumen 15 N°1, Estudios de Técnicas de Reciclado en Frío: Segunda Parte (Etapas de Proyecto de Reciclado en Frío con Emulsión), Enero Junio de 2000.

### **2.3.6.1. Diseño de la mezcla**

En la medida que el encargado de diseñar una mezcla reciclada se vaya familiarizando con el reciclado en frío y con el tipo y cantidades de aditivo que

mejor trabajan en sus pavimentos (normalmente dentro de un estrecho rango), será recomendable que para la determinación del contenido de emulsión se utilice tanto la experiencia como el diseño de laboratorio. Los contenidos de emulsión normalmente variarán entre 1 % y 3 % (cuando no se adiciona árido nuevo). Correspondiendo al límite superior, mezclas con altos porcentajes de agregado chancado y teniendo asfaltos muy envejecidos y en una cantidad relativamente baja. Por otra parte, en el límite inferior se tratará de mezclas de graduación fina con agregados redondeados que contienen un alto contenido de asfalto muy blando.

#### **2.3.6.2. Proceso constructivo**

Una apropiada selección y evaluación del proyecto y un diseño estructural y de la mezcla son fundamentales para tener éxito de un reciclado en frío.

No obstante, el proyecto aún puede fracasar si no se siguen los procedimientos constructivos adecuados. A continuación se expondrán resumidamente los aspectos más relevantes del proceso constructivo, que pueden servir de base para desarrollar las especificaciones, contratos o procedimientos de control de calidad adecuados.

##### **2.3.6.2.1. Fresado y procesamiento**

Una vez que el tren de reciclado está funcionando, se deben realizar una serie de chequeos en forma continua por parte de un supervisor experimentado, para asegurar que la operación está produciendo lo que se requiere. Es importante poner atención a algunos detalles, especialmente a los siguientes:

- La profundidad del fresado a ambos lados de la recicladora.
- Si la máquina recicladora está siguiendo la dirección correcta con el ancho de traslape preestablecido.
- Si el contenido de humedad del material tratado es suficiente para asegurar el adecuado recubrimiento del aditivo y la compactación. Un supervisor experimentado puede rápidamente darse cuenta de esto.

- El producto reciclado final está cumpliendo con lo esperado.

**Tabla 9. Gradaciones sugeridas para el reciclaje en frío**

Tamiz		Porcentaje que pasa						
		Gradación abierta			Gradación densa			
mm.	Plg.	A	B	C	D	E	F	G
28,3	1 1/2	100			100			
25	1	95-100	100		80-100			
19	3/4		90-100					
12,5	1/2	25-60		100		100	100	100
9,5	3/8		20-55	85-100				
4,5	Nº 4	0-10	0-10		25-85	75-100	75-100	75-100
2,36	Nº 8	0-5	0-5					
1,18	Nº 16			0-5				
0,3	Nº 50						15-30	
0,15	Nº 100							15-65
0,075	Nº 200	0-2	0-2	0-2	3-15	0-12	5-12	12-20

*Fuente:* Montejó Fonseca, Alfonso, “Ingeniería de pavimentos para carreteras”, 2002.

#### **2.3.6.2.2. Colocación**

El equipo y procedimiento de colocación (o extensión) son normalmente los mismos ya sea que se trate de un reciclado in-situ o en planta y básicamente son similares a aquellos utilizados en la pavimentación con mezclas asfálticas en caliente.

Las mezclas recicladas en frío son más rígidas que las mezclas asfálticas en caliente, por lo tanto, es más importante una apropiada operación de la pavimentadora para lograr una buena uniformidad y lisura de la capa reciclada. También, las mezclas recicladas en frío generalmente tienen mayores cantidades de material grueso que requieren cuidado en la colocación para evitar la segregación. La colocación de las mezclas recicladas en frío con emulsiones normalmente está limitada a un máximo espesor de capa de 100 mm, sin embargo se han colocado hasta 150 mm con adiciones de cenizas volantes.

#### **2.3.6.2.3. Curado**

Ya que se requiere agua para el mezclado y recubrimiento del agregado con emulsión, normalmente hay más agua presente en la mezcla que la requerida para la compactación. Por lo tanto, se requiere un período de secado o curado entre la colocación y la compactación para que se evapore el exceso de agua. En algunas ocasiones se puede especificar que se caliente el agua para facilitar la evaporación del exceso de agua y ayudar en el quiebre y curado de la emulsión, especialmente en condiciones climáticas frías.

El tiempo de retraso entre la colocación y el comienzo de la compactación depende de un número de factores que incluyen el tipo de aditivo o aditivos y la tasa de pérdida de humedad o evaporación. Al emplear emulsiones, la compactación inicial normalmente no comenzará hasta que la emulsión comience a quebrar o cambie desde un color café a uno negro.

Este período normalmente dura entre  $\frac{1}{2}$  y 2 horas dependiendo del tipo de emulsión, el espesor de la capa reciclada y las condiciones ambientales de temperatura, humedad y viento. Cuando se utilizan adiciones de cemento o cal junto con la emulsión, el tiempo para comenzar la compactación se reduce significativamente. Si la mezcla reciclada tiende a ondularse delante del compactador inicial o se agrieta, se debería prolongar el tiempo de curado.

#### **2.3.6.2.4. Compactación**

Los rodillos que normalmente se usan para la compactación son un rodillo neumático de 23 toneladas o más y un rodillo vibratorio tandem de 11 toneladas. Cuando se trata de una mezcla reciclada con emulsión, la compactación inicial puede realizarse con cualquiera de esos tipos de rodillos. Sin embargo, para mezclas rígidas colocadas en espesores de capa de 75 mm o mayores, la compactación inicial con rodillos neumáticos grandes pueden ser los más efectivos para alcanzar la densidad deseada. En mezclas finas y en capas de espesores del orden de 50 mm, si se utiliza un rodillo neumático para

la compactación inicial, se puede sellar la superficie y así evitar que la mezcla cure adecuadamente.

Cuando se usa rodillos vibratorios tandem, es importante asegurar que la compactación inicial se realice en el modo de vibración de alta amplitud/baja frecuencia para efectuar la compactación en la porción inferior de la capa.

#### **2.3.6.2.5. Apertura al tráfico**

El pavimento reciclado normalmente es abierto al tráfico para que continúe compactándose y curando por un período de 1 a 2 semanas dependiendo de la ubicación geográfica, condiciones atmosféricas, época del año en que el reciclado es realizado y el espesor de la capa reciclada. Normalmente, se especifica que este período dure hasta que se alcance un contenido de humedad del material reciclado inferior al 2 % y que la densidad alcanzada sea mínimo un 96 % de la densidad obtenida en laboratorio. La experiencia práctica indica que un buen indicador del cumplimiento de las condiciones anteriores sería cuando es posible extraer testigos intactos para ser ensayados.

#### **2.3.6.2.6. Recompactación**

Una vez que la capa reciclada ha perdido la suficiente humedad y ha curado apropiadamente, puede ser necesaria, aunque no siempre, una recompactación para homogeneizar la densificación entre las huellas de rodado y el resto del ancho reciclado.

#### **2.3.6.2.7. Carpeta de rodado**

La etapa constructiva final será la colocación de una carpeta de rodado o tratamiento superficial sobre el material reciclado. Esta carpeta de material nuevo puede ser un recapado de mezcla asfáltica en caliente (normalmente del orden de 50 mm), un recapado de mezcla en frío o un tratamiento superficial tal como un sello de agregados simple o doble.

La determinación de colocar un recapado o un tratamiento superficial, debe ser una decisión basada en las hipótesis consideradas en el diseño estructural.

La superficie debe ser limpiada por medio de un barrido, especialmente si el pavimento reciclado ha sido abierto al tráfico durante el período de curado. Si se ha decidido colocar un recapado, se debe aplicar sobre un riego de liga de emulsión diluida a una tasa similar a la recomendada para el sello tipo neblina con el objeto de lograr una buena adherencia.

### **2.3.6.3. Apertura al tráfico, seguimiento y evaluación**

Una vez colada la carpeta de rodado superficial, se procede a la apertura al tráfico en forma definitiva. Con el objeto de mantener una permanente retroalimentación acerca del comportamiento del pavimento, se deberían realizar evaluaciones periódicas y los resultados obtenidos usados para mejorar los proyectos futuros.

La mezcla reciclada en frío recién colocada puede tener poca resistencia aparente, pero con el curado adecuado se puede llegar a comportar en forma similar a una mezcla asfáltica en caliente. Puede llegar a tomar entre 6 y 12 meses (o a veces un poco más) antes de alcanzar su resistencia total.

La Tabla 3 resume aquellos problemas que con mayor frecuencia pueden encontrarse en esta etapa y la forma en que podrían ser solucionados.

### ***Tabla 10. Problemas más comunes en pavimentos reciclados en frío***

CAUSAS	SOLUCIONES	COMENTARIOS
<b>Ahuellamiento</b>		
-Demasiada emulsión -Sellado superficial durante colocación -Aplicación de carpeta de rodado muy pronto	-Diseño de mezcla apropiado -Limitar compactación vibratoria y evitar rodillos neumáticos hasta que mezcla sea estable -Permitir curado para reducir humedad a aprox. 2% (normalmente entre 1 y 2 semanas)	Ocurre dentro de primeros días luego de la construcción o durante tiempo caluroso en la estación siguiente al reciclado
<b>Desprendimiento de material</b>		
-Tiempo frío/zonas sombrías -Emulsiones de quiebre lento -Inadecuado control del tráfico -Emulsión insuficiente	-Precalentar agua de mezclado -Sello tipo neblina en áreas con problema -Usar autos piloto	Ocurre dentro de primeras horas después de apertura al tráfico
<b>Agrietamiento</b>		
-Naturaleza de la mezcla muy abierta -Acción hielo-deshielo cuando no hay sello -Insuficiente sección estructural -Emulsión inadecuada -Compactación demasiado pronto	-Se requiere un sello de arena o agregado fino en todo camino de tráfico bajo a medio -Usar mezcla de graduación abierta con emulsión o mezcla caliente en caminos de tráfico pesado -Permitir secado antes de compactar	Puede ocurrir durante el primer invierno si la superficie no está sellada y la mezcla está sujeta a muchos ciclos hielo-deshielo
<b>Fallas locales</b>		
-Base inadecuada -Subrasantes muy húmedas	-Identificar estas áreas antes de reciclar -Excavar, colocar nueva base y parchar antes del reciclado	Esto frecuentemente ocurre en carreteras de bajo volumen con poca capacidad de la base. Puesto que este tipo de reciclado tiene poca resistencia en las primeras 24 hrs, el tráfico pesado romperá la superficie reciclada

*Fuente:* Revista Ingeniería de Construcción Volumen 15 N°1, Estudios de Técnicas de Reciclado en Frío: Segunda Parte (Etapas de Proyecto de Reciclado en Frío con Emulsión), Enero Junio de 2000.

### 2.3.7. EQUIPOS ESPECÍFICOS PARA EL RECICLADO IN SITU EN FRÍO

El reciclado in situ en frío se puede llevar a cabo en principio con equipos muy diversos. Para cada una de las fases del proceso hay una o varias máquinas de uso múltiple a las que podemos recurrir. Sin embargo, existen unos equipos específicos, cada vez mejor adaptados, que realizan cuatro operaciones en una sola pasada:

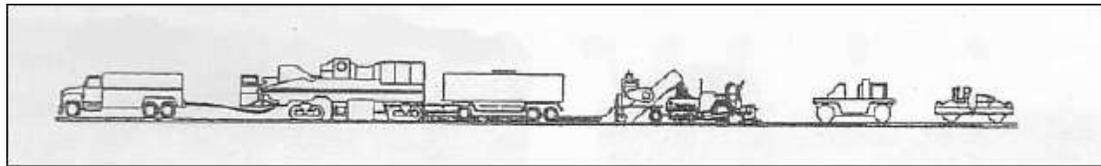
- Disgregación del pavimento existente, por fresado.
- Adición continúa del agua, los ligantes o los conglomerantes necesarios.
- Mezcla del material disgregado con el agua y con los ligantes o conglomerantes.

- Extensión del material mezclado con la forma requerida.

Si el equipo está dotado de un reparto sólo mediante una rastra o un sinfín, se requiere luego un refinado con motoniveladora, en otros casos, el equipo lleva acoplada una regla con pisón, análoga a la que tienen las extendedoras de mezclas bituminosas, por lo que no se precisa ningún refinado posterior.

Con estos equipos se reducen al mínimo el ruido y la contaminación atmosférica, pues los tres primeros procesos tienen lugar en las cámaras de fresado y de mezcla. Se trata, por consiguiente, de unas máquinas fresadoras-mezcladoras-extendedoras, que requieren una potencia elevada, pero que permiten reciclar unos espesores importantes con grandes rendimientos y conseguir una buena regularidad superficial. Como equipo de trabajo puede ser usado un "tren" de tres elementos: una máquina fresadora en frío, una unidad de trituración, tamizado y mezclado y un equipo convencional de distribución y rodillado. Este "tren" debe ocupar una sola trocha o carril para maximizar el flujo de tránsito.

**Figura 22. Secuencia habitual de un proceso de reciclado**



*Fuente:* Transportation Research Record núm. 1545

## **CAPÍTULO III: INVESTIGACIÓN SOBRE LA EVALUACIÓN DE RECICLADO EN FRÍO**

### **3.1. ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN**

Este capítulo describe el proceso para realizar el reciclado de pavimentos, donde no existe en la actualidad un método mundialmente aceptado y estandarizado para diseñar mezclas recicladas en frío cuando se utilizan emulsiones asfálticas como aditivo reciclador, pero actualmente es una alternativa de rehabilitación altamente conveniente donde se expondrá los beneficios que se obtienen al aplicar este proceso, y los principales factores que afectan la viabilidad del reciclado en frío en un proyecto específico.

### **3.2. MUESTREO DE MATERIALES**

#### **3.2.1. MATERIAL RECICLADO**

Se recolecto muestras de tres puntos de la ciudad basando en las empresas y/o instituciones que operan en la misma:

- Alcaldía Municipal: La toma de muestra se realizó del centro de la ciudad específicamente de la calle General Trigo.
- Sedeca: Se tomó la muestra del tramo San Lorencito - Iscayachi.
- Otras empresas: Se tomó la muestra del campus universitario de la U.A.J.M.S.

##### **3.2.1.1. Muestra 1**

Para la obtención de la carpeta asfáltica a reciclar de la muestra 1, ubicada en la calle General Trigo entre Ingavi y Madrid donde la institución que opera es la Alcaldía Municipal de Tarija, se procedió a levantar la carpeta en trozos o bloques a partir de la escarificación que se realizó para el ampliado de las veredas del centro de la ciudad.

**Figura 23. Ubicación de la Muestra 1**



*Fuente:* Google Earth

**Figura 24. Extracción Muestra 1 c/ General Trigo**



*Fuente:* Elaboración Propia

### 3.2.1.2. Muestra 2

Para la obtención de la carpeta asfáltica a reciclar de la muestra 2, ubicada en San Lorencito - Iscayachi donde la institución que opera es el Servicio de Caminos (SEDECA), se procedió a levantar la carpeta en trozos a partir del desprendimiento debido a las fallas de la misma.

**Figura 25. Ubicación de la Muestra 2**



*Fuente:* Google Earth

**Figura 26. Extracción Muestra 2 San Lorencito - Iscayachi**

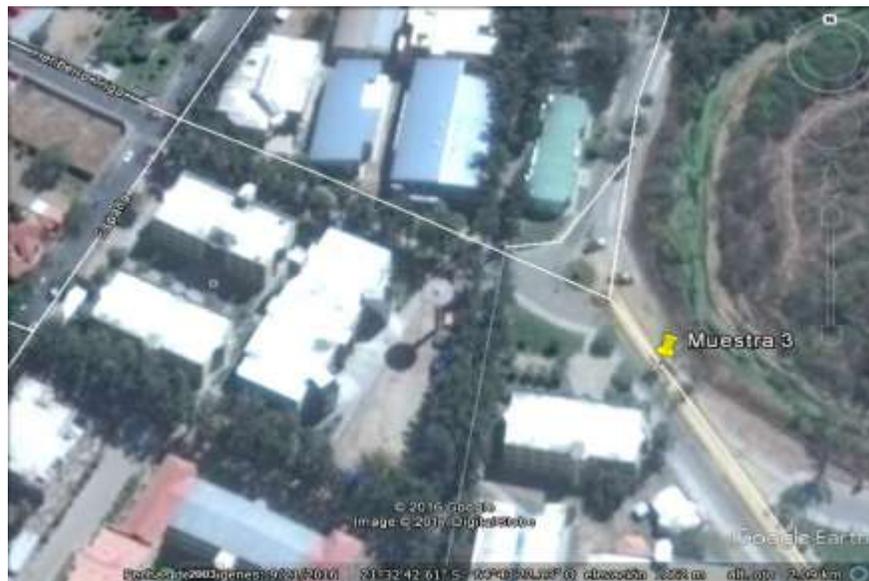


*Fuente:* Elaboración Propia

### 3.2.1.3. Muestra 3

Para la obtención de la carpeta asfáltica a reciclar de la muestra 3, ubicada en el campus universitario de la U.A.J.M.S. donde la institución que opero fue una empresa privada, se procedió a levantar la carpeta en trozos a partir de la escarificación que se realizó debido a la repavimentación por fallas en la carpeta asfáltica.

**Figura 27. Ubicación de la Muestra 3**



*Fuente:* Google Earth

**Figura 28. Extracción Muestra 3 Campus Universitario de la U.A.J.M.S.**



Fuente: Elaboración Propia

### 3.3. CARACTERÍSTICAS DE LA EMULSIÓN EMPLEADA

La emulsión a utilizar debe cumplir ciertas especificaciones de la Norma AASHTO, en este proyecto utilizamos emulsión RR-2C de procedencia Brasileira proporcionada de un proyecto ubicado en la provincia Villamontes en la ciudad de Tarija.

Figura 29. Certificado de Calidad de Origen

ENSAYO		MÉTODO	UNID.	ESPECIF.	RESULTADO
					IASA CLIENTE
Viscosidade Saybolt-Furol a 50°C		AASHTO T 59' Seção 08	Seg.	100 – 400	299
Estabilidade, 24 hrs.		AASHTO T 59' Seção 17	% massa	1 máx.	0,05
Desemulsibilidade		AASHTO T 59' Seção 09	% massa	40 min.	50,0
Carga da partícula		AASHTO T 59' Seção 07	---	Positiva	POS
Penetração, 0,84mm		AASHTO T 59' Seção 12	% massa	0,1 máx.	0,0
Resíduo seco		AASHTO T 59' Seção 06	% massa	65 min.	70,9
<b>Ensaio sobre o resíduo seco</b>					
Recuperação elástica, 25°C, 20 cm		AASHTO T 301	%	60 min.	67
Conteúdo de polímero		AASHTO T 302	%	2,5 min.	3,0
Penetração (100g, 5s, 25°C)		AASHTO T 49	0,1mm	50 – 250	56
Ductilidade, 4°C, 5 cm/min.		AASHTO T 51	cm	30 min.	>30
Ductilidade, 25°C, 5 cm/min.		AASHTO T 51	cm	125 min.	>125
Solubilidade em tricloroetileno		AASHTO T 44	%	97,5 min.	98,5
<b>Ensaio da mancha</b>					
95% heptano + 5% xileno		AASHTO T 102	---	Negativo	NEG
90% heptano + 10% xileno				Negativo	
85% heptano + 15% xileno				Negativo	
80% heptano + 20% xileno				Negativo	
* AASHTO T 59 - Rev. 2009					
<b>RESPONSÁVEL QUÍMICO:</b> Emerson Rodrigues Maciel – CRO 4ª REG. SP. - 04241037					
EMULEX RR-2C, quando exposto a temperaturas ambientes abaixo de 4°C, sofre congelamento e conseqüente desestabilização, impossibilitando sua aplicação, mesmo após o seu descongelamento. Desta forma, deverão ser tomadas as seguintes precauções:					
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nas condições em que a temperatura ambiente esteja abaixo de 4°C, o produto deverá ser transportado e armazenado em tanques que mantenham a temperatura do EMULEX RR-2C entre 25°C e 30°C;</li> <li>• O EMULEX RR-2C só deverá ser aplicado quando a temperatura ambiente do local da obra estiver acima de 10°C.</li> </ul>					
<p>Camila Mendes da Silva              Responsável:</p>					
<p>STRATURA ASFALTOS S.A.            Rua Paulista 1754, 7º andar, São Paulo, SP            CEP 01310-000 - São Paulo, SP            Tel.: (11) 5013-4270; Fax: (11) 3043-4000</p>					
<p>Centro de Soluções de Engenharia            Rua Professor Raulo de Montenegro, 241, Belfor            CEP 12140-100 - Paulínia, SP            Tel.: (11) 3884-0403; Fax: (11) 3884-1000            www.stratura.com.br</p>					
<p>Coordenadora de Atendimento:            Av. Paulista 1754, 7º andar, São Paulo, SP            CEP 01310-000 - São Paulo, SP            Telefone: 0800 701-2084 Fax: (11) 3043-4042</p>					

*Fuente:* Stratura Asfaltos

### **3.4. CARACTERIZACIÓN DE COMPONENTES**

#### **3.4.1. MATERIAL RECICLADO**

##### **3.4.1.1. Método para determinar el contenido de ligante de mezcla asfáltica por centrifugación-ensayo de extracción**

Este ensayo describe el procedimiento para determinar el contenido de ligante asfáltico y la extracción de los agregados pétreos de la carpeta asfáltica a reciclar, mediante el proceso de centrifugación, que consiste en realizar un lavado de la carpeta asfáltica a reciclar con un solvente en este caso gasolina.

##### **3.4.1.1.1. Procedimiento del ensayo**

**Figura 30. Muestra pesada antes de entrar al horno para que sea manipulable**



*Fuente:* Elaboración Propia

**Figura 31. Muestra en el horno**



*Fuente:* Elaboración Propia

**Figura 32. Dejar reposar la muestra con el solvente para ayudar a la disgregación**



*Fuente:* Elaboración Propia

**Figura 33. Colocado de la muestra en el crisol**



*Fuente:* Elaboración Propia

**Figura 34. Funcionamiento de la maquina centrífuga**



*Fuente:* Elaboración Propia

**Figura 35. Resultado del lavado de la muestra**



*Fuente:* Elaboración Propia

**Figura 36. Introducir la muestra al horno para secarla**



*Fuente:* Elaboración Propia

**Figura 37. Resultado de la muestra sin ligante asfáltico**



*Fuente:* Elaboración Propia

### 3.4.1.1.2. Resultados del ensayo

- **Muestra 1**

**Tabla 11. Contenido de Asfalto c/ General Trigo**

N° MUESTRA	MASA SECA DE LA MUESTRA (g)	MASA SECA DE LA MUESTRA LAVADA (g)	% DE LIGANTE ASFALTICO
1	3000	2850	5,26
2	3000	2867	4,64
3	3000	2863	4,79
<b>Promedio</b>			<b>4,90</b>

*Fuente:* Elaboración Propia

- **Muestra 2**

**Tabla 12. Contenido de Asfalto San Lorencito-Iscayachi**

N° MUESTRA	MASA SECA DE LA MUESTRA (g)	MASA SECA DE LA MUESTRA LAVADA (g)	% DE LIGANTE ASFALTICO
1	3000	2883	4,06
2	3000	2892	3,73
3	3000	2895	3,63
<b>Promedio</b>			<b>3,81</b>

*Fuente:* Elaboración Propia

- **Muestra 3**

**Tabla 13. Contenido de Asfalto Universidad**

N° MUESTRA	MASA SECA DE LA MUESTRA (g)	MASA SECA DE LA MUESTRA LAVADA (g)	% DE LIGANTE ASFALTICO
1	3000	2876	4,31
2	3000	2860	4,90
3	3000	2889	3,84
<b>Promedio</b>			<b>4,35</b>

*Fuente:* Elaboración Propia

### **3.4.1.2. Método para análisis granulométrico de áridos provenientes de extracciones**

En este ensayo se realizó el análisis granulométrico para determinar la distribución de tamaños de las partículas del resultado del agregado después del centrífugo.

#### **3.4.1.2.1. Procedimiento del ensayo**

***Figura 38. Muestra inicial previamente pesada***



*Fuente:* Elaboración Propia

***Figura 39. Método del lavado***



*Fuente:* Elaboración Propia

**Figura 40. Secado del agregado lavado en el horno**



*Fuente:* Elaboración Propia

**Figura 41. Tamizado del material ya seco**



*Fuente:* Elaboración Propia

**Figura 42. Obtención de pesos retenidos en los tamices**



Fuente: Elaboración Propia

### 3.4.1.2.2. Resultados del ensayo

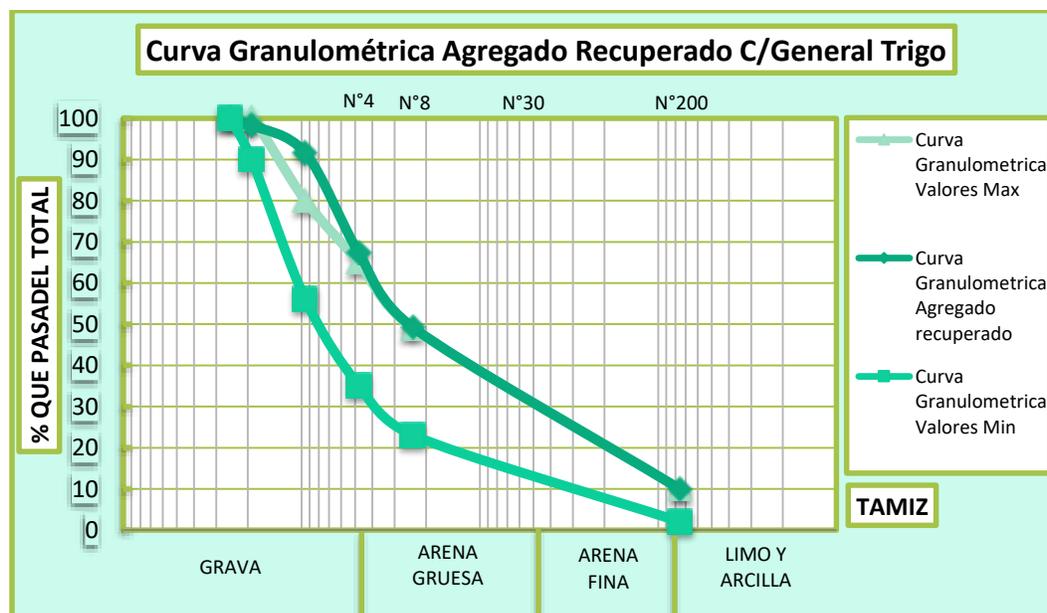
- Muestra 1

**Tabla 14. Granulometría del Agregado c/ General Trigo**

Peso Total (gr.)			2480,5		
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret. (gr)	Ret. Acum. (gr)	% Ret.	% Que Pasa del Total
1"	25,00	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,00	41,50	41,50	1,67	98,33
1/2"	12,50	56,60	98,10	3,95	96,05
3/8"	9,50	111,20	209,30	8,44	91,56
Nº4	4,75	603,30	812,60	32,76	67,24
Nº8	2,36	448,10	1260,70	50,82	49,18
Nº10	2,00	120,10	1380,80	55,67	44,33
Nº30	0,600	834,50	2215,30	89,31	10,69
Nº200	0,075	20,20	2235,50	90,12	9,88
BASE		245,00			

Fuente: Elaboración Propia

**Gráfica 1. Curva Granulométrica c/ General Trigo**



Fuente: Elaboración Propia

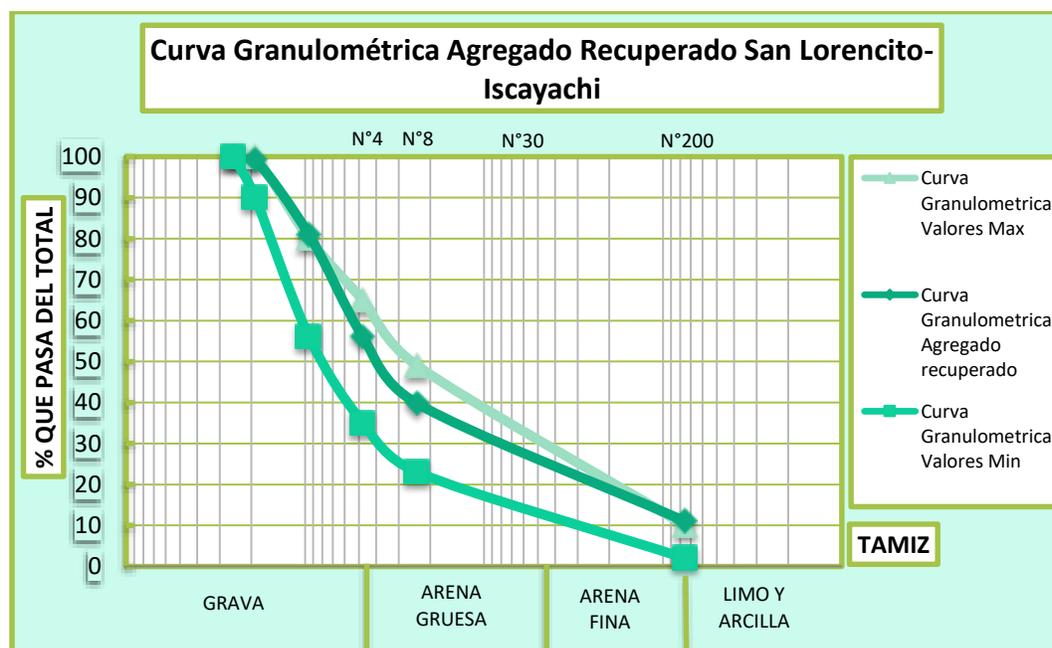
- **Muestra 2**

**Tabla 15. Granulometría del Agregado San Lorencito - Iscayachi**

Peso Total (gr.)			2471,7		
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret. (gr)	Ret. Acum. (gr)	% Ret.	% Que Pasa del Total
1"	25,00	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,00	17,50	17,50	0,71	99,29
1/2"	12,50	267,10	284,60	11,51	88,49
3/8"	9,50	186,00	470,60	19,04	80,96
Nº4	4,75	616,20	1086,80	43,97	56,03
Nº8	2,36	402,00	1488,80	60,23	39,77
Nº10	2,00	19,20	1508,00	61,01	38,99
Nº30	0,600	298,30	1806,30	73,08	26,92
Nº200	0,075	392,50	2198,80	88,96	11,04
BASE		272,90			

Fuente: Elaboración Propia

**Gráfica 2. Curva Granulométrica San Lorencito - Iscayachi**



Fuente: Elaboración Propia

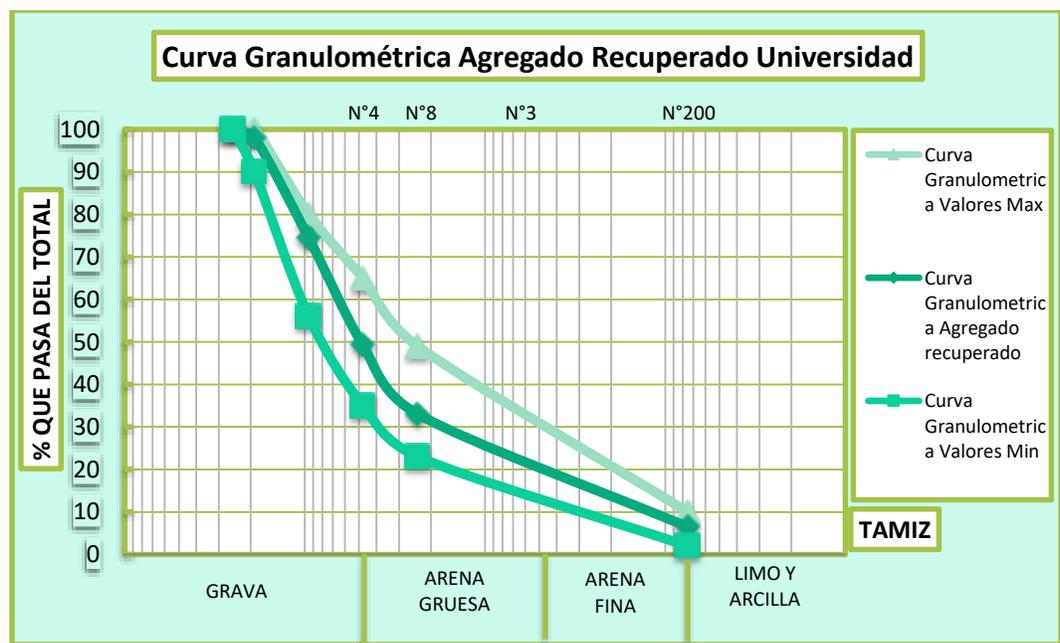
- **Muestra 3**

**Tabla 16. Granulometría del Agregado Universidad**

Peso Total (gr.)			2432,5		
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret. (gr)	Ret. Acum. (gr)	% Ret.	% Que Pasa del Total
1"	25,00	0,00	0,00	0,00	<b>100,00</b>
3/4"	19,00	46,20	46,20	1,90	<b>98,10</b>
1/2"	12,50	295,30	341,50	14,04	<b>85,96</b>
3/8"	9,50	279,00	620,50	25,51	<b>74,49</b>
Nº4	4,75	613,70	1234,20	50,74	<b>49,26</b>
Nº8	2,36	394,40	1628,60	66,95	<b>33,05</b>
Nº10	2,00	59,40	1688,00	69,39	<b>30,61</b>
Nº30	0,600	326,70	2014,70	82,82	<b>17,18</b>
Nº200	0,075	259,60	2274,30	93,50	<b>6,50</b>
BASE		158,20			

Fuente: Elaboración Propia

**Gráfica 3. Curva Granulométrica Universidad**



*Fuente:* Elaboración Propia

### **3.4.2. EMULSIÓN ASFÁLTICA**

#### **3.4.2.1. Método para determinar la viscosidad Saybolt**

La facilidad con que un fluido fluye a través de un orificio furol es una indicación de su viscosidad, este es el principio sobre el cual está basado el viscosímetro de Saybolt, después de que se establece el flujo, la muestra de fluido se coloca en el aparato, se mide el tiempo requerido para recolectar 60 ml. del fluido, el tiempo resultante se reporta como la viscosidad del fluido en segundos.

##### **3.4.2.1.1. Procedimiento del ensayo**

***Figura 43.* Colocar la emulsión e igualar la temperatura del aparato y el termómetro a 50 °C**



*Fuente:* Elaboración Propia

**Figura 44. Colocado de los frascos receptores**



*Fuente:* Elaboración Propia

**Figura 45. Una vez igualada la temperatura quitar el corcho y dejar fluir la emulsión**



*Fuente:* Elaboración Propia

**Figura 46.** Registrar el tiempo en que la emulsión llega al menisco del frasco



*Fuente:* Elaboración Propia

### 3.4.2.1.2. Resultados del ensayo

**Tabla 17.** Resultado de la Viscosidad Saybolt Furol 50 °C

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO
Viscosidad Saybolt Furol 50 °C	Seg.	214,20	237,88	232,80	228,29

*Fuente:* Elaboración Propia

### 3.4.2.2. Método de residuo por destilación

El procedimiento consiste en efectuar la destilación de una muestra de emulsión asfáltica, hasta la temperatura máxima de 260 °C para separar de la emulsión en agua, disolventes y residuo asfáltico.

### 3.4.2.2.1. Procedimiento del ensayo

**Figura 47. Armar el equipo e introducir 200 grs. de emulsión asfáltica**



*Fuente:* Elaboración Propia

**Figura 48. Aplicando calor mediante el anillo quemador**



*Fuente:* Elaboración Propia

**Figura 49. Proceso de destilación del agua en la emulsión asfáltica**



*Fuente:* Elaboración Propia

**Figura 50. Fin del proceso de destilación y registro del volumen destilado**



*Fuente:* Elaboración Propia

#### 3.4.2.2.2. Resultados del ensayo

**Tabla 18. Resultado de la Destilación de la Emulsión Asfáltica**

N° MUESTRA	MASA INICIAL DE LA EMULSION (g)	PESO DEL AGUA DESTILADA (g)	% DE AGUA POR DESTILACION	% RESIDUO POR DESTILACION
1	200	22	11,00	89,00
2	200	24	12,00	88,00
3	200	23	11,50	88,50
		<b>Promedio</b>	<b>11,50</b>	<b>88,50</b>

*Fuente:* Elaboración Propia

#### 3.4.2.3. Peso Específico

La finalidad y procedimientos para realizar el ensayo de peso específico en los asfaltos emulsificados son los mismos descritos para los asfaltos fluidificados.

### 3.4.2.3.1. Procedimiento del ensayo

**Figura 51. Registrar el Peso del picnómetro vacío**



*Fuente:* Elaboración Propia

**Figura 52. Peso del picnómetro calibrado con agua**



*Fuente:* Elaboración Propia

**Figura 53. Registrar el peso del picnómetro con muestra**



*Fuente:* Elaboración Propia

**Figura 54. Picnómetro con muestra rellenado con agua**



*Fuente:* Elaboración Propia

**Figura 55. Peso de muestras con emulsión y agua**



*Fuente:* Elaboración Propia

### 3.4.2.3.2. Resultados del ensayo

**Tabla 19. Resultado del peso específico de la emulsión asfáltica**

ENSAYO	UNIDAD	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3	PROMEDIO
Peso Picnómetro	grs.	38,0	38,1	38,0	
Peso Picnómetro + Agua (25°C)	grs.	63,0	63,2	63,0	
Peso Picnómetro + Muestra	grs.	56,4	56,5	56,4	
Peso Picnómetro + Agua + Muestra	grs.	62,2	62,5	62,1	
Peso Específico	grs./cm <sup>3</sup>	<b>0,956</b>	<b>0,961</b>	<b>0,951</b>	<b>0,956</b>

*Fuente:* Elaboración Propia

### 3.5. MATERIAL RECICLADO COMO AGREGADO

#### 3.5.1. PESO ESPECÍFICO AGREGADO GRUESO

El peso específico es la relación existente entre peso-volumen, por lo tanto el peso específico de una muestra de agregado en este caso grava y gravilla (agregado grueso) se determina al comparar el peso de un volumen dado de agregado con el peso de un volumen igual de agua, a la misma temperatura.

##### 3.5.1.1. Procedimiento del ensayo

*Figura 56. Triturar el material a reciclar*



*Fuente: Elaboración Propia*

*Figura 57. Tamizado de la muestra para separar Agregado grueso y fino*



*Fuente: Elaboración Propia*

**Figura 58. Muestra separada (Grava y Gravilla)**



*Fuente:* Elaboración Propia

**Figura 59. Muestras sumergidas en agua por 24 hrs.**



*Fuente:* Elaboración Propia

**Figura 60. Secado superficial de las muestras saturadas**



Fuente: Elaboración Propia

**Figura 61. Determinación de pesos sumergidos**



Fuente: Elaboración Propia

**Figura 62. Secado de las muestras para posteriormente pesarlas**



Fuente: Elaboración Propia

### 3.5.1.2. Resultados del ensayo

- Muestra 1

**Tabla 20. Resultados de Peso Específico del Agregado Grueso (Grava) c/General Trigo**

MUESTRA N°	PESO MUESTRA SECADA "A" (gr)	PESO MUESTRA SATURADA CON SUP. SECA "B" (gr)	PESO MUESTRA SATURADA DENTRO DEL AGUA "C" (gr)	PESO ESPECÍFICO A GRANEL (gr/cm <sup>3</sup> )	PESO ESPECÍFICO SATURADO CON SUP. SECA (gr/cm <sup>3</sup> )	PESO ESPECÍFICO APARENTE (gr/cm <sup>3</sup> )	% DE ABSORCIÓN
1	3431,00	3500,00	1927,00	2,18	2,23	2,28	2,01
2	3427,00	3500,00	1922,00	2,17	2,22	2,28	2,13
3	3435,00	3500,00	1929,00	2,19	2,23	2,28	1,89

Promedio	2,18	2,22	2,28	2,01
----------	------	------	------	------

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 21. Resultados de Peso Específico del Agregado Grueso (Gravilla) c/General Trigo**

MUESTRA N°	PESO MUESTRA SECADA "A" (gr)	PESO MUESTRA SATURADA CON SUP. SECA "B" (gr)	PESO MUESTRA SATURADA DENTRO DEL AGUA "C" (gr)	PESO ESPECÍFICO A GRANEL (gr/cm <sup>3</sup> )	PESO ESPECÍFICO SATURADO CON SUP. SECA (gr/cm <sup>3</sup> )	PESO ESPECÍFICO APARENTE (gr/cm <sup>3</sup> )	% DE ABSORCIÓN
1	3404,00	3500,00	1921,00	2,16	2,22	2,30	2,82
2	3402,00	3500,00	1920,00	2,15	2,22	2,30	2,88
3	3405,00	3500,00	1921,00	2,16	2,22	2,29	2,79
Promedio				2,16	2,22	2,30	2,83

Fuente: Elaboración Propia

- Muestra 2

**Tabla 22. Resultados de Peso Específico del Agregado Grueso (Grava) San Lorencito-Iscayachi**

MUESTRA N°	PESO MUESTRA SECADA "A" (gr)	PESO MUESTRA SATURADA CON SUP. SECA "B" (gr)	PESO MUESTRA SATURADA DENTRO DEL AGUA "C" (gr)	PESO ESPECÍFICO A GRANEL (gr/cm <sup>3</sup> )	PESO ESPECÍFICO SATURADO CON SUP. SECA (gr/cm <sup>3</sup> )	PESO ESPECÍFICO APARENTE (gr/cm <sup>3</sup> )	% DE ABSORCIÓN
1	3439,80	3500,00	2010,00	2,31	2,35	2,41	1,75
2	3442,00	3500,00	2015,00	2,32	2,36	2,41	1,69
3	3438,00	3500,00	2008,00	2,30	2,35	2,40	1,80
Promedio				2,31	2,35	2,41	1,75

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 23. Resultados de Peso Específico del Agregado Grueso (Gravilla) San Lorencito-Iscayachi**

MUESTRA N°	PESO MUESTRA SECADA "A" (gr)	PESO MUESTRA SATURADA CON SUP. SECA "B" (gr)	PESO MUESTRA SATURADA DENTRO DEL AGUA "C" (gr)	PESO ESPECÍFICO A GRANEL (gr/cm <sup>3</sup> )	PESO ESPECÍFICO SATURADO CON SUP. SECA (gr/cm <sup>3</sup> )	PESO ESPECÍFICO APARENTE (gr/cm <sup>3</sup> )	% DE ABSORCIÓN
1	3399,10	3500,00	1956,00	2,20	2,27	2,36	2,97
2	3400,00	3500,00	1958,00	2,20	2,27	2,36	2,94

3	3398,00	3500,00	1954,00	2,20	2,26	2,35	3,00
<b>Promedio</b>				<b>2,20</b>	<b>2,27</b>	<b>2,36</b>	<b>2,97</b>

Fuente: Elaboración Propia

- Muestra 3

**Tabla 24. Resultados de Peso Específico del Agregado Grueso (Grava) Universidad**

MUESTRA N°	PESO MUESTRA SECADA "A" (gr)	PESO MUESTRA SATURADA CON SUP. SECA "B" (gr)	PESO MUESTRA SATURADA DENTRO DEL AGUA "C" (gr)	PESO ESPECÍFICO A GRANEL (gr/cm <sup>3</sup> )	PESO ESPECÍFICO SATURADO CON SUP. SECA (gr/cm <sup>3</sup> )	PESO ESPECÍFICO APARENTE (gr/cm <sup>3</sup> )	% DE ABSORCIÓN
1	3457,80	3500,00	2046,00	2,38	2,41	2,45	1,22
2	3457,00	3500,00	2046,00	2,38	2,41	2,45	1,24
3	3458,00	3500,00	2048,00	2,38	2,41	2,45	1,21
<b>Promedio</b>				<b>2,38</b>	<b>2,41</b>	<b>2,45</b>	<b>1,23</b>

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 25. Resultados de Peso Específico del Agregado Grueso (Gravilla) Universidad**

MUESTRA N°	PESO MUESTRA SECADA "A" (gr)	PESO MUESTRA SATURADA CON SUP. SECA "B" (gr)	PESO MUESTRA SATURADA DENTRO DEL AGUA "C" (gr)	PESO ESPECÍFICO A GRANEL (gr/cm <sup>3</sup> )	PESO ESPECÍFICO SATURADO CON SUP. SECA (gr/cm <sup>3</sup> )	PESO ESPECÍFICO APARENTE (gr/cm <sup>3</sup> )	% DE ABSORCIÓN
1	3427,90	3500,00	1986,00	2,26	2,31	2,38	2,10
2	3427,00	3500,00	1987,00	2,27	2,31	2,38	2,13
3	3428,00	3500,00	1985,00	2,26	2,31	2,38	2,10
<b>Promedio</b>				<b>2,26</b>	<b>2,31</b>	<b>2,38</b>	<b>2,11</b>

Fuente: Elaboración Propia

### 3.5.2. PESO ESPECÍFICO AGREGADO FINO

Este método es aplicable a áridos finos que pasan el tamiz de 2,36 mm (N° 8), donde el trabajo de laboratorio consiste en determinar el volumen de un peso conocido de granos de suelo y dividirlo por el peso del mismo volumen de agua, para determinar

este parámetro se utilizó un procedimiento donde prácticamente se igualen los volúmenes de agua y de suelo, mediante un matraz de volumen definido.

### 3.5.2.1. Procedimiento del ensayo

**Figura 63. Muestra de suelo fino**



*Fuente:* Elaboración Propia

**Figura 64. Muestras sumergidas en agua por 24 hrs.**



*Fuente:* Elaboración Propia

**Figura 65. Secado superficial de las muestras saturadas con secadora**



*Fuente:* Elaboración Propia

**Figura 66.** Compactado con 25 golpes distribuidos uniformemente sobre la superficie



*Fuente:* Elaboración Propia

**Figura 67.** Verificación de la condición de la muestra saturada con superficie seca



*Fuente:* Elaboración Propia

**Figura 68.** Determinación del peso de la muestra saturada con superficie seca



*Fuente:* Elaboración Propia

**Figura 69. Obtener el peso del matraz**



*Fuente:* Elaboración Propia

**Figura 70. Pesamos la muestra + matraz + agua**



Fuente: Elaboración Propia

**Figura 71. Secado en horno de la muestra en el matraz para posteriormente pesarla**



Fuente: Elaboración Propia

### 3.5.2.2. Resultados del ensayo

- **Muestra 1**

**Tabla 26. Resultados de Peso Específico del Agregado Fino c/ General Trigo**

MUESTRA Nº	PESO MUESTRA (gr)	PESO DE MATRÁZ (gr)	MUESTRA + MATRÁZ + AGUA (gr)	PESO DEL AGUA AGREGADO AL MATRÁZ "W" (ml) o (gr)	PESO MUESTRA SECADA "A" (gr)	VOLUMEN DEL MATRÁZ "V" (ml)	P. E. A GRANEL (gr/cm3)	P. E. SATURADO CON SUP. SECA (gr/cm3)	P. E. APARENTE (gr/cm3)	% DE ABSORCIÓN
1	322,4	173,7	857,9	361,80	318,80	500,00	2,31	2,33	2,37	1,12
2	322	173,7	857,5	361,80	318,50	500,00	2,30	2,33	2,36	1,09
3	322,8	173,7	858,3	361,80	319,10	500,00	2,31	2,34	2,37	1,15
Promedio							2,31	2,33	2,37	1,12

Fuente: Elaboración Propia

- **Muestra 2**

**Tabla 27. Resultados de Peso Específico del Agregado Grueso (Grava) San Lorencito-Iscayachi**

MUESTRA Nº	PESO MUESTRA (gr)	PESO DE MATRÁZ (gr)	MUESTRA + MATRÁZ + AGUA (gr)	PESO DEL AGUA AGREGADO AL MATRÁZ "W" (ml) o (gr)	PESO MUESTRA SECADA "A" (gr)	VOLUMEN DEL MATRÁZ "V" (ml)	P. E. A GRANEL (gr/cm3)	P. E. SATURADO CON SUP. SECA (gr/cm3)	P. E. APARENTE (gr/cm3)	% DE ABSORCIÓN
1	318,2	173,7	850	358,10	311,40	500,00	2,19	2,24	2,30	2,14
2	318,5	173,7	850,3	358,10	311,60	500,00	2,20	2,24	2,31	2,17
3	318	173,7	849,7	358,00	311,30	500,00	2,19	2,24	2,30	2,11
Promedio							2,19	2,24	2,30	2,14

Fuente: Elaboración Propia

- Muestra 3

**Tabla 28. Resultados de Peso Específico del Agregado Grueso (Grava) Universidad**

MUESTRA Nº	PESO MUESTRA (gr)	PESO DE MATRÁZ (gr)	MUESTRA + MATRAZ + AGUA (gr)	PESO DEL AGUA AGREGADO AL MATRÁZ "W" (ml) o (gr)	PESO MUESTRA SECADA "A" (gr)	VOLUMEN DEL MATRÁZ "V" (ml)	P. E. A GRANEL (gr/cm <sup>3</sup> )	P. E. SATURADO CON SUP. SECA (gr/cm <sup>3</sup> )	P. E. APARENTE (gr/cm <sup>3</sup> )	% DE ABSORCIÓN
1	299	173,7	862,5	389,80	295,00	500,00	2,68	2,71	2,78	1,34
2	298,8	173,7	862,3	389,80	294,90	500,00	2,68	2,71	2,77	1,31
3	298,9	173,7	862,4	389,80	294,80	500,00	2,68	2,71	2,78	1,37
Promedio							2,68	2,71	2,78	1,34

Fuente: Elaboración Propia

### 3.5.3. GRANULOMETRÍA AGREGADO A RECICLAR

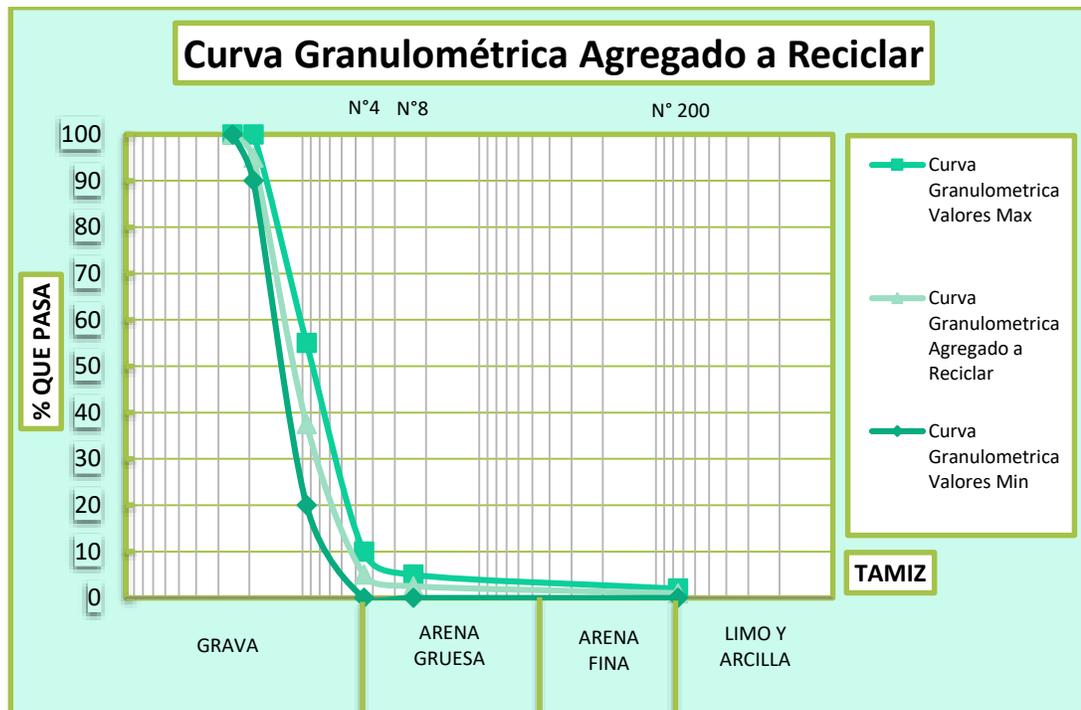
Previo al procedimiento del ensayo se lleva el reciclado de las tres carpetas asfálticas, el cual está trabando como agregado a una granulometría sugerida para el reciclado en frio.

**Tabla 29. Granulometría Agregado a Reciclar**

		Valor Min	Valor Max	Valor Medio
Tamices	Tamaño (mm)	% Que Pasa del Total	% Que Pasa del Total	% Que Pasa del Total
1"	25,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	19,00	90,00	100,00	95,00
3/8"	9,50	20,00	55,00	37,50
Nº4	4,50	0,00	10,00	5,00
Nº8	2,36	0,00	5,00	2,50
Nº200	0,075	0,00	2,00	1,00

Fuente: Elaboración Propia

### Gráfica 4. Curva Granulométrica Agregado a Reciclar



*Fuente:* Elaboración Propia

### 3.6. MEZCLA DE LA INVESTIGACIÓN

No existe en la actualidad un método de diseño de mezclas recicladas en frío con uso de emulsiones, mundialmente aceptado. No obstante, la mayoría de los métodos de diseño de mezclas recicladas que se están aplicando actualmente están basados en el método Marshall, por lo que en esta investigación se buscaba un método que cubra la mayoría de las necesidades y que permitiera diseñar mezclas recicladas. Se realizara la mezcla basándonos en el “Método de Diseño Marshall Modificado” (AASHTO-AGC-ARTBA, 1998).

#### 3.6.1. MÉTODO DE DISEÑO MARSHALL MODIFICADO

La investigación se desarrolló a través de las siguientes etapas y se describen en las secciones que siguen.

##### 3.6.1.1. Determinación del Contenido Inicial de Emulsión CIE

El CIE, es un contenido inicial de emulsión (punto de partida), para poder aplicar el método de diseño de mezcla reciclada, en torno al cual se van haciendo

variaciones cada 0,5% (CIE  $\pm$  0,5%) y así, dentro de ese rango, poder encontrar el contenido óptimo de emulsión. Se aplicaron dos métodos distintos, para determinar el más adecuado.

### 3.6.1.1.1. Método de la ABC

El contenido inicial de emulsión mediante este método se estima a partir de la siguiente fórmula empírica basada en el porcentaje del árido retenido en la malla N° 8 (A), el porcentaje del árido pasante por malla N° 8 y el retenido en la malla N° 200 (B) y el porcentaje de árido pasante por la malla N° 200 (C), para finalmente llegar al porcentaje en peso de emulsión asfáltica, sobre el peso del árido seco (%E) que vendría a ser el contenido inicial de emulsión asfáltica.

$$\% E = [(0,05 \times A) + (0,1 \times B) + (0,5 \times C)] \times 0,7$$

**Tabla 30. Determinación del contenido inicial de emulsión método ABC**

Muestra		General Trigo	San Lorencito-Iscayachi	Universidad
% E	Porcentaje en peso de emulsión asfáltica, sobre el peso del árido seco	8,10	9,42	8,85
A	Porcentaje del árido retenido en malla N° 8	50,82	60,23	66,95
B	Porcentaje del árido pasante por malla N° 8 y retenido en malla N°200	40,95	49,19	60,45
C	Porcentaje de árido pasante por malla N° 200	9,88	11,04	6,50

*Fuente:* Elaboración Propia

### 3.6.1.1.2. Método Instituto del Asfalto (AI)

El método, busca determinar un porcentaje de asfalto residual por peso de la mezcla, aplicando una fórmula empírica basada en el material retenido en el tamiz N°8 (a), el retenido en el tamiz N°200 pero que pasa el N°8 (b), el porcentaje de material que pasa el Tamiz N°200 (c y K) y la absorción del

agregado (F). En lo referido al factor F, varía entre 0 y 2,0 basado en una gravedad específica del material de 2,6 a 2,7; pero sugiere un rango entre 0,7 y 1,0 (en nuestro caso se adoptó 1,0) para cuando no se cuente con estos datos, lo que cubriría la mayoría de las condiciones que se presenten y por lo tanto, será un dato de apreciación de quien utilice el método. Una vez determinado el porcentaje de asfalto residual (Pc) y conociendo el Contenido de Asfalto de una Emulsión dada (CARE) se llega al Contenido Inicial de Emulsión (CIE).

$$Pc = 0,035 \times a + 0,045 \times b + K \times c + F$$

$$CEE = \frac{Pc - CAR}{CARE} \times 100$$

**Tabla 31. Determinación del contenido inicial de emulsión método AI**

	Muestra	General Trigo	San Lorencito-Iscaayachi	Universidad
a	% Ret. N°8	50,82	60,23	66,95
b	% Pasa N°8 y Ret. N°200	40,95	49,19	60,45
c	% Pasa N°200	9,88	11,04	6,50
	0,15 Si % Pasa N°200 es 11-15			
K	0,18 Si % Pasa N°200 es 6-10	0,18	0,15	0,18
	0,20 Si % Pasa N°200 es 5 o menos			
F	0 a 2,0 por absorción; 0,7 a 1,0 normal	1,00	1,00	1,00
Pc	% Asf. Resi. Total por peso de mezcla	6,40	6,98	7,23
CAR	Contenido de Asfalto del RAP (%)	4,90	3,81	4,35
CARE	Contenido Asfalto Residual Emulsión (%)	88,50	88,50	88,50
CEE	Contenido Estimado de Emulsión (%)	<b>1,7</b>	<b>3,6</b>	<b>3,3</b>

Fuente: Elaboración Propia

### **3.6.1.2. Diseño de mezclas recicladas en frío con variación del porcentaje de emulsión asfáltica**

Esta etapa consistió en la aplicación del Método de Diseño de Mezcla Marshall Modificado, aplicándolo al reciclado de tres carpetas asfálticas donde se variara los porcentajes de emulsión asfáltica (-2,5; -2; -1,5; -1; -0,5; 0; 0,5; 1; 1,5; 2) con la finalidad de encontrar el porcentaje óptimo de la misma, realizaremos tres briquetas por cada porcentaje.

#### **3.6.1.2.1. Materiales utilizados para la mezcla**

- Tamices los necesarios para reproducir en el laboratorio la granulometría exigida por la especificación a los agregados para la mezcla que se va a diseñar.
- Balanza sensible a un (1) g para pesar agregados y asfalto.
- Bandejas metálicas para calentar agregados y mezclar la emulsión con los agregados, cucharones, taras, espátulas, papel de filtro, etc.
- Elemento de calefacción para calentar los agregados, el material asfáltico, el conjunto de compactación y la muestra, se empleará un horno, provisto de control termostático, capaz de mantener la temperatura requerida con un error menor de 2.8°C (5°F).
- Molde para la preparación de muestras de 10 cm. (4") de diámetro interior, cada molde tiene una base metálica y se halla dividida en dos secciones; la sección inferior tiene 7,5 cm. (3") de altura, y la superior 6,35 cm. (2 ½").
- Un martillo o pisón de base circular con 9,8 cm. (3 7/8") de diámetro, 4,5 Kg. (10 lb) de peso y 46 cm. (18") de caída libre.
- Extractor de probetas elemento de acero en forma de disco con diámetro de 10 cm (3.95") y 1,3 cm (1/2") de espesor, utilizado para extraer la probeta compactada del molde, con la ayuda del collar de extensión. Se requiere de un elemento adecuado para transferir la carga a la probeta, de manera que ésta pase suavemente del molde al collar.

### 3.6.1.2.2. Dosificación con variación de porcentaje de emulsión

- **Muestra 1**

**Tabla 32. Dosificación variando % de emulsión c/General Trigo**

	PORCENTAJE DE EMULSIÓN ADICIONAL A LA INICIAL						
	-1,0%	-0,5%	0,0%	0,5%	1,0%	1,5%	2,0%
Porcentaje de Emulsión (%)	0,7	1,2	1,7	2,2	2,7	3,2	3,7
Porcentaje de Agregado (%)	96,3	95,8	95,3	94,8	94,3	93,8	93,3
Porcentaje de Agua (%)	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Peso de la Emulsión (gr)	9,5	16,3	23,0	29,8	36,6	43,4	50,2
Peso de Agregado (gr)	1191,6	1185,6	1179,6	1173,6	1167,6	1161,6	1155,6
Peso del agua adicional (gr)	17,0	16,3	15,7	15,0	14,3	13,6	12,9
Peso total de la briqueta (gr)	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200

*Fuente:* Elaboración Propia

- **Muestra 2**

**Tabla 33. Dosificación variando % de emulsión San Lorencito - Iscayachi**

	PORCENTAJE DE EMULSIÓN ADICIONAL A LA INICIAL									
	-2,5%	-2,0%	-1,5%	-1,0%	-0,5%	0,0%	0,5%	1,0%	1,5%	2,0%
Porcentaje de Emulsión (%)	1,1	1,6	2,1	2,6	3,1	3,6	4,1	4,6	5,1	5,6
Porcentaje de Agregado (%)	95,9	95,4	94,9	94,4	93,9	93,4	92,9	92,4	91,9	91,4
Porcentaje de Agua (%)	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Peso de la Emulsión (gr)	14,7	21,5	28,3	35,0	41,8	48,6	55,4	62,2	68,9	75,7
Peso de Agregado (gr)	1187,0	1181,0	1175,0	1169,0	1163,0	1157,0	1151,0	1145,0	1139,0	1133,0
Peso del agua adicional (gr)	16,5	15,8	15,1	14,4	13,7	13,1	12,4	11,7	11,0	10,3
Peso total de la briqueta (gr)	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200

*Fuente:* Elaboración Propia

- **Muestra 3**

**Tabla 34. Dosificación variando % de emulsión Universidad**

	PORCENTAJE DE EMULSIÓN ADICIONAL A LA INICIAL									
	-2,5%	-2,0%	-1,5%	-1,0%	-0,5%	0,0%	0,5%	1,0%	1,5%	2,0%
Porcentaje de Emulsión (%)	0,8	1,3	1,8	2,3	2,8	3,3	3,8	4,3	4,8	5,3
Porcentaje de Agregado (%)	96,2	95,7	95,2	94,7	94,2	93,7	93,2	92,7	92,2	91,7
Porcentaje de Agua (%)	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Peso de la Emulsión (gr)	10,3	17,1	23,9	30,6	37,4	44,2	51,0	57,8	64,5	71,3
Peso de Agregado (gr)	1190,9	1184,9	1178,9	1172,9	1166,9	1160,9	1154,9	1148,9	1142,9	1136,9
Peso del agua adicional (gr)	17,0	16,3	15,6	14,9	14,2	13,5	12,8	12,1	11,4	10,7
Peso total de la briqueta (gr)	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200

*Fuente:* Elaboración Propia

### 3.6.1.2.3. Procedimiento del ensayo

**Figura 72. Muestra ya desintegrada**



*Fuente:* Elaboración Propia

**Figura 73. Tamizado de la muestra**



*Fuente:* Elaboración Propia

**Figura 74.** Agregado de agua al 3% como contenido total y mezclar 1min



*Fuente:* Elaboración Propia

**Figura 75.** Agregar emulsión a 60°C y mezclar hasta completar dispersión de emulsión



*Fuente:* Elaboración Propia

**Figura 76.** Precalear moldes a 60 °C por 1 hora



*Fuente:* Elaboración Propia

**Figura 77. Introducir la mezcla en los moldes en tres capas con 25 varillas**



*Fuente:* Elaboración Propia

**Figura 78. Fabricar probetas con 75 golpes por cara**



*Fuente:* Elaboración Propia

**Figura 79. Extraer probetas de sus moldes con un extractor de núcleos**



*Fuente:* Elaboración Propia

**Figura 80. Briquetas reposando**



*Fuente:* Elaboración Propia

### **3.6.1.3. Método para determinar el espesor de muestras asfálticas compactadas**

Este método es para determinar el espesor o altura de probetas confeccionadas con mezclas asfálticas, la altura se utiliza para corregir valores de estabilidad Marshall.

#### **3.6.1.3.1. Materiales utilizados**

- Vernier con una precisión de 0,1 mm.
- Crayolas Para identificar las probetas.

### 3.6.1.3.2. Procedimiento del ensayo

**Figura 81. Marcado de las briquetas**



*Fuente:* Elaboración Propia

**Figura 82. Medición de las alturas de las briquetas**



*Fuente:* Elaboración Propia

### 3.6.1.4. Determinación de la densidad de las mezclas compactadas

Este método establece procedimientos para determinar la densidad real de mezclas asfálticas compactadas.

#### 3.6.1.4.1 Materiales utilizados

- Balanza de 2000 g de capacidad mínima, sensibilidad 0,1 g, debe estar equipada con un aparato de suspensión adecuado que permita la suspensión adecuada que permita pesar la probeta mientras está suspendida del centro de la balanza.

- Baño de agua que permita sumergir la muestra mientras esta suspendida bajo la balanza.

#### 3.6.1.4.2. Procedimiento del ensayo para determinar la densidad

**Figura 83. Determinar el peso de la briqueta seca**



*Fuente:* Elaboración Propia

**Figura 84. Determinar el peso de la briqueta sumergida**



*Fuente:* Elaboración Propia

**Figura 85. Saturar las briquetas durante 5 min.**



*Fuente:* Elaboración Propia

**Figura 86. Secado superficial de la briqueta con un paño**



*Fuente:* Elaboración Propia

**Figura 87. Determinar el peso de la briqueta saturada con superficie seca**



*Fuente:* Elaboración Propia

### **3.6.1.5. Determinación de estabilidad y la fluencia**

El método describe la medición de la resistencia a la deformación plástica y la fluencia de probetas de mezcla asfálticas con emulsión a temperatura ambiente.

#### **3.6.1.5.1. Materiales utilizados**

- Mordazas y medidor de deformación consisten en dos segmentos cilíndricos, con un radio de curvatura interior de 50.8 mm (2"). El

medidor de deformación consiste en un deformímetro de lectura final fija, con divisiones en 0.25 mm (0.01”).

- Prensa para la rotura de las probetas capaz de producir una velocidad uniforme de desplazamiento vertical de 50.8 mm por minuto (2”/min.) su capacidad de carga mínima deberá ser de 40 KN.
- Medidor de estabilidad, la resistencia de la probeta en el ensayo se medirá con un anillo dinamométrico acoplado a la prensa, de 22.2 KN (2265 kgf) de capacidad, con una sensibilidad de 44.5 N (4.54 kgf) hasta 4.45 KN (454 kgf) y 111.2 N (11.4 kgf) hasta 22.2 KN (2265 kgf). Las deformaciones del anillo se medirán con un deformímetro graduado en 0.0025 mm (0.0001”).

#### **3.6.1.5.2. Procedimiento del ensayo**

***Figura 88. Colocado de la briqueta en la mordaza Marshall***



*Fuente:* Elaboración Propia

***Figura 89. Lectura del dial de estabilidad y flujo***



*Fuente:* Elaboración Propia

***Figura 90.*** Briqueta ensayada



*Fuente:* Elaboración Propia

### 3.6.1.6. Resultados del ensayo del método de diseño Marshall modificado con variación del porcentaje de emulsión asfáltica

En la tabla 29 se muestran los resultados donde se determinaron los valores promedios de Densidad, Estabilidad, Flujo, % de Vacíos, Relación Emulsión – Vacíos, y Vacíos de Agregado Mineral, con los que se entra a las ecuaciones de las curvas de tendencia creadas con los distintos porcentajes de emulsión asfáltica versus los valores antes mencionados, así se obtiene el porcentaje de emulsión adicional para cada valor promedio y se determina una media de esos valores promedio, el cual es el Porcentaje Óptimo de Emulsión Adicional para el Reciclado, el mismo se suma al contenido inicial (CIE) de emulsión y el resultado vendría a ser el porcentaje del contenido óptimo de emulsión asfáltica (COE).

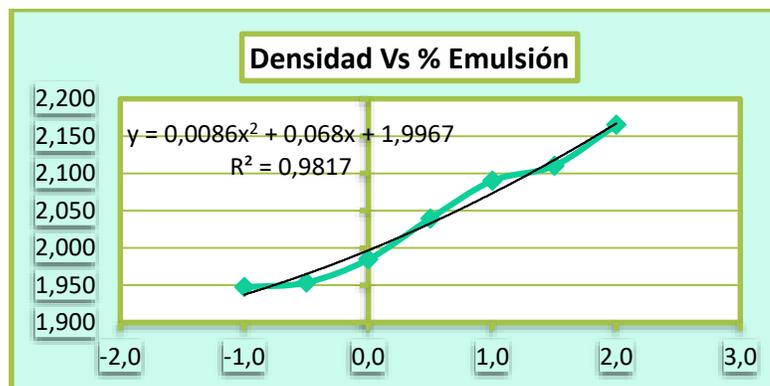
- **Muestra 1**

**Tabla 35. Resultados del ensayo Marshall para muestra reciclada c/ General Trigo**

PORCENTAJE DE EMULSIÓN ADICIONAL	DENSIDAD PROMEDIO (gr/cm <sup>3</sup> )	ESTABILIDAD (libras)	FLUJO (pulg.)	% DE VACIOS DE MEZCLA TOTAL (%)	R.E.V. (RELACIÓN EMULSIÓN VACIOS) (%)	V.A.M. (VACIOS DE AGREGADO MINERAL) (%)
-1,0	1,947	3402,10	10,37	14,42	9,00	15,85
-0,5	1,953	2376,00	12,18	13,56	15,32	16,01
0,0	1,985	1642,48	16,14	11,58	23,37	15,11
0,5	2,039	1457,71	14,16	8,51	35,57	13,20
1,0	2,090	939,47	12,86	5,59	51,36	11,50
1,5	2,110	903,73	11,17	4,04	63,65	11,10
2,0	2,165	828,65	10,24	0,89	90,45	9,27
<b>Valor promedio</b>	2,041	1650,022	12,445	8,367	41,248	13,147
<b>Porcentaje de Emulsión Adicional para cada valor promedio</b>	0,61	3,13	1,40	0,59	0,72	0,64
<b>PROMEDIO FINAL</b>	<b>1,18</b>					
EL PORCENTAJE ÓPTIMO DE EMULSIÓN ADICIONAL PARA EL REICLADO DE LA CARPETA ASFÁLTICA DE LA C/GENERAL TRIGO ES IGUAL AL 1,18 %.						

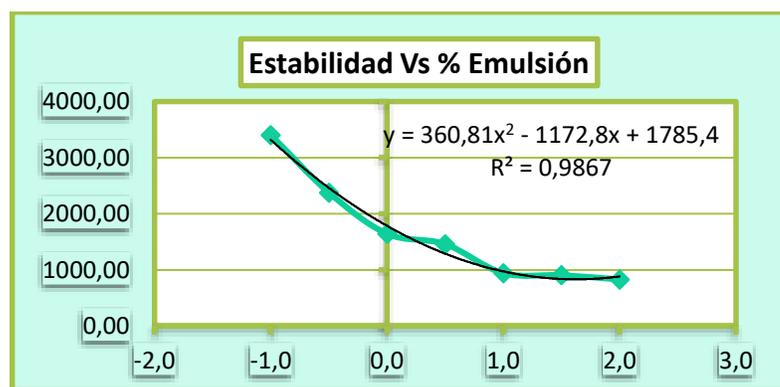
Fuente: Elaboración Propia

### Gráfica 5. Curva Densidad vs. % Emulsión Asfáltica (c/General Trigo)



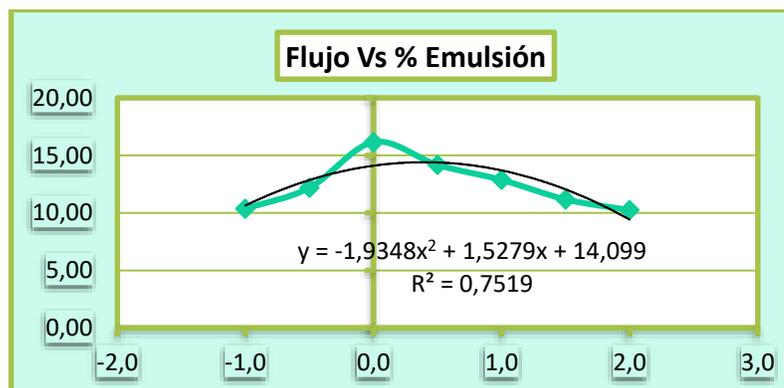
Fuente: Elaboración Propia

**Gráfica 6. Curva Estabilidad vs. % Emulsión Asfáltica (c/General Trigo)**



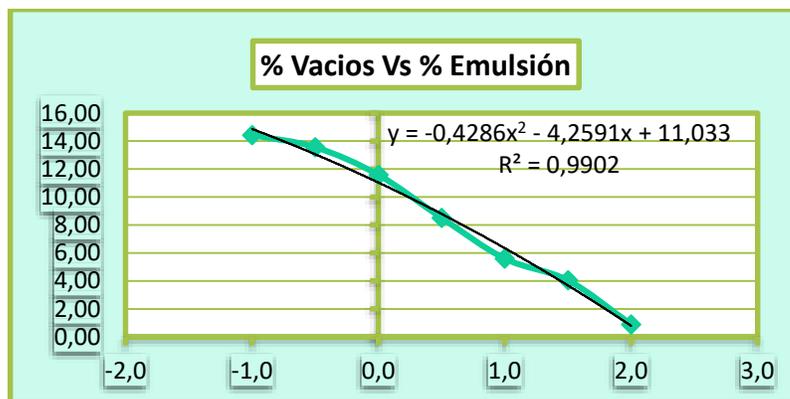
Fuente: Elaboración Propia

**Gráfica 7. Curva Flujo vs. % Emulsión Asfáltica (c/General Trigo)**



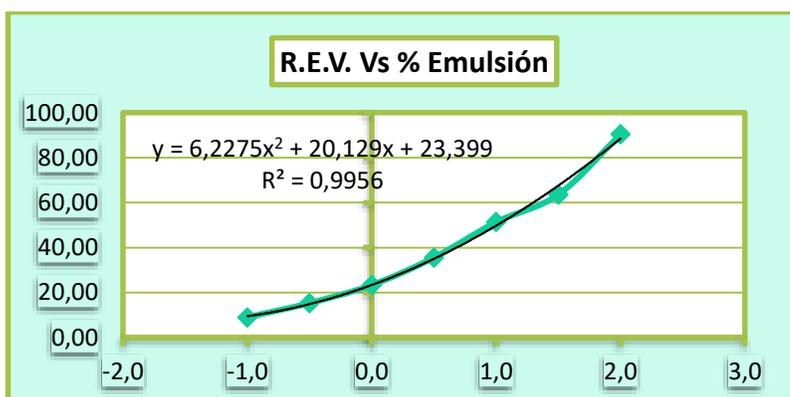
Fuente: Elaboración Propia

**Gráfica 8. Curva % Vacíos vs. % Emulsión Asfáltica (c/General Trigo)**



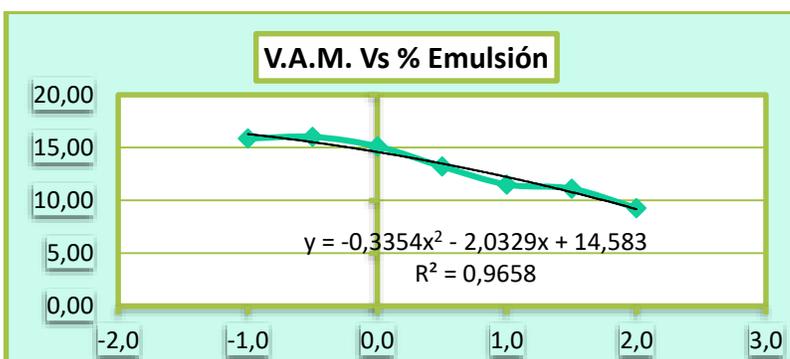
Fuente: Elaboración Propia

**Gráfica 9. Curva Relación Emulsión - Vacíos vs. % Emulsión Asfáltica (c/General Trigo)**



Fuente: Elaboración Propia

**Gráfica 10. Curva Vacíos Agregado Mineral vs. % Emulsión Asfáltica (c/General Trigo)**



Fuente: Elaboración Propia

$COE = 2,9 \%$

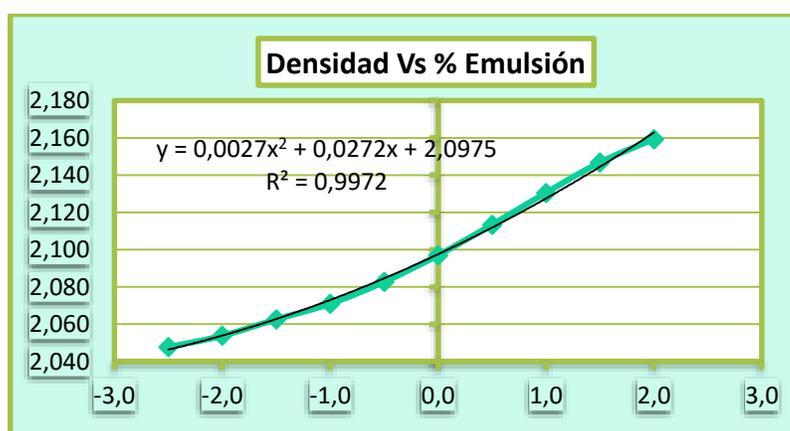
- Muestra 2

**Tabla 36. Resultados del ensayo Marshall para muestra reciclada San Lorencito - Iscayachi**

PORCENTAJE DE EMULSIÓN ADICIONAL	DENSIDAD PROMEDIO (gr/cm <sup>3</sup> )	ESTABILIDAD (libras)	FLUJO (pulg.)	% DE VACIOS DE MEZCLA TOTAL (%)	R.E.V. (RELACION EMULSION VACIOS) (%)	V.A.M. (VACIOS DE AGREGADO MINERAL) (%)
-2,5	2,048	1584,85	8,25	11,66	16,81	14,02
-2,0	2,054	1619,44	11,85	10,76	24,22	14,20
-1,5	2,063	1952,65	12,70	9,74	31,76	14,27
-1,0	2,071	1394,35	12,59	8,73	39,23	14,36
-0,5	2,083	1242,05	13,01	7,56	47,18	14,32
0,0	2,097	1004,13	14,11	6,28	55,72	14,18
0,5	2,113	989,53	16,99	4,89	64,97	13,96
1,0	2,130	849,01	20,08	3,46	74,80	13,71
1,5	2,147	827,41	20,76	2,05	84,82	13,51
2,0	2,159	499,57	21,26	0,81	94,00	13,46
<b>Valor promedio</b>	2,096	1196,299	15,160	6,594	53,351	13,999
<b>Porcentaje de Emulsión Adicional para cada valor promedio</b>	-0,09	-0,07	-0,11	-0,14	-0,16	0,57
<b>PROMEDIO FINAL</b>	<b>0,00</b>					
EL PORCENTAJE ÓPTIMO DE EMULSIÓN ADICIONAL PARA EL RECICLADO DE LA CARPETA ASFÁLTICA DE SAN LORENCITO - ISCAYACHI ES IGUAL AL 0 %.						

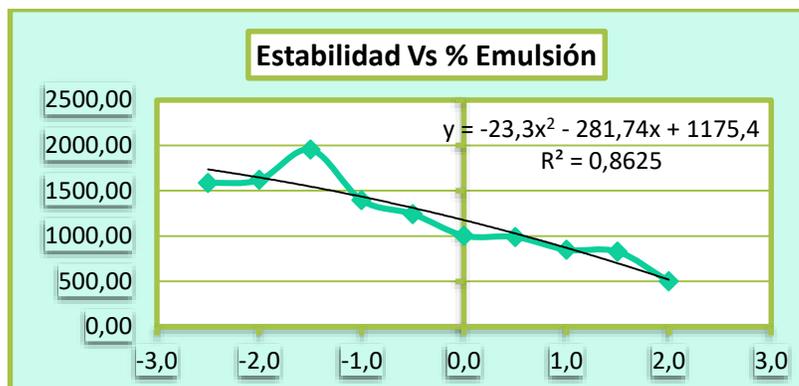
Fuente: Elaboración Propia

**Gráfica 11. Curva Densidad vs. % Emulsión Asfáltica (San Lorencito-Iscayachi)**



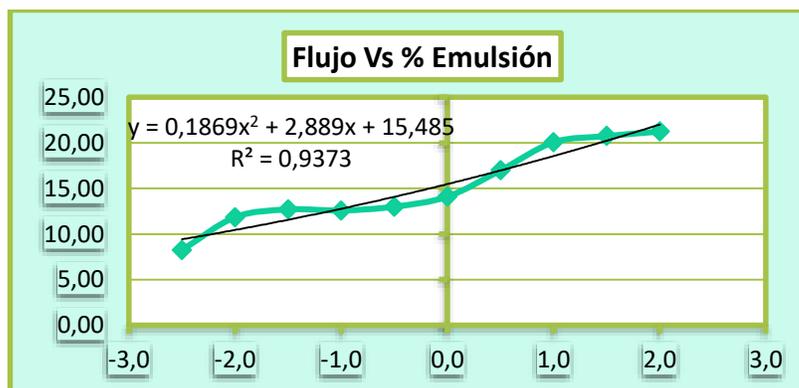
Fuente: Elaboración Propia

**Gráfica 12. Curva Estabilidad vs. % Emulsión Asfáltica (San Lorencito-Iscayachi)**



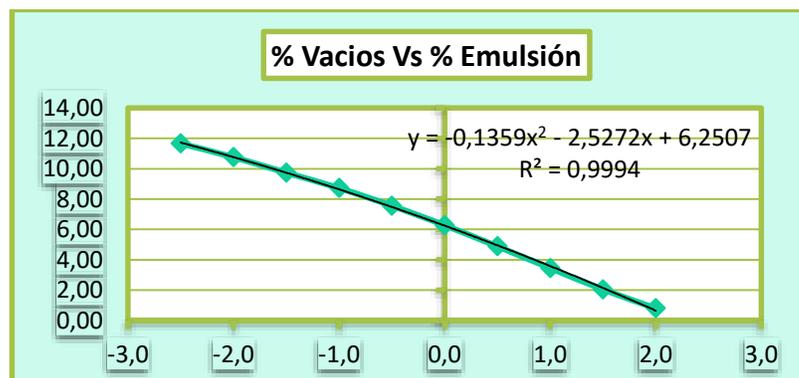
Fuente: Elaboración Propia

**Gráfica 13. Curva Flujo vs. % Emulsión Asfáltica (San Lorencito-Iscayachi)**



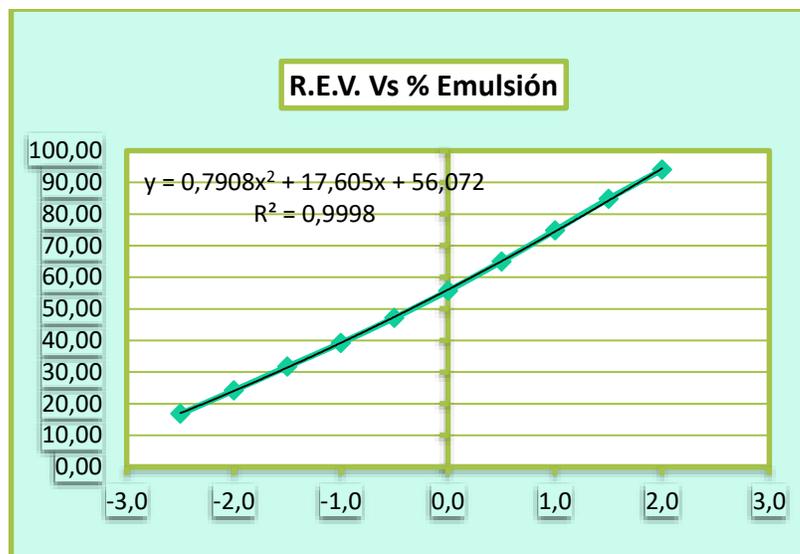
Fuente: Elaboración Propia

**Gráfica 14. Curva % Vacíos vs. % Emulsión Asfáltica (San Lorencito-Iscayachi)**



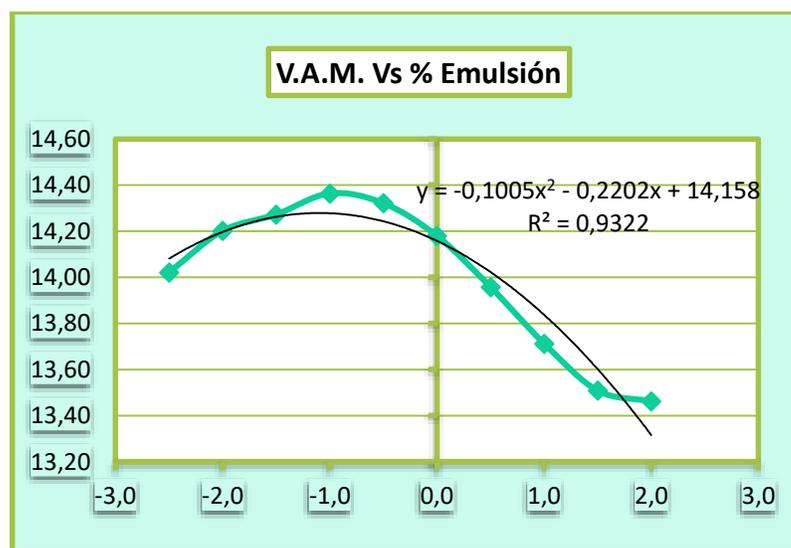
Fuente: Elaboración Propia

**Gráfica 15. Curva Relación Emulsión - Vacíos vs. % Emulsión Asfáltica (San Lorencito-Iscayachi)**



Fuente: Elaboración Propia

**Gráfica 16. Curva Vacíos Agregado Mineral vs. % Emulsión Asfáltica (San Lorencito-Iscayachi)**



Fuente: Elaboración Propia

**COE = 3,6 %**

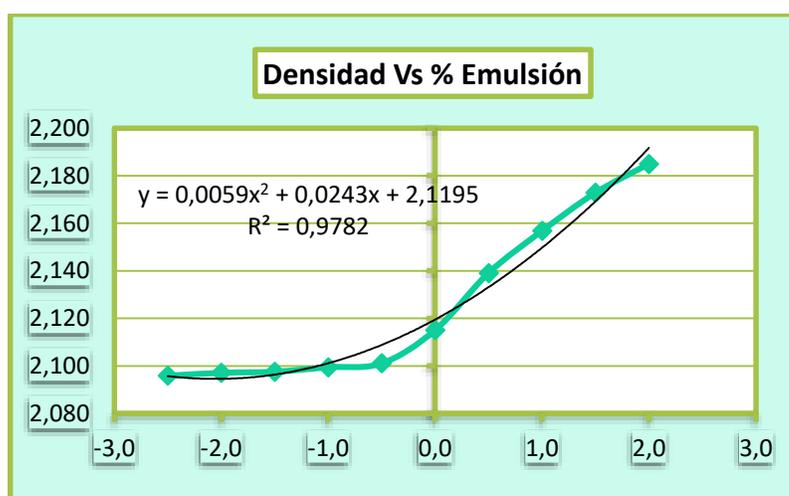
- Muestra 3

**Tabla 37. Resultados del ensayo Marshall para muestra reciclada Universidad**

PORCENTAJE DE EMULSIÓN ADICIONAL	DENSIDAD PROMEDIO (gr/cm <sup>3</sup> )	ESTABILIDAD (libras)	FLUJO (pulg.)	% DE VACIOS DE MEZCLA TOTAL (%)	R.E.V. (RELACIÓN EMULSIÓN VACIOS) (%)	V.A.M. (VACIOS DE AGREGADO MINERAL) (%)
-2,5	2,096	1829,27	4,33	11,56	13,18	13,32
-2,0	2,097	1877,37	7,74	10,85	20,82	13,70
-1,5	2,098	2053,47	10,24	10,17	27,98	14,12
-1,0	2,099	2533,56	13,39	9,43	34,90	14,48
-0,5	2,101	1738,72	14,30	8,70	41,45	14,85
0,0	2,115	1167,03	16,14	7,42	49,60	14,73
0,5	2,139	1026,58	14,11	5,70	59,89	14,20
1,0	2,157	850,70	13,25	4,24	69,60	13,94
1,5	2,173	832,91	12,32	2,84	79,34	13,76
2,0	2,185	799,08	12,20	1,61	88,26	13,73
<b>Valor promedio</b>	2,126	1470,868	11,803	7,251	48,502	14,084
<b>Porcentaje de Emulsión Adicional para cada valor promedio</b>	0,25	0,10	1,84	-0,72	-0,13	1,25
<b>PROMEDIO FINAL</b>	<b>0,43</b>					
EL PORCENTAJE ÓPTIMO DE EMULSIÓN ADICIONAL PARA EL RECICLADO DE LA CARPETA ASFÁLTICA DE LA UNIVERSIDAD ES IGUAL AL 0,43 %.						

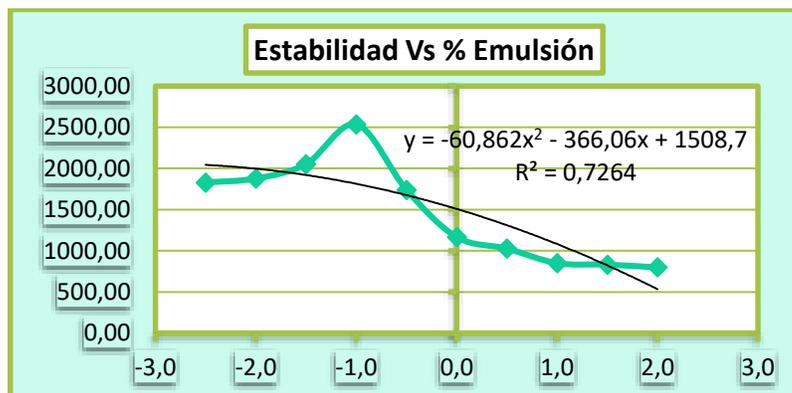
Fuente: Elaboración Propia

**Gráfica 17. Curva Densidad vs. % Emulsión Asfáltica (Universidad)**



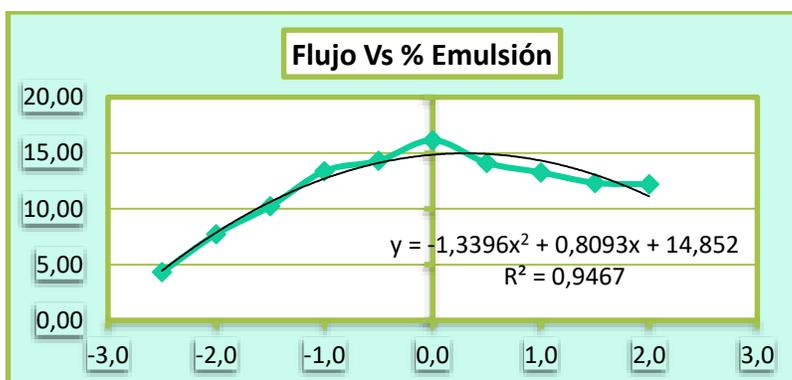
Fuente: Elaboración Propia

**Gráfica 18. Curva Estabilidad vs. % Emulsión Asfáltica (Universidad)**



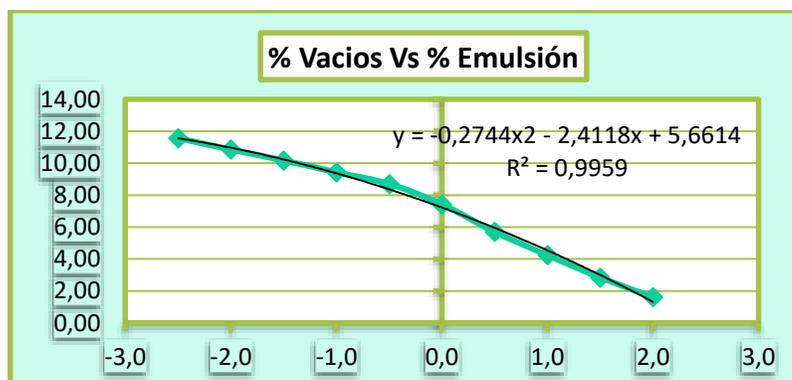
Fuente: Elaboración Propia

**Gráfica 19. Curva Flujo vs. % Emulsión Asfáltica (Universidad)**



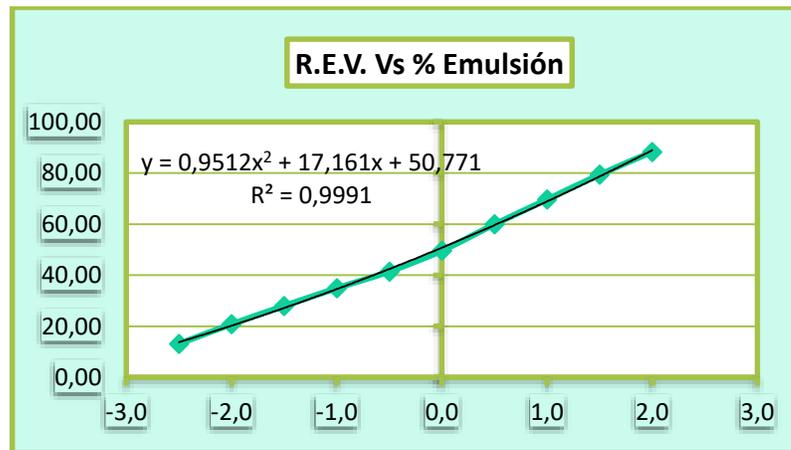
Fuente: Elaboración Propia

**Gráfica 20. Curva % Vacíos vs. % Emulsión Asfáltica (Universidad)**



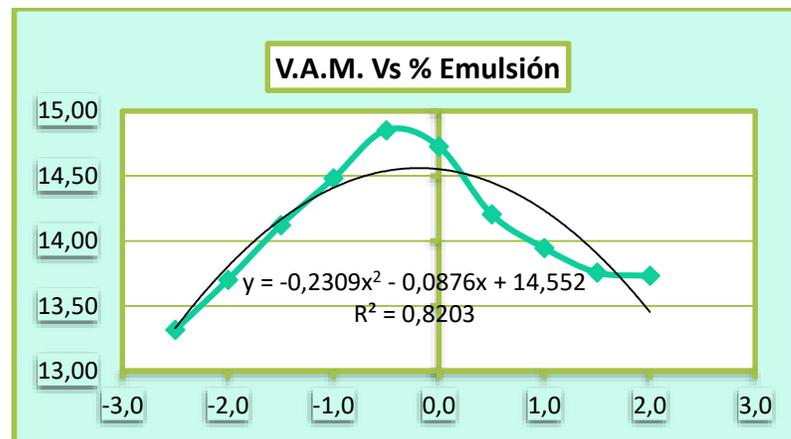
Fuente: Elaboración Propia

**Gráfica 21. Curva Relación Emulsión - Vacíos vs. % Emulsión Asfáltica (Universidad)**



Fuente: Elaboración Propia

**Gráfica 22. Curva Vacíos Agregado Mineral vs. % Emulsión Asfáltica (Universidad)**



Fuente: Elaboración Propia

$$COE = 3,73 \%$$

### 3.6.1.7. Diseño de mezclas recicladas en frío con variación del porcentaje de agua

Las propiedades de la mezcla están íntimamente relacionadas a la densidad obtenida luego de la compactación. De esta forma es necesario optimizar el contenido de agua de compactación para maximizar la densidad de la mezcla

### 3.6.1.7.1. Dosificación variando el porcentaje de Agua

**Tabla 38. Dosificación variando % de Agua (c/General Trigo)**

	VARIACION PORCENTAJE DE AGUA			
	2,0%	2,5%	3,5%	4,0%
Porcentaje de Emulsión (%)	0,7	1,2	1,7	2,2
Porcentaje de Agregado (%)	99,3	98,8	98,3	97,8
Peso de la Emulsión (gr)	39,1	39,1	39,1	39,1
Peso de Agregado (gr)	1165,4	1165,4	1165,4	1165,4
Peso del agua adicional (gr)	2,0	8,0	20,0	26,0
Peso total de la briqueta (gr)	1200	1200	1200	1200

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 39. Dosificación variando % de Agua (San Lorencito - Iscayachi)**

	VARIACION PORCENTAJE DE AGUA			
	2,0%	2,5%	3,5%	4,0%
Porcentaje de Emulsión (%)	0,7	1,2	1,7	2,2
Porcentaje de Agregado (%)	99,3	98,8	98,3	97,8
Peso de la Emulsión (gr)	48,8	48,8	48,8	48,8
Peso de Agregado (gr)	1156,8	1156,8	1156,8	1156,8
Peso del agua adicional (gr)	1,0	7,0	19,0	25,0
Peso total de la briqueta (gr)	1200	1200	1200	1200

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 40. Dosificación variando % de Agua (Universidad)**

	VARIACION PORCENTAJE DE AGUA			
	2,0%	2,5%	3,5%	4,0%
Porcentaje de Emulsión (%)	0,7	1,2	1,7	2,2
Porcentaje de Agregado (%)	99,3	98,8	98,3	97,8
Peso de la Emulsión (gr)	50,6	50,6	50,6	50,6
Peso de Agregado (gr)	1155,2	1155,2	1155,2	1155,2
Peso del agua adicional (gr)	0,9	6,9	18,9	24,9
Peso total de la briqueta (gr)	1200	1200	1200	1200

Fuente: Elaboración Propia

### 3.6.1.7.2. Procedimiento para la obtención del contenido óptimo de agua de compactación

Una vez establecido el contenido óptimo de emulsión, se procede a repetir el proceso anterior (desde el punto 3.5.1.2.) pero esta vez manteniendo el contenido de emulsión fijo y haciendo variar el contenido de agua total para el mezclado variando de  $\pm 0,5\%$  (2,0; 2,5; 3,5 y 4,0 %), con el objetivo de encontrar en contenido óptimo de agua de compactación, donde el indicador será la mezcla con la más alta densidad.

**Figura 91. Briquetas para ensayar**



*Fuente:* Elaboración Propia

**Figura 92. Determinación de la estabilidad y la fluencia**



Fuente: Elaboración Propia

### 3.6.1.7.3. Resultados del ensayo del método de diseño Marshall modificado con variación del porcentaje de agua

- Muestra 1

**Tabla 41. Resultados del ensayo Marshall para el contenido óptimo de agua (c/General Trigo)**

PORCENTAJE DE AGUA	DENSIDAD PROMEDIO (gr/cm <sup>3</sup> )	ESTABILIDAD (libras)	FLUJO (pulg.)	% DE VACIOS DE MEZCLA TOTAL (%)	R.E.V. (RELACIÓN EMULSIÓN VACIOS) (%)	V.A.M. (VACIOS DE AGREGADO MINERAL) (%)
2,0	2,125	3850,22	25,19	3,78	62,88	10,19
2,5	2,164	3860,34	17,72	2,00	76,53	8,53
3,5	2,156	3228,60	22,44	2,40	73,07	8,90
4	2,089	3728,48	20,08	5,43	53,69	11,73
EL PORCENTAJE ÓPTIMO DE AGUA PARA EL RECICLADO DE LA CARPETA ASFÁLTICA DE LA C/GENERAL TRIGO ES IGUAL AL 2,5%.						

Fuente: Elaboración Propia

- Muestra 2

**Tabla 42. Resultados del ensayo Marshall para el contenido óptimo de agua (San Lorencito-Iscayachi)**

PORCENTAJE DE AGUA	DENSIDAD PROMEDIO (gr/cm <sup>3</sup> )	ESTABILIDAD (libras)	FLUJO (pulg.)	% DE VACIOS DE MEZCLA TOTAL (%)	R.B.V. (RELACIÓN EMULSIÓN VACIOS) (%)	V.A.M. (VACIOS DE AGREGADO MINERAL) (%)
2,0	2,119	1795,50	25,21	5,30	60,10	13,28
2,5	2,063	1373,05	27,18	7,79	49,94	15,56
3,5	2,165	1991,82	25,20	3,25	71,49	11,41
4	2,160	1961,74	24,80	3,48	70,06	11,61
EL PORCENTAJE ÓPTIMO DE AGUA PARA EL RECICLADO DE LA CARPETA ASFÁLTICA DE SAN LORENCITO-ISLAYACHI ES IGUAL AL 3,5%.						

Fuente: Elaboración Propia

- Muestra 3

**Tabla 43. Resultados del ensayo Marshall para el contenido óptimo de agua (Universidad)**

PORCENTAJE DE AGUA	DENSIDAD PROMEDIO (gr/cm <sup>3</sup> )	ESTABILIDAD (libras)	FLUJO (pulg.)	% DE VACIOS DE MEZCLA TOTAL (%)	R.B.V. (RELACIÓN EMULSIÓN VACIOS) (%)	V.A.M. (VACIOS DE AGREGADO MINERAL) (%)
2,0	2,192	1668,45	29,93	3,46	71,22	12,01
2,5	2,206	1914,91	26,39	2,84	75,20	11,45
3,5	2,141	1368,59	28,50	5,70	59,48	14,05
4	2,129	1317,32	36,20	6,26	57,05	14,57
EL PORCENTAJE ÓPTIMO DE AGUA PARA EL RECICLADO DE LA CARPETA ASFÁLTICA DE LA UNIVERSIDAD ES IGUAL AL 2,5%.						

Fuente: Elaboración Propia

### 3.7. RESUMEN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 3.7.1. RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE COMPONENTES

##### 3.7.1.1. Material reciclado

**Tabla 44. Resumen de ensayos realizados para el material reciclado**

Ensayo		c/General Trigo	San Lorencito-Iscayachi	Universidad
Centrifugación-ensayo de extracción	Ligante Asfáltico (%)	4,90	3,81	4,35
Agregado Reciclado	Granulometría (%) Tamices	1"	100	100
		3/4"	98,33	99,29
		3/8"	91,56	80,96
		Nº4	67,24	56,03
		Nº8	49,18	39,77
		Nº200	9,88	11,04
	Peso Específico Agregado Grava (gr/cm <sup>3</sup> )		2,28	2,41
Peso Específico Agregado Grava (gr/cm <sup>3</sup> )		2,30	2,36	2,38

	Peso Específico Agregado Fino (gr/cm <sup>3</sup> )	2,37	2,30	2,78
--	---	------	------	------

Fuente: Elaboración Propia

### 3.7.1.2. Emulsión asfáltica

**Tabla 45. Resumen de ensayos realizados de la emulsión asfáltica**

Ensayo		Resultado	ESPECIFICACIONES	
			Mínimo	Máximo
Emulsión Asfáltica	Viscosidad Saybolt Furol 50 °C (seg.)	228,3	100	400
	Residuo por Destilación (%)	88,5	50	70
	Peso Específico (grs./cm <sup>3</sup> )	0,956	1	1,05

Fuente: Elaboración Propia

En la caracterización de la emulsión asfáltica se observó que la viscosidad y el peso específico se encuentra dentro del rango de las especificaciones, por el contrario el residuo por destilación sobrepasa el valor máximo, posiblemente se deba al tiempo y tipo de almacenamiento de la misma provocando la evaporación del agua.

### 3.7.2. ANÁLISIS DE LA MEZCLA RECICLADA POR EL MÉTODO MARSHALL MODIFICADO

#### 3.7.2.1. Análisis del contenido Inicial de Emulsión CIE

**Tabla 46. Resumen de ensayos para la determinación del contenido inicial de emulsión asfáltica**

Método	CONTENIDO INICIAL DE EMULSIÓN ASFÁLTICA (CIE)		Muestra		
			General Trigo	San Lorencito-Iscayachi	Universidad
ABC	% E	Porcentaje en peso de emulsión asfáltica, sobre el peso del árido seco	8,1	9,4	8,9
AI	CEE	Contenido Estimado de Emulsión (%)	1,7	3,6	3,3

Fuente: Elaboración Propia

La aplicación del método ABC resulta más sencilla porque sólo requiere la granulometría del árido recuperado, en cambio el método AI requiere de la

granulometría del árido recuperado, el contenido de asfalto de la carpeta a reciclar y el contenido de asfalto residual de la emulsión asfáltica. Sin embargo, el CIE obtenido por el método ABC resultó muy alto por lo que no se pudo aplicar para determinar el contenido óptimo de emulsión asfáltica (COE), por lo que el valor obtenido por el método AI resultó mucho más razonable el cual fue utilizado para determinar el COE.

### 3.7.2.2. Análisis del diseño de mezclas recicladas en frío con variación del porcentaje de emulsión asfáltica

Con el Porcentaje de Emulsión Adicional para el Reciclado determinado anteriormente, el cual se representa en las siguientes graficas determinando los valores de Densidad, Estabilidad, Flujo, % de Vacíos, Relación Emulsión – Vacíos, y Vacíos de Agregado Mineral correspondientes para el COE.

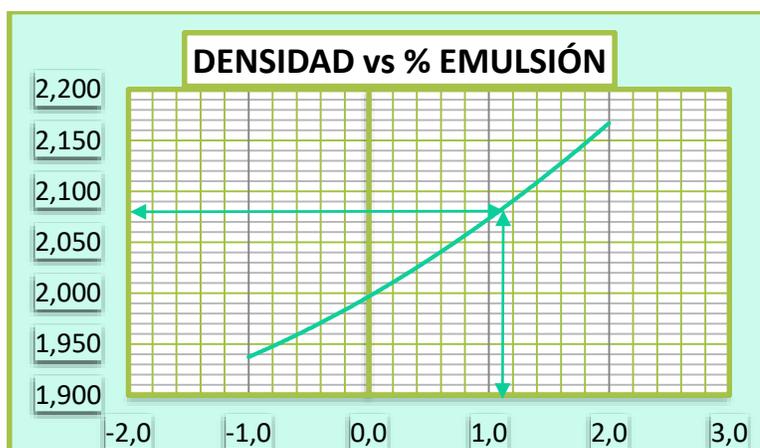
**Tabla 47. Resumen de resultados de los porcentajes de emulsión asfáltica**

	C/GENERAL TRIGO	SAN LORENCITO-ISCAYACHI	UNIVERSIDAD
% CONTENIDO ÓPTIMO DE EMULSIÓN ADICIONAL	1,18	0	0,43
% CONTENIDO ÓPTIMO DE EMULSIÓN (COE)	2,9	3,6	3,73

Fuente: Elaboración Propia

- **Muestra 1**

**Gráfica 23. Análisis Curva Densidad vs. % Emulsión Asfáltica (c/General Trigo)**



*Fuente:* Elaboración Propia

Se puede observar en la gráfica que la densidad es directamente proporcional al % de emulsión, es decir que a mayor % de emulsión mayor densidad.

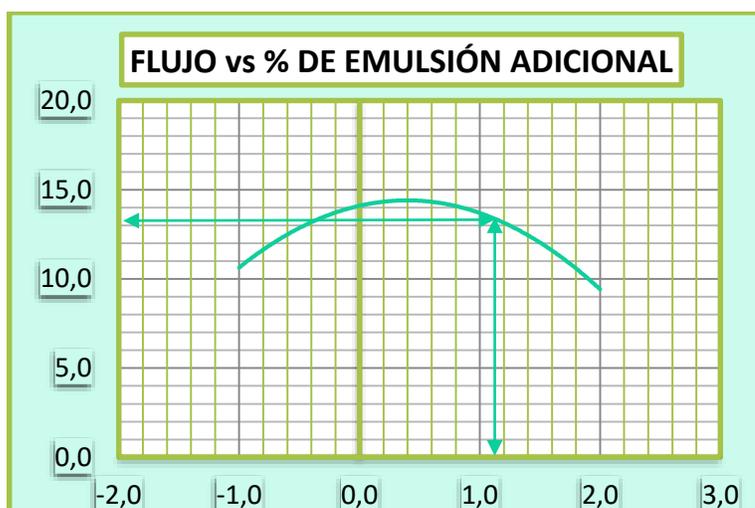
**Gráfica 24. Análisis Curva Estabilidad vs. % Emulsión Asfáltica (c/General Trigo)**



*Fuente:* Elaboración Propia

En la gráfica se observa que la Estabilidad baja a medida que el % de emulsión aumenta, entonces a mayor % de emulsión, menor la Estabilidad.

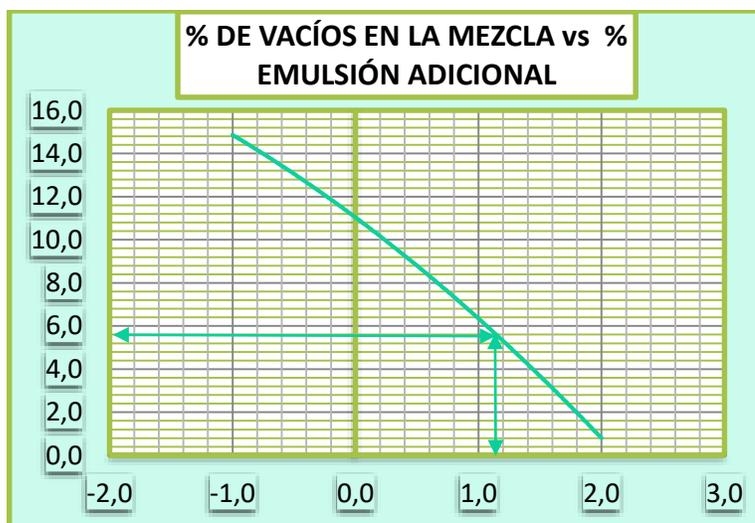
**Gráfica 25. Análisis Curva Flujo vs. % Emulsión Asfáltica (c/General Trigo)**



*Fuente:* Elaboración Propia

En la gráfica se observa dos secciones donde el Flujo sube a medida que el % de emulsión aumenta hasta cierto punto donde al aumentar el % de emulsión el flujo empieza a descender, en este caso el flujo buscado recae en la segunda sección.

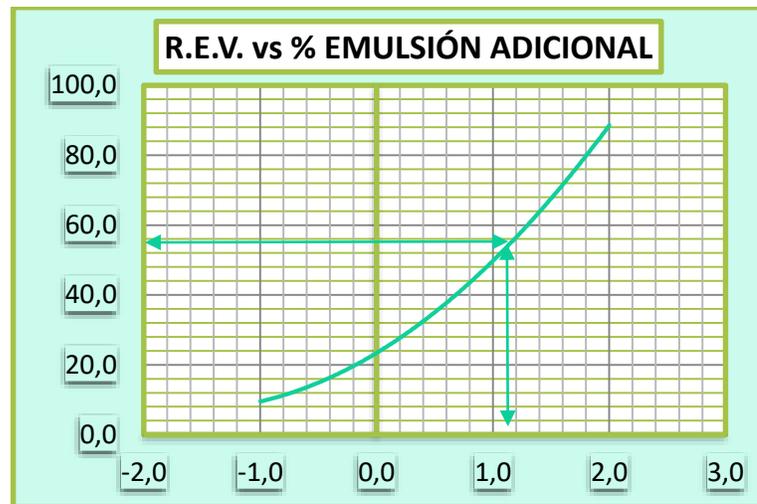
**Gráfica 26. Análisis Curva % Vacíos vs. % Emulsión Asfáltica (c/General Trigo)**



*Fuente:* Elaboración Propia

Se observa en la gráfica que el % de Vacíos es inversamente proporcional al % de emulsión, entonces a mayor % de emulsión, menor % de Vacíos.

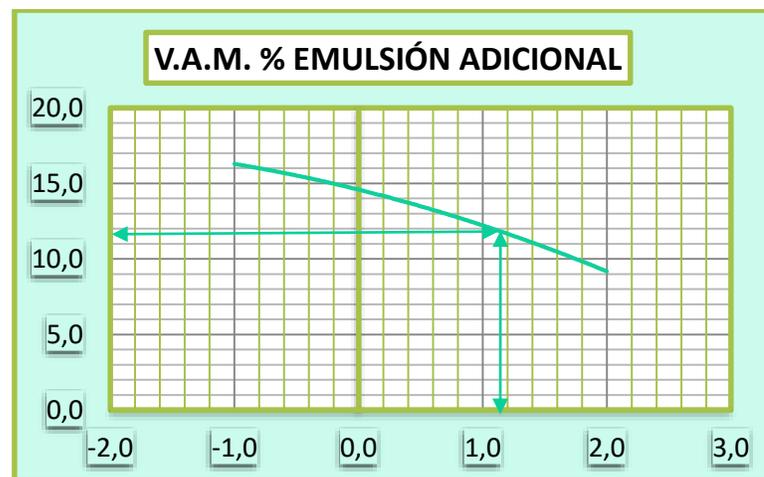
**Gráfica 27. Análisis Curva Relación Emulsión - Vacíos vs. % Emulsión Asfáltica (c/General Trigo)**



*Fuente:* Elaboración Propia

En la gráfica se observa que la relación emulsión - vacíos es proporcional al % de emulsión, entonces a mayor % de emulsión, mayor la relación emulsión - vacíos.

**Gráfica 28. Análisis Curva Vacíos Agregado Mineral vs. % Emulsión Asfáltica (c/General Trigo)**

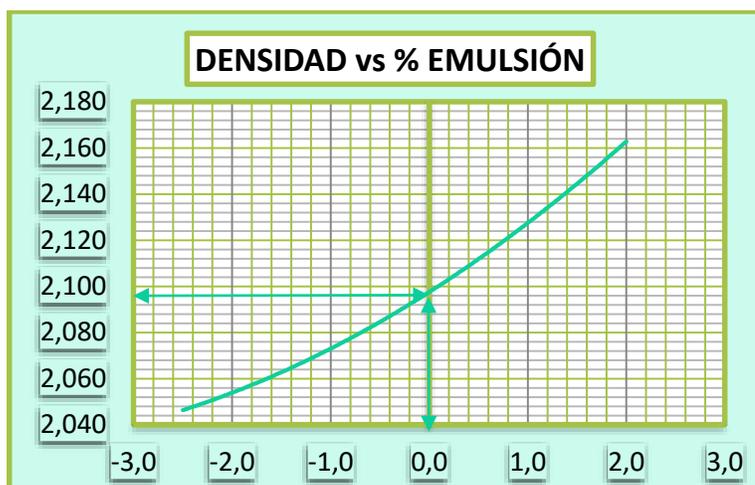


*Fuente:* Elaboración Propia

La grafica muestra que los Vacíos del Agregado Mineral son inversamente proporcionales al % de emulsión asfáltica, por lo que a mayor porcentaje de emulsión menor serán los Vacíos de Agregado Mineral.

- **Muestra 2**

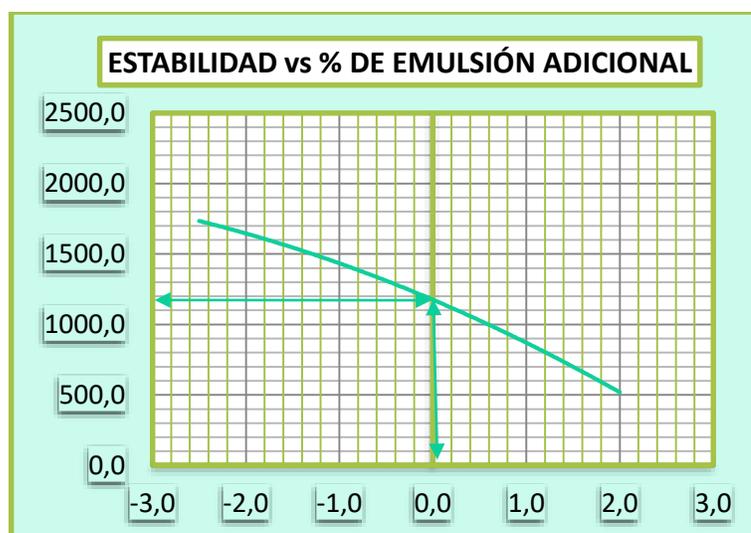
**Gráfica 29. Análisis Curva Densidad vs. % Emulsión Asfáltica (San Lorencito-Iscayachi)**



*Fuente:* Elaboración Propia

Se observa que la densidad es proporcional al % de emulsión asfáltica, es decir que a mayor % de emulsión, mayor densidad.

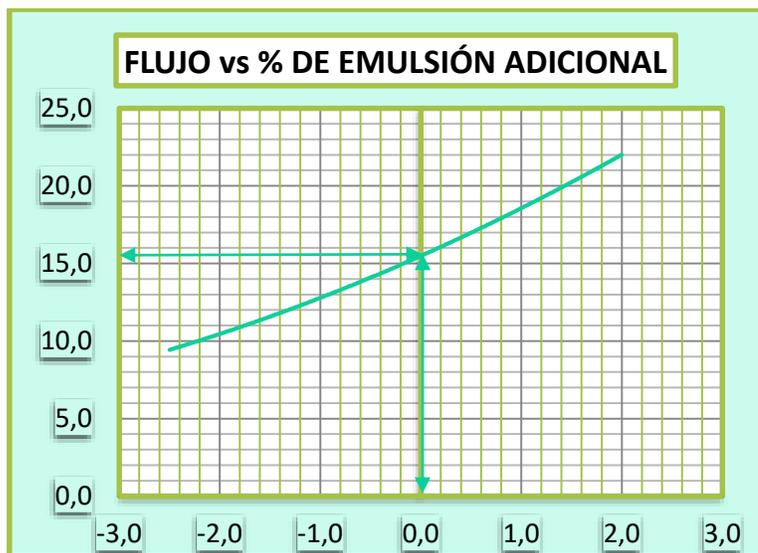
**Gráfica 30. Análisis Curva Estabilidad vs. % Emulsión Asfáltica (San Lorencito-Iscayachi)**



*Fuente:* Elaboración Propia

En la gráfica se observa que la Estabilidad es inversamente proporcional al % de emulsión, cuando es mayor el % de emulsión, es menor la Estabilidad.

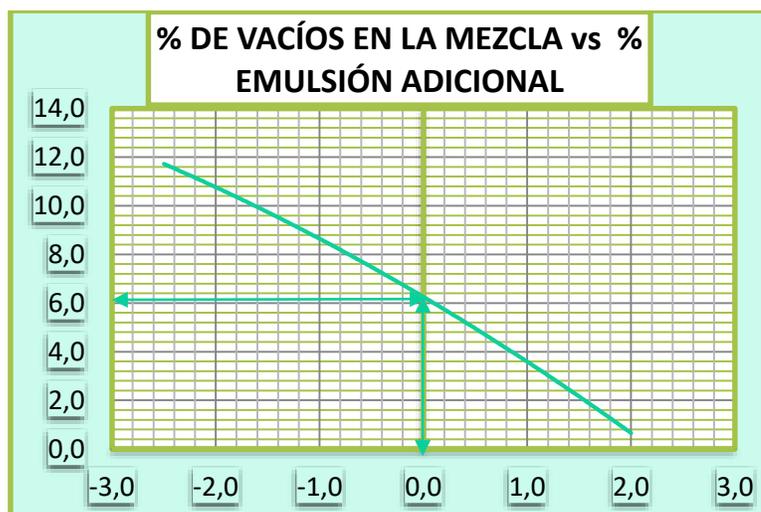
**Gráfica 31. Análisis Curva Flujo vs. % Emulsión Asfáltica (San Lorencito-Iscayachi)**



*Fuente:* Elaboración Propia

Se observa que en la gráfica el flujo es proporcional al % de emulsión asfáltica, es decir que a mayor % de emulsión, mayor será el flujo.

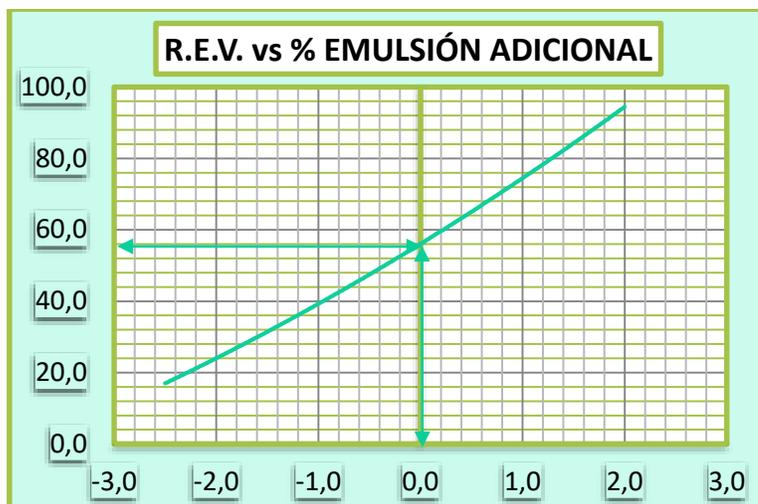
**Gráfica 32. Análisis Curva % Vacíos vs. % Emulsión Asfáltica (San Lorencito-Iscayachi)**



*Fuente:* Elaboración Propia

En la gráfica el % de vacíos es inversamente proporcional al % de emulsión, entonces cuando es mayor el % de emulsión, es menor el % de vacíos.

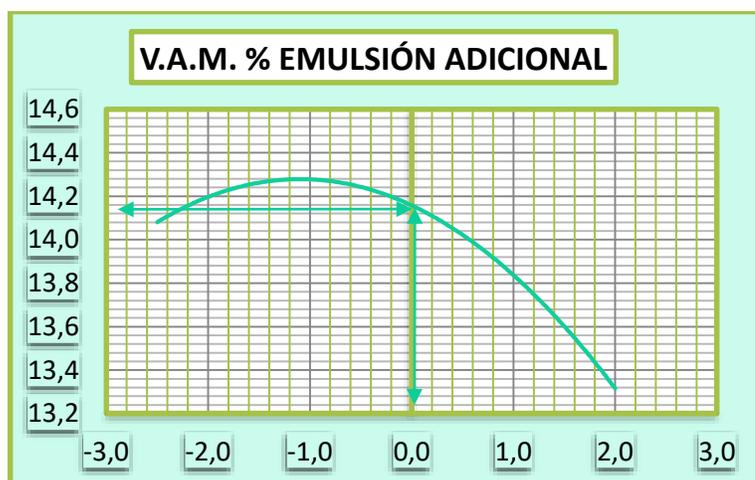
**Gráfica 33. Análisis Curva Relación Emulsión - Vacíos vs. % Emulsión Asfáltica (San Lorencito-Iscayachi)**



*Fuente:* Elaboración Propia

La gráfica muestra que la relación emulsión – vacíos es proporcional al % de emulsión, ósea a mayor % de emulsión, mayor será la relación emulsión – vacíos.

**Gráfica 34. Análisis Curva Vacíos Agregado Mineral vs. % Emulsión Asfáltica (San Lorencito-Iscayachi)**

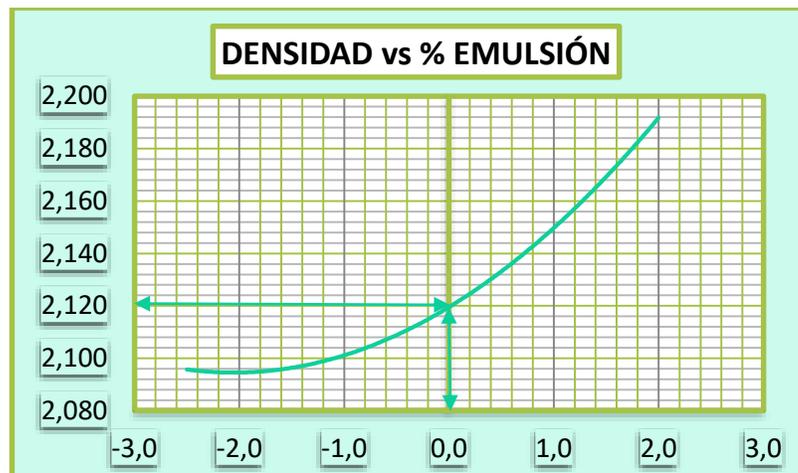


*Fuente:* Elaboración Propia

Se observa que los Vacíos del Agregado Mineral tiende a aumentar hasta cierto punto donde a partir de ahí disminuye al incrementarse el porcentaje de emulsión, por lo que el valor de Vacíos de Agregado Mineral donde intersecta el % de emulsión adicional se encuentra en la segunda parte de la curva.

- **Muestra 3**

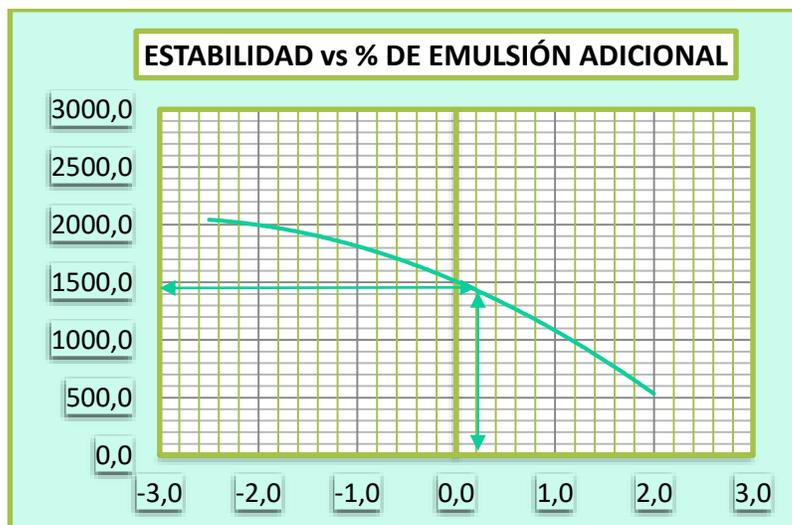
**Gráfica 35. Análisis Curva Densidad vs. % Emulsión Asfáltica (Universidad)**



*Fuente:* Elaboración Propia

En la gráfica se observa que la densidad sube a medida que el % de emulsión aumenta, entonces a mayor % de emulsión, mayor es la densidad.

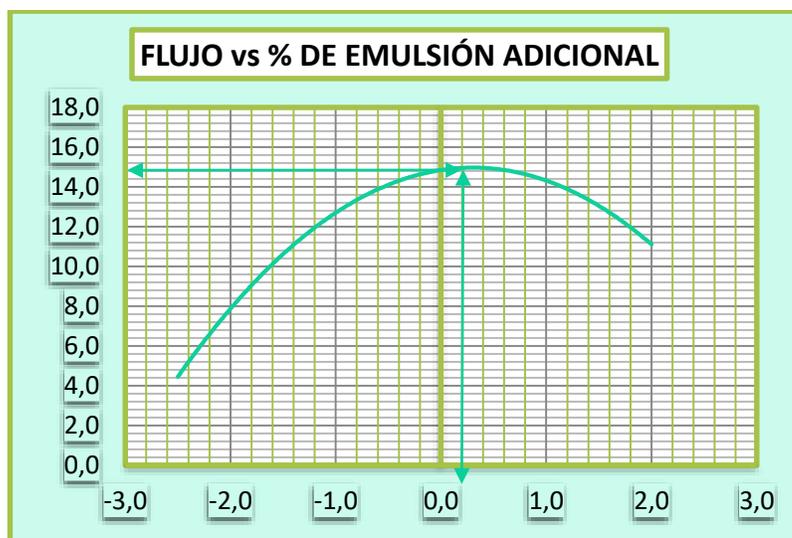
**Gráfica 36. Análisis Curva Estabilidad vs. % Emulsión Asfáltica (Universidad)**



*Fuente:* Elaboración Propia

Se observa que en la gráfica la estabilidad es inversamente proporcional al % de emulsión, entonces a mayor % de emulsión, es menor la estabilidad.

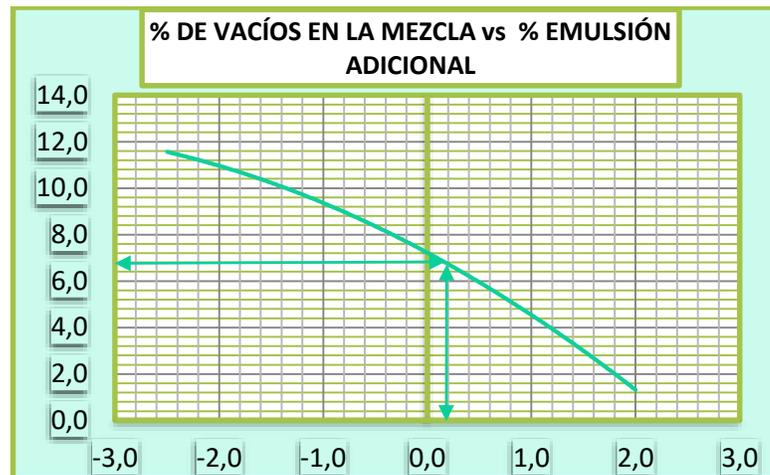
**Gráfica 37. Análisis Curva Flujo vs. % Emulsión Asfáltica (Universidad)**



*Fuente:* Elaboración Propia

Se observa que el flujo sube a medida que el % de emulsión aumenta hasta cierto punto en donde al aumentar el % de emulsión, el flujo disminuye, en nuestro caso que el % de emulsión adicional recae sobre el máximo valor de flujo en la curva.

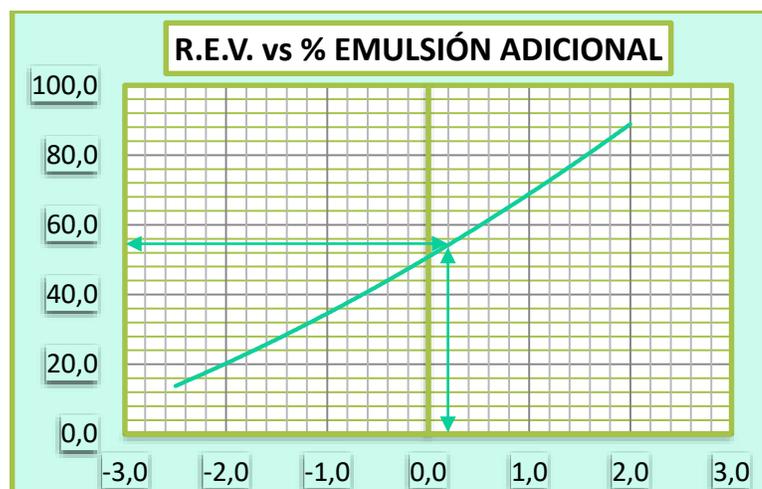
**Gráfica 38. Análisis Curva % Vacíos vs. % Emulsión Asfáltica (Universidad)**



*Fuente:* Elaboración Propia

En este caso la gráfica muestra que el % de vacíos es inversamente proporcional al % de emulsión asfáltica, es decir que cuando aumenta el % de emulsión, mayor es el % de vacíos en la mezcla.

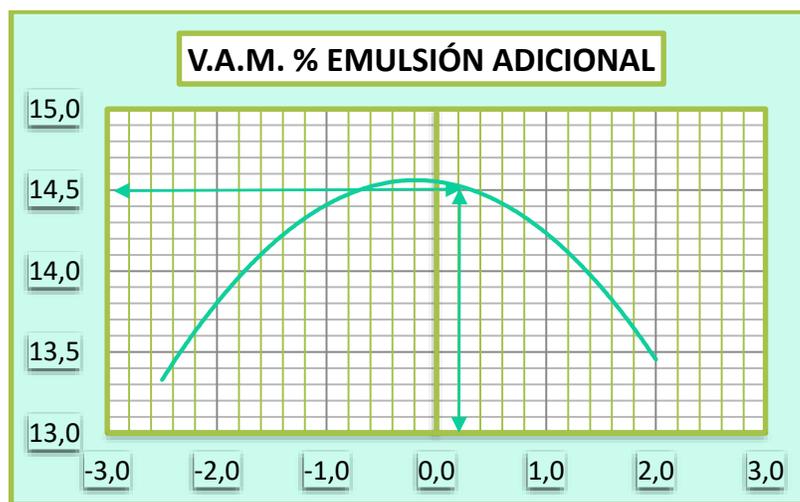
**Gráfica 39. Análisis Curva Relación Emulsión - Vacíos vs. % Emulsión Asfáltica (Universidad)**



*Fuente:* Elaboración Propia

La gráfica muestra que la relación emulsión – vacíos es proporcional al % de emulsión asfáltica, es decir que a mayor % de emulsión, mayor será la relación emulsión–vacíos.

**Gráfica 40. Análisis Curva Vacíos Agregado Mineral vs. % Emulsión Asfáltica (Universidad)**



*Fuente:* Elaboración Propia

En la gráfica se observa dos secciones en la primera los vacíos del agregado mineral sube a medida que el % de emulsión aumenta hasta cierto punto en donde al aumentar el % de emulsión los vacíos del agregado mineral empieza a bajar, por tanto el valor de Vacíos de Agregado Mineral donde se encuentra el % de emulsión adicional está en la segunda sección de la curva.

### 3.7.2.3. Análisis del diseño de mezclas recicladas en frío con variación del porcentaje de agua

**Tabla 48. Resumen de resultados del contenido óptimo de agua**

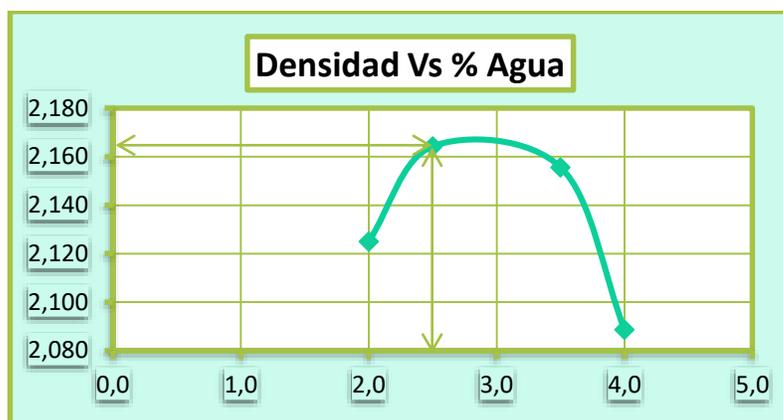
	C/ GENERAL TRIGO	SAN LORENCITO- ISCAYACHI	UNIVERSIDAD
% ÓPTIMO DE AGUA	2,5	3,5	2,5

*Fuente:* Elaboración Propia

La gráfica densidad vs % de agua nos sirve para poder determinar el contenido óptimo de agua de compactado.

- **Muestra 1**

**Gráfica 41. Análisis Curva Densidad vs. % Agua (c/ General Trigo)**

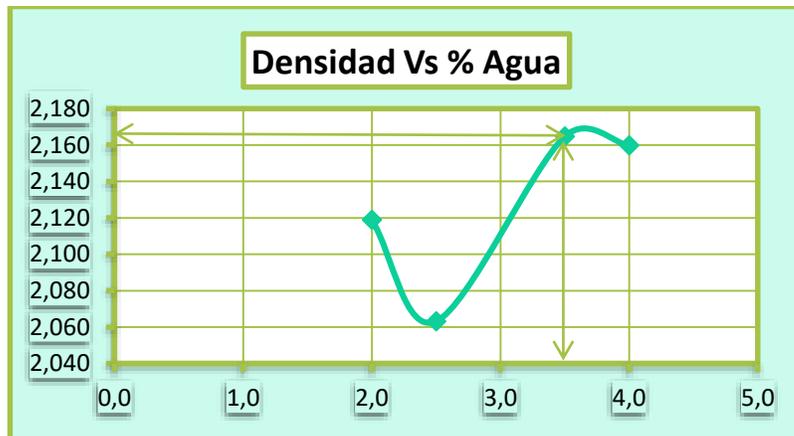


*Fuente:* Elaboración Propia

En la gráfica se observan dos secciones la primera a mayor % de agua mayor densidad, hasta la densidad máxima 2,5 % de agua que es el óptimo para la compactación a partir de ese punto a mayor % de agua menor densidad.

- **Muestra 2**

**Gráfica 42. Análisis Curva Densidad vs. % Agua (San Lorencito-Iscayachi)**

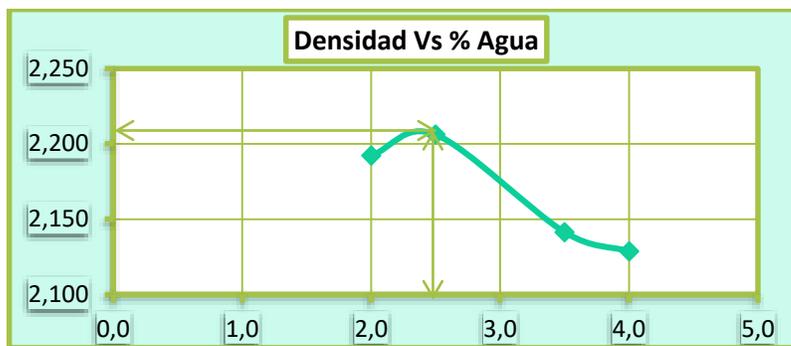


*Fuente:* Elaboración Propia

En este caso se observa que la gráfica oscila y no tiene una tendencia definida, donde la mayor densidad nos da 3,5 % de agua óptimo.

- **Muestra 3**

**Gráfica 43. Análisis Curva Densidad vs. % Agua (Universidad)**



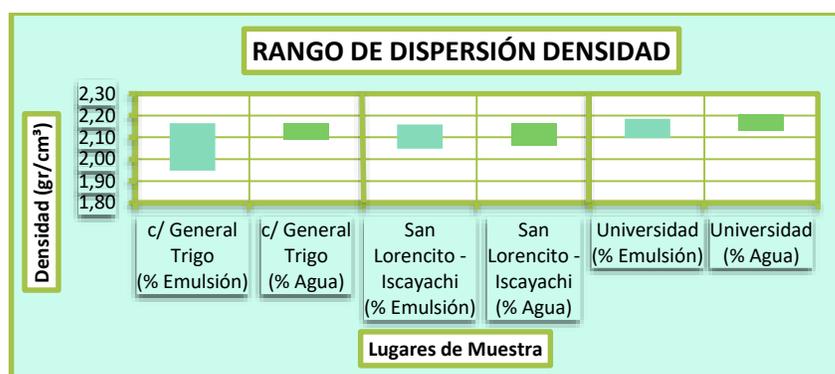
Fuente: Elaboración Propia

En la gráfica observamos que mayor % de agua mayor densidad, hasta la densidad máxima que es 2,5 % de agua, siendo el óptimo, a partir de ese punto a mayor % de agua menor densidad.

### 3.7.2.4. Análisis de rangos de dispersión de los ensayos realizados

Si se analiza el resultado de los parámetros del proceso de diseño de la mezcla, y se toman los valores extremos de ellos (máximo-mínimo), resultantes en cada etapa (1°: % emulsión variable-% agua total fijo y 2°: % emulsión fijo-% agua total variable), en las gráficas posteriores, en ellas se ven los rangos de dispersión obtenidos en los ensayos.

Gráfica 44. Análisis Rango de dispersión Densidad

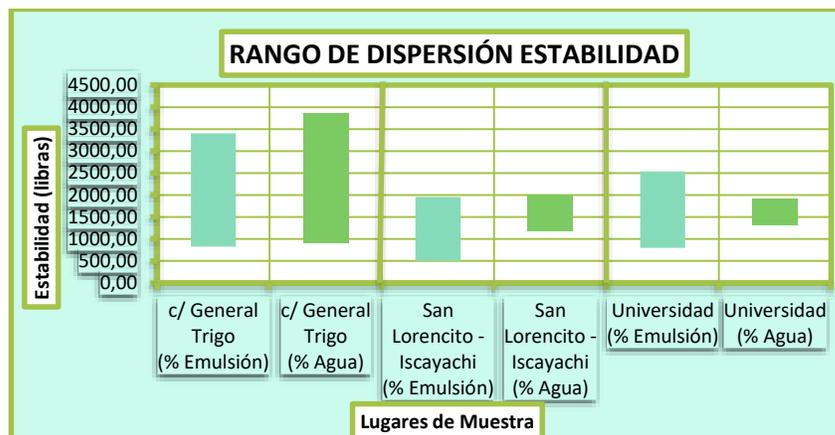


Fuente: Elaboración Propia

Se puede observar que la densidad, es generalmente homogénea en los resultados de la primera y segunda etapa, con excepción de la muestra de c/General Trigo

donde existe más dispersión una de la otra, pero en general analizando las tres muestras los resultados se encuentran homogéneos entre sí.

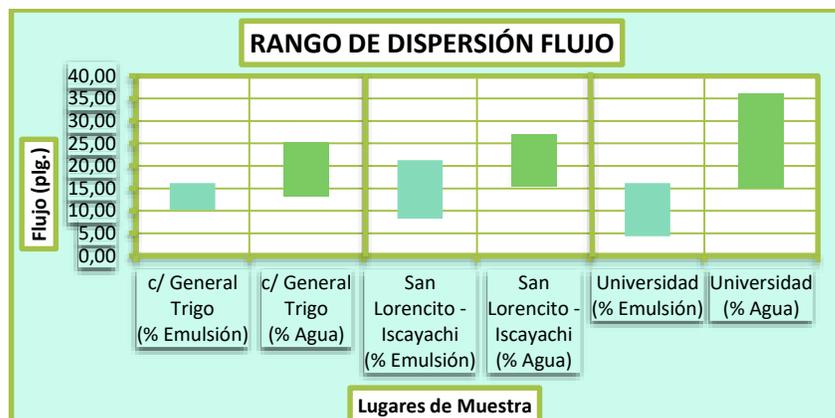
**Gráfica 45. Análisis Rango de dispersión Estabilidad**



*Fuente:* Elaboración Propia

En cuanto a la estabilidad, excepto para la c/General Trigo, las otras dos muestras se ven homogéneas entre ellas como también la primera etapa como la segunda de ambas, en cambio la primera muestra es homogénea entre ella, y presenta la estabilidad más alta.

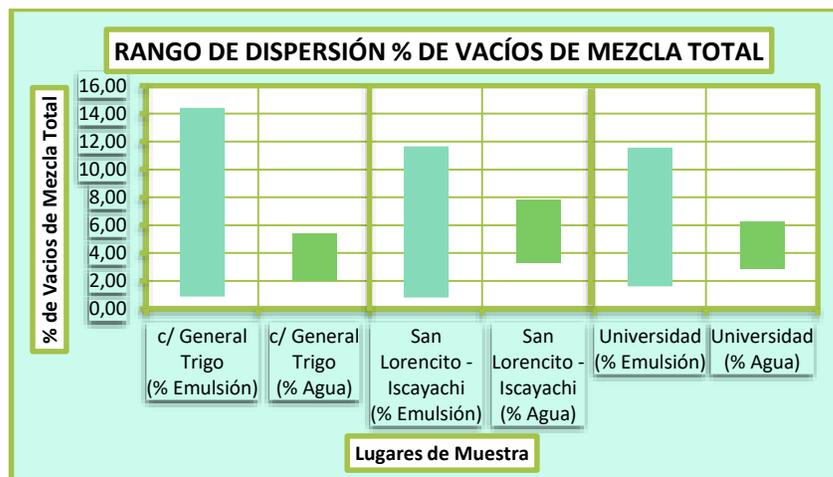
**Gráfica 46. Análisis Rango de dispersión Flujo**



*Fuente:* Elaboración Propia

En cuanto al flujo se observa que la dispersión entre la primera etapa con la segunda de cada muestra no es homogénea.

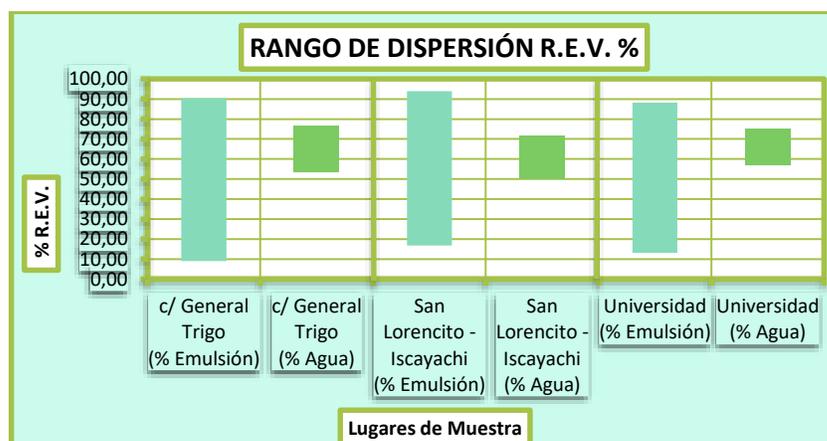
**Gráfica 47. Análisis Rango de dispersión % de Vacíos**



*Fuente:* Elaboración Propia

En el % de vacíos se observa que la dispersión de la primera etapa es mayor a la de la segunda, lo que quiere decir que el % de vacíos no es muy sensible a la variación del contenido de agua, pero si lo es a la variación del contenido de emulsión, también se observa que hay más homogeneidad en la primera etapa que en la segunda de las muestras.

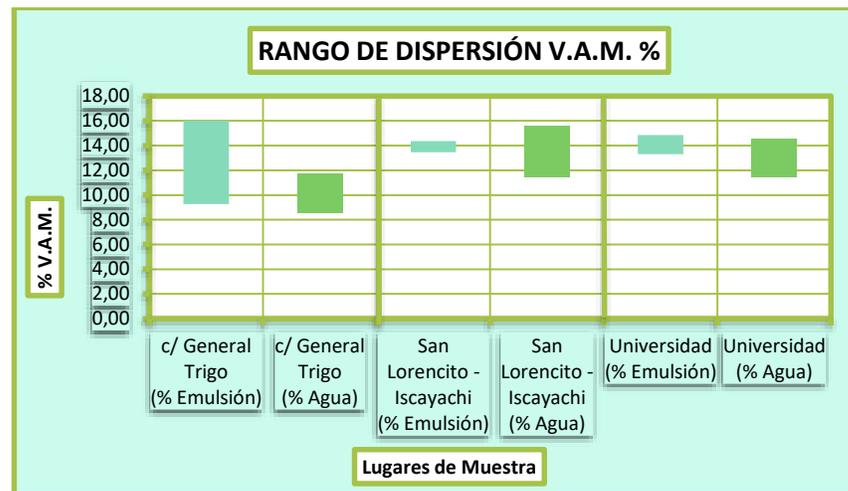
**Gráfica 48. Análisis Rango de dispersión % R.E.V.**



*Fuente:* Elaboración Propia

En la relación emulsión - vacíos se observa que la dispersión de la primera etapa es mayor que la segunda, lo que nos indica que la relación emulsión - vacíos (R.E.V.) no es muy sensible a la variación del % de contenido de agua, pero si lo es a la variación del % de contenido de emulsión, también se puede observar que hay homogeneidad tanto en la primera etapa como en la segunda etapa de las muestras.

**Gráfica 49. Análisis Rango de dispersión % V.A.M.**



*Fuente:* Elaboración Propia

Respecto a los vacíos de agregado mineral, no hay una tendencia muy marcada si se compara la primera etapa con la segunda etapa, ni tampoco hay una tendencia entre las muestras.

### 3.7.2.5. Análisis comparativo entre las muestras recicladas

Si se analiza el resultado de los parámetros evaluados en el proceso de diseño o se analiza de manera general, como ser la experiencia en laboratorio, para cada muestra reciclada en ambos casos se da un mejor resultado en la muestra 1, que es la de la c/ General Trigo.

Realizando un análisis entre las especificaciones de las características y propiedades iniciales de las carpetas asfálticas recicladas con el objetivo de ver

qué diferencias existen entre las mismas, para que afecten en los resultados finales obtenidos de esta investigación.

Se obtiene la información de las tres entidades que realizaron las carpetas asfálticas obteniendo la siguiente información:

- **Muestra 1**

Para la muestra 1 ubicada en la calle General Trigo realizada por la Alcaldía Municipal de Tarija se utilizó las siguientes características para la carpeta asfáltica:

**Tabla 49. Características Iniciales Asfaltado c/ General Trigo**

PROYECTO: ASFALTADO C/ GENERAL TRIGO		
DESCRIPCIÓN ASFALTO		
GRADO PENETRACIÓN ASFALTO		85 - 100
PESO ESPECÍFICO CEMENTO ASFALTICO		1,001 gr/cm <sup>3</sup>
DESCRIPCIÓN AGREGADO		
PESO ESPECÍFICO AGREGADO		2,642 gr/cm <sup>3</sup>
DOSIFICACIÓN		
GRAVA	INTERMEDIA	ARENA
1"	1/2"	N°4
22%	29%	49%
RESULTADOS MARSHALL		
Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )		2,335
% Vacíos		3
R.B.V. (%)		78,5
Estabilidad (Lb)		2618,1
V.A.M. (%)		17,66
Fluencia (pulg)		11,9
% ÓPTIMO DE ASFALTO PROPUESTO		5,64

*Fuente:* Elaboración Propia

- **Muestra 2**

Para la muestra 2 ubicada en el tramo San Lorencito - Iscayachi realizada por el Servicio de Caminos (SEDECA) se utilizó las siguientes características para la carpeta asfáltica:

**Tabla 50. Características Iniciales Asfaltado San Lorencito - Iscayachi**

PROYECTO: ASFALTADO SAN LORENCITO - ISCAYACHI		
DESCRIPCIÓN ASFALTO		
<b>GRADO PENETRACIÓN ASFALTO</b>	85 - 100	
<b>PESO ESPECÍFICO CEMENTO ASFALTICO</b>	1,001 gr/cm <sup>3</sup>	
DESCRIPCIÓN AGREGADO		
<b>PESO ESPECÍFICO AGREGADO</b>	2,85 gr/cm <sup>3</sup>	
DOSIFICACIÓN		
GRAVA	INTERMEDIA	ARENA
1"	1/2"	N°4
19%	29%	52%
RESULTADOS MARSHALL		
<b>Densidad (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	2,458	
<b>% Vacíos</b>	5	
<b>R.B.V. (%)</b>	70,2	
<b>Estabilidad (Lb)</b>	2000	
<b>V.A.M. (%)</b>	19,45	
<b>Fluencia (pulg)</b>	8,52	
<b>% ÓPTIMO DE ASFALTO PROPUESTO</b>	5,8	

*Fuente:* Elaboración Propia

- **Muestra 3**

Para la muestra 3 ubicada en el Campus Universitario de la U.A.J.M.S. realizada por la empresa Erika s.r.l. se utilizó las siguientes características para la carpeta asfáltica:

**Tabla 51. Características Iniciales Asfaltado Campus Universitario UA.J.M.S.**

<b>PROYECTO: ASFALTADO CAMPUS UNIVERSITARIO U.A.J.M.S.</b>		
<b>DESCRIPCIÓN ASFALTO</b>		
<b>GRADO PENETRACIÓN ASFALTO</b>	85 - 100	
<b>PESO ESPECÍFICO CEMENTO ASFALTICO</b>	1,001 gr/cm <sup>3</sup>	
<b>DESCRIPCIÓN AGREGADO</b>		
<b>PESO ESPECÍFICO AGREGADO</b>	2,642 gr/cm <sup>3</sup>	
<b>DOSIFICACIÓN</b>		
<b>GRAVA</b>	<b>INTERMEDIA</b>	<b>ARENA</b>
1"	1/2"	N°4
22%	29%	49%
<b>RESULTADOS MARSHALL</b>		
<b>Densidad (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	2,335	
<b>% Vacíos</b>	3	
<b>R.B.V. (%)</b>	78,5	
<b>Estabilidad (Lb)</b>	2618,1	
<b>V.A.M. (%)</b>	17,66	
<b>Fluencia (pulg)</b>	11,9	
<b>% ÓPTIMO DE ASFALTO PROPUESTO</b>	5,64	

*Fuente:* Elaboración Propia

Al reunir la información de las características iniciales de cada lugar se averiguo que en la c/ General Trigo los del Municipio habían comprado la carpeta asfáltica a la empresa Erika, lo que significa que las carpetas de la c/ General Trigo y la del campus universitario de la UA.J.M.S. tienen la mismas características tanto en el origen del agregado (rio Guadalquivir), granulometría, dosificación y % de cemento asfáltico.

Los mejores resultados de la c/ General Trigo se debe a que el asfalto no tenía fallas estructurales simplemente superficiales, por el contrario el campus universitario se observaban fallas estructurales esto no a causa del

envejecimiento debido al tiempo porque la primera muestra es más antigua que la segunda, si no al deterioro del pavimento debido a una serie de factores que no se pueden saber con precisión al menos que se realice una evaluación, pero debido a comentarios se puede especular, fisuras y grietas por fatigamiento, deformaciones de la subrasante, baja capacidad de soporte de la subrasante, espesor de estructura insuficiente de las capas inferiores, ya que no se cuenta con una buena subrasante debido a que todo el sector del Tejar es arcilla negra y la capa base con la sub base sumaba un espesor de 15 cm. ese espesor era muy bajo lo que las fallas se vieron reflejadas en la capa de rodadura

Lo mismo paso en el tramo San Lorencito – Iscayachi la carpeta asfáltica cumplía con las especificaciones técnicas pero debido a otras causas la capa de rodadura se vio afectada con fallas estructurales, esto debido a varios factores los cuales pueden ser el agrietamiento térmico debido a que se utilizó un cemento asfáltico no adecuado para climas con bajas temperaturas como las que hay en Iscayachi, materiales inadecuados, problemas de drenaje que afectan los materiales granulares lo cual fue el más grande problema en ese tramo.

Con todo lo antes expuesto se puede decir que en el reciclado de pavimentos para tener buenos resultados influye el envejecimiento y el estado de la capa de rodadura ya sea por fallas en la misma o por fallas provocadas por las capas inferiores, no es recomendado utilizar capas de rodadura con fallas estructurales, pero si se pueden usar capas de rodadura con fallas superficiales como ser fisuras, piel de cocodrilo, etc.

### **3.7.3. ANÁLISIS DE COSTOS**

A continuación se muestran las tablas de precios unitarios y de costo total de los tres tipos de mezclas asfálticas con el fin de poder tener una comparación en costos de una carpeta asfáltica con emulsión asfáltica, una carpeta asfáltica con cemento asfáltico y por último el fin de la investigación una carpeta asfáltica reciclada con emulsión asfáltica.

### 3.7.3.1. Precios unitarios

- Muestra 1

Tabla 52. Análisis de Precios Unitarios de la Carpeta Asfáltica con Emulsión (c/General Trigo)

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS MEZCLA EN FRÍO CON EMULSIÓN ASFÁLTICA (C/GENERAL TRIGO)				
<b>DATOS GENERALES:</b>				
<b>Actividad:</b>	Carpeta asfáltica con emulsión asfáltica			
<b>Cantidad:</b>	32,5			
<b>Unidad:</b>	m2			
<b>Moneda:</b>	Bolivianos			
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
<b>1. MATERIALES</b>				
Emulsión Asfáltica	lt	97,58	20	1951,6
Grava triturada clasificada 3/4"	m3	0,48	165	79,2
Grava triturada clasificada 3/8"	m3	0,35	165	57,75
Arena clasificada	m3	0,49	130	63,7
Diésel	lt	18	3,75	67,5
<b>TOTAL COSTO DE MATERIALES:</b>				<b>2219,75</b>
<b>2. MANO DE OBRA</b>				
Chofer	hr	0,01	16	0,19
Operador de equipo pesado	hr	0,82	24	19,68
Operador de equipo liviano	hr	0,08	18	1,44
Operador en planta	hr	0,1	24	2,4
Ayudante de maquinaria y equipo	hr	0,03	16	0,48
Ayudante	hr	1,8	23	41,4
Peón	hr	0,072	12	0,864
<b>SUB TOTAL MANO DE OBRA:</b>				<b>66,456</b>
Cargas Sociales	55% del sub total mano de obra			36,55
Impuestos al valor agregado	14,94% de la suma del sub total de mano de obra más carga social			15,39
<b>TOTAL MANO DE OBRA:</b>				<b>118,40</b>
<b>2. HERRAMIENTAS Y EQUIPO</b>				
Cargador frontal	hr	0,0001	423	0,0423
Compactador de rodillo liso	hr	0,035	302	10,57
Distribuidor de mezcla autopropulsado	hr	0,028	460	12,88
Escoba mecánica autopropulsada	hr	0,028	68	1,904
Planta de calentamiento de asfalto	hr	0,09	963	86,67
Rodillo neumático TS	hr	0,084	333	27,972
Terminadora de asfalto	hr	0,075	684	51,3
Volqueta	hr	0,03	223	6,69
Herramientas menores	5% del total de mano de obra			5,92
<b>TOTAL DE HERRAMIENTAS Y EQUIPO:</b>				<b>203,95</b>
<b>SUB TOTAL COSTO UNITARIO:</b>				<b>2542,09</b>
Gastos generales y administrativos	7% del sub total			177,95
Utilidad	10% de gastos generales y administrativos+ el sub total			272,00
<b>COSTO PARCIAL:</b>				<b>2992,04</b>
Impuesto de transacciones	3,09% del costo parcial			92,45
<b>PRECIO TOTAL UNITARIO:</b>				<b>3084,50</b>
<b>PRECIO ADOPTADO:</b>				<b>3084,50</b>

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 53. Análisis de Precios Unitarios mezcla con Cemento Asfáltico (c/General Trigo)**

<b>ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS MEZCLA EN CALIENTE CON CEMENTO ASFÁLTICO (C/GENERAL TRIGO)</b>				
<b>DATOS GENERALES:</b>				
<b>Actividad:</b>	Carpeta asfáltica con cemento asfáltico			
<b>Cantidad:</b>	32,5			
<b>Unidad:</b>	m2			
<b>Moneda:</b>	Bolivianos			
<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>PRECIO PRODUCTIVO</b>	<b>COSTO TOTAL</b>
<b>1. MATERIALES</b>				
Cemento Asfáltico	tn	0,154	11350	1747,9
Grava triturada clasificada 3/4"	m3	0,48	165	79,2
Grava triturada clasificada 3/8"	m3	0,35	165	57,75
Arena clasificada	m3	0,49	130	63,7
Diésel	lt	18	3,75	67,5
<b>TOTAL COSTO DE MATERIALES:</b>				<b>2016,05</b>
<b>2. MANO DE OBRA</b>				
Chofer	hr	0,01	16	0,19
Operador de equipo pesado	hr	0,82	24	19,68
Operador de equipo liviano	hr	0,08	18	1,44
Operador en planta	hr	0,1	24	2,4
Ayudante de maquinaria y equipo	hr	0,03	16	0,48
Ayudante	hr	1,8	23	41,4
Peón	hr	0,072	12	0,864
<b>SUB TOTAL MANO DE OBRA:</b>				<b>66,456</b>
Cargas Sociales	55% del sub total mano de obra			36,55
Impuestos al valor agregado	14,94% de la suma del sub total de mano de obra más carga social			15,39
<b>TOTAL MANO DE OBRA:</b>				<b>118,40</b>
<b>2. HERRAMIENTAS Y EQUIPO</b>				
Cargador frontal	hr	0,0001	423	0,0423
Compactador de rodillo liso	hr	0,035	302	10,57
Distribuidor de mezcla autopropulsado	hr	0,028	460	12,88
Escoba mecánica autopropulsada	hr	0,028	68	1,904
Planta de calentamiento de asfalto	hr	0,09	963	86,67
Rodillo neumático TS	hr	0,084	333	27,972
Terminadora de asfalto	hr	0,075	684	51,3
Volqueta	hr	0,03	223	6,69
Herramientas menores	5% del total de mano de obra			5,92
<b>TOTAL DE HERRAMIENTAS Y EQUIPO:</b>				<b>203,95</b>
<b>SUB TOTAL COSTO UNITARIO:</b>				<b>2338,39</b>
Gastos generales y administrativos	7% del sub total			163,69
Utilidad	10% de gastos generales y administrativos+ el sub total			250,21
<b>COSTO PARCIAL:</b>				<b>2752,29</b>
Impuesto de transacciones	3,09% del costo parcial			85,05
<b>PRECIO TOTAL UNITARIO:</b>				<b>2837,34</b>
<b>PRECIO ADOPTADO:</b>				<b>2837,34</b>

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 54. Análisis de Precios Unitarios mezcla Reciclada en frío con Emulsión Asfáltica (c/General Trigo)**

ANALISIS DE PRESIOS UNITARIOS MEZCLA RECICLADA EN FRÍO CON EMULSION ASFALTICA (C/GENERAL TRIGO)				
DATOS GENERALES:				
Actividad:	Carpeta asfáltica reciclada con emulsión asfáltica			
Cantidad:	32,5			
Unidad:	m3			
Moneda:	Bolivianos			
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
<b>1. MATERIALES</b>				
Emulsión asfáltica	lt	28,84	20	576,8
Diésel	lt	36	3,75	135
<b>TOTAL COSTO DE MATERIALES:</b>				<b>711,8</b>
<b>2. MANO DE OBRA</b>				
Chofer	hr	0,01	16	0,19
Operador de equipo pesado	hr	0,82	24	19,68
Operador de equipo liviano	hr	0,08	18	1,44
Operador en planta	hr	0,1	24	2,4
Ayudante de maquinaria y equipo	hr	0,03	16	0,48
Ayudante	hr	1,8	23	41,4
Peón		0,072	12	0,864
<b>Mano de obra que se necesita para el reciclado</b>				
Ayudante	hr	0,5	12	6
Operador de retroexcavadora	hr	0,07	19	1,33
<b>SUB TOTAL MANO DE OBRA:</b>				<b>73,79</b>
Cargas Sociales	55% de sub. total mano de obra			40,58
Impuestos al valor agregado	14,94% de la suma del sub total de mano de obra más carga social			17,09
<b>TOTAL MANO DE OBRA:</b>				<b>131,45</b>
<b>2. HERRAMIENTAS Y EQUIPO</b>				
Cargador frontal	hr	0,0001	423	0,0423
Compactador de rodillo liso	hr	0,035	302	10,57
Distribuidor de mezcla autopropulsado	hr	0,028	460	12,88
Escoba mecánica autopropulsada	hr	0,028	68	1,904
Planta de calentamiento de asfalto	hr	0,09	963	86,67
Rodillo neumático TS	hr	0,084	333	27,972
Terminadora de asfalto	hr	0,075	684	51,3
Volqueta	hr	0,07	223	15,61
<b>Equipo necesario para el reciclado</b>				
Retroexcavadora	hr	0,07	224	15,68
Volqueta	hr	0,07	223	15,61
Chancadora considerando el lavado	hr	1	350	350
Herramientas menores	5% del total de mano de obra			6,57
<b>TOTAL DE HERRAMIENTAS Y EQUIPO:</b>				<b>594,81</b>
<b>SUB TOTAL COSTO UNITARIO:</b>				<b>1438,07</b>
Gastos generales y administrativos	18% del sub total			258,85
Utilidad	10% de gastos generales y administrativos + el sub total			169,69
<b>COSTO PARCIAL:</b>				<b>1866,61</b>
Impuesto de transacciones	3,09% del costo parcial			57,68
<b>PRECIO TOTAL UNITARIO:</b>				<b>1924,29</b>
<b>PRECIO ADOPTADO:</b>				<b>1924,29</b>

Fuente: Elaboración Propia

- Muestra 2

**Tabla 55. Análisis de Precios Unitarios Mezcla en Frío con Emulsión Asfáltica (San Lorencito-Iscayachi)**

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS MEZCLA EN FRÍO CON EMULSIÓN ASFÁLTICA (SAN LORENCITO - ISCAYACHI)				
DATOS GENERALES:				
Actividad:	Carpeta asfáltica con emulsión asfáltica			
Cantidad:	65			
Unidad:	m3			
Moneda:	Bolivianos			
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
<b>1. MATERIALES</b>				
Emulsión asfáltica	lt	97,58	20	1951,6
Grava triturada clasificada 3/4"	m3	0,48	165	79,2
Grava triturada clasificada 3/8"	m3	0,35	165	57,75
Arena clasificada	m3	0,49	130	63,7
Diésel	lt	18	3,75	67,5
<b>TOTAL COSTO DE MATERIALES:</b>				<b>2219,75</b>
<b>2. MANO DE OBRA</b>				
Chofer	hr	0,01	16	0,19
Operador de equipo pesado	hr	0,82	24	19,68
Operador de equipo liviano	hr	0,08	18	1,44
Operador en planta	hr	0,1	24	2,4
Ayudante de maquinaria y equipo	hr	0,03	16	0,48
Ayudante	hr	1,8	23	41,4
Peón	hr	0,072	12	0,864
<b>SUB TOTAL MANO DE OBRA:</b>				<b>66,456</b>
Cargas Sociales	55% de sub. total mano de obra			36,55
Impuestos al valor agregado	14,94% de la suma del sub total de mano de obra más carga social			15,39
<b>TOTAL MANO DE OBRA:</b>				<b>118,40</b>
<b>2. HERRAMIENTAS Y EQUIPO</b>				
Cargador frontal	hr	0,0001	423	0,0423
Compactador de rodillo liso	hr	0,035	302	10,57
Distribuidor de mezcla autopropulsado	hr	0,028	460	12,88
Escoba mecánica autopropulsada	hr	0,028	68	1,904
Planta de calentamiento de asfalto	hr	0,09	963	86,67
Rodillo neumático TS	hr	0,084	333	27,972
Terminadora de asfalto	hr	0,075	684	51,3
Volqueta	hr	0,03	223	6,69
Herramientas menores	5% del total de mano de obra			5,92
<b>TOTAL DE HERRAMIENTAS Y EQUIPO:</b>				<b>203,95</b>
<b>SUB TOTAL COSTO UNITARIO:</b>				<b>2542,09</b>
Gastos generales y administrativos	18% del sub total			457,58
Utilidad	10%de gastos generales y administrativos + el sub total			299,97
<b>COSTO PARCIAL:</b>				<b>3299,64</b>
Impuesto de transacciones	3,09% del costo parcial			101,96
<b>PRECIO TOTAL UNITARIO:</b>				<b>3401,60</b>
<b>PRECIO ADOPTADO:</b>				<b>3401,60</b>

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 56. Análisis de Precios Unitarios mezcla con Cemento Asfáltico (San Lorencito - Iscayachi)**

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS MEZCLA EN CALIENTE CON CEMENTO ASFALTICO (SAN LORENCITO - ISCAYACHI)				
DATOS GENERALES:				
Actividad:	Carpeta asfáltica con cemento asfáltico			
Cantidad:	65			
Unidad:	m2			
Moneda:	Bolivianos			
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
<b>1. MATERIALES</b>				
Cemento Asfáltico	tn	0,154	11350	1747,9
Grava triturada clasificada 3/4"	m3	0,48	165	79,2
Grava triturada clasificada 3/8"	m3	0,35	165	57,75
Arena clasificada	m3	0,49	130	63,7
Diésel	lt	18	3,75	67,5
<b>TOTAL COSTO DE MATERIALES:</b>				<b>2016,05</b>
<b>2. MANO DE OBRA</b>				
Chofer	hr	0,01	16	0,19
Operador de equipo pesado	hr	0,82	24	19,68
Operador de equipo liviano	hr	0,08	18	1,44
Operador en planta	hr	0,1	24	2,4
Ayudante de maquinaria y equipo	hr	0,03	16	0,48
Ayudante	hr	1,8	23	41,4
Peón	hr	0,072	12	0,864
<b>SUB TOTAL MANO DE OBRA:</b>				<b>66,456</b>
Cargas Sociales	55% de sub. total mano de obra			36,55
Impuestos al valor agregado	14,94% de la suma del sub total de mano de obra más carga social			15,39
<b>TOTAL MANO DE OBRA:</b>				<b>118,40</b>
<b>2. HERRAMIENTAS Y EQUIPO</b>				
Cargador frontal	hr	0,0001	423	0,0423
Compactador de rodillo liso	hr	0,035	302	10,57
Distribuidor de mezcla autopropulsado	hr	0,028	460	12,88
Escoba mecánica autopropulsada	hr	0,028	68	1,904
Planta de calentamiento de asfalto	hr	0,09	963	86,67
Rodillo neumático TS	hr	0,084	333	27,972
Terminadora de asfalto	hr	0,075	684	51,3
Volqueta	hr	0,03	223	6,69
Herramientas menores	5% del total de mano de obra			5,92
<b>TOTAL DE HERRAMIENTAS Y EQUIPO:</b>				<b>203,95</b>
<b>SUB TOTAL COSTO UNITARIO:</b>				<b>2338,39</b>
Gastos generales y administrativos	18% del sub total			420,91
Utilidad	10% de gastos generales y administrativos + el sub total			275,93
<b>COSTO PARCIAL:</b>				<b>3035,24</b>
Impuesto de transacciones	3,09% del costo parcial			93,79
<b>PRECIO TOTAL UNITARIO:</b>				<b>3129,02</b>
<b>PRECIO ADOPTADO:</b>				<b>3129,02</b>

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 57. Análisis de Precios Unitarios mezcla Reciclada en frío con Emulsión Asfáltica (San Lorencito-Iscayachi)**

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS MEZCLA RECICLADA EN FRÍO CON EMULSIÓN ASFÁLTICA (SAN LORENCITO - ISCAYACHI)				
DATOS GENERALES:				
Actividad:	Carpeta asfáltica reciclada con emulsión asfáltica			
Cantidad:	65			
Unidad:	m3			
Moneda:	Bolivianos			
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
<b>1. MATERIALES</b>				
Emulsión asfáltica	lt	28,84	20	576,8
Diésel	lt	32	3,75	120
<b>TOTAL COSTO DE MATERIALES:</b>				<b>696,8</b>
<b>2. MANO DE OBRA</b>				
Chofer	hr	0,01	16	0,19
Operador de equipo pesado	hr	0,82	24	19,68
Operador de equipo liviano	hr	0,08	18	1,44
Operador en planta	hr	0,1	24	2,4
Ayudante de maquinaria y equipo	hr	0,03	16	0,48
Ayudante	hr	1,8	23	41,4
Peón		0,072	12	0,864
<b>Mano de obra que se necesita para el reciclado</b>				
Ayudante	hr	0,5	12	6
Operador de retroexcavadora	hr	0,07	19	1,33
<b>SUB TOTAL MANO DE OBRA:</b>				<b>73,79</b>
Cargas Sociales	55% de sub. total mano de obra			40,58
Impuestos al valor agregado	14,94% de la suma del sub total de mano de obra más carga social			17,09
<b>TOTAL MANO DE OBRA:</b>				<b>131,45</b>
<b>2. HERRAMIENTAS Y EQUIPO</b>				
Cargador frontal	hr	0,0001	423	0,0423
Compactador de rodillo liso	hr	0,035	302	10,57
Distribuidor de mezcla autopropulsado	hr	0,028	460	12,88
Escoba mecánica autopropulsada	hr	0,028	68	1,904
Planta de calentamiento de asfalto	hr	0,09	963	86,67
Rodillo neumático TS	hr	0,084	333	27,972
Terminadora de asfalto	hr	0,075	684	51,3
Volqueta	hr	0,07	223	15,61
<b>Equipo necesario para el reciclado</b>				
Retroexcavadora	hr	0,07	224	15,68
Volqueta	hr	0,07	223	15,61
Chancadora	hr	1	350	350
Herramientas menores	5% del total de mano de obra			6,57
<b>TOTAL DE HERRAMIENTAS Y EQUIPO:</b>				<b>594,81</b>
<b>SUB TOTAL COSTO UNITARIO:</b>				<b>1423,07</b>
Gastos generales y administrativos	18% del sub total			256,15
Utilidad	10% de gastos generales y administrativos + el sub total			167,92
<b>COSTO PARCIAL:</b>				<b>1847,14</b>
Impuesto de transacciones	3,09% del costo parcial			57,08
<b>PRECIO TOTAL UNITARIO:</b>				<b>1904,22</b>
<b>PRECIO ADOPTADO:</b>				<b>1904,22</b>

Fuente: Elaboración Propia

- Muestra 3

**Tabla 58. Análisis de Precios Unitarios mezcla en frío con Emulsión Asfáltica (Universidad)**

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS MEZCLA EN FRÍO CON EMULSIÓN ASFÁLTICA (UNIVERSIDAD)				
DATOS GENERALES:				
Actividad:	Carpeta asfáltica con emulsión asfáltica			
Cantidad:	32,5			
Unidad:	m2			
Moneda:	Bolivianos			
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
<b>1. MATERIALES</b>				
Emulsión asfáltica	lt	97,58	20	1951,6
Grava triturada clasificada 3/4"	m3	0,48	165	79,2
Grava triturada clasificada 3/8"	m3	0,35	165	57,75
Arena clasificada	m3	0,49	130	63,7
Diésel	lt	18	3,75	67,5
<b>TOTAL COSTO DE MATERIALES:</b>				<b>2219,75</b>
<b>2. MANO DE OBRA</b>				
Chofer	hr	0,01	16	0,19
Operador de equipo pesado	hr	0,82	24	19,68
Operador de equipo liviano	hr	0,08	18	1,44
Operador en planta	hr	0,1	24	2,4
Ayudante de maquinaria y equipo	hr	0,03	16	0,48
Ayudante	hr	1,8	23	41,4
Peón	hr	0,072	12	0,864
<b>SUB TOTAL MANO DE OBRA:</b>				<b>66,456</b>
Cargas Sociales	55% del sub total mano de obra			36,55
Impuestos al valor agregado	14,94% de la suma del sub total de mano de obra más carga social			15,39
<b>TOTAL MANO DE OBRA:</b>				<b>118,40</b>
<b>2. HERRAMIENTAS Y EQUIPO</b>				
Cargador frontal	hr	0,0001	423	0,0423
Compactador de rodillo liso	hr	0,035	302	10,57
Distribuidor de mezcla autopropulsado	hr	0,028	460	12,88
Escoba mecánica autopropulsada	hr	0,028	68	1,904
Planta de calentamiento de asfalto	hr	0,09	963	86,67
Rodillo neumático TS	hr	0,084	333	27,972
Terminadora de asfalto	hr	0,075	684	51,3
Volqueta	hr	0,03	223	6,69
Herramientas menores	5% del total de mano de obra			5,92
<b>TOTAL DE HERRAMIENTAS Y EQUIPO:</b>				<b>203,95</b>
<b>SUB TOTAL COSTO UNITARIO:</b>				<b>2542,09</b>
Gastos generales y administrativos	7% del sub total			177,95
Utilidad	10% de gastos generales y administrativos+ el sub total			272,00
<b>COSTO PARCIAL:</b>				<b>2992,04</b>
Impuesto de transacciones	3,09% del costo parcial			92,45
<b>PRECIO TOTAL UNITARIO:</b>				<b>3084,50</b>
<b>PRECIO ADOPTADO:</b>				<b>3084,50</b>

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 59. Análisis de Precios Unitarios mezcla con Cemento Asfáltico (Universidad)**

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS MEZCLA EN CALIENTE CON CEMENTO ASFÁLTICO (UNIVERSIDAD)				
DATOS GENERALES:				
Actividad:	Carpeta asfáltica con cemento asfáltico			
Cantidad:	32,5			
Unidad:	m2			
Moneda:	Bolivianos			
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
<b>1. MATERIALES</b>				
Cemento Asfáltico	Tn	0,154	11350	1747,9
Grava triturada clasificada 3/4"	m3	0,48	165	79,2
Grava triturada clasificada 3/8"	m3	0,35	165	57,75
Arena clasificada	m3	0,49	130	63,7
Diésel	lt	18	3,75	67,5
<b>TOTAL COSTO DE MATERIALES:</b>				<b>2016,05</b>
<b>2. MANO DE OBRA</b>				
Chofer	hr	0,01	16	0,19
Operador de equipo pesado	hr	0,82	24	19,68
Operador de equipo liviano	hr	0,08	18	1,44
Operador en planta	hr	0,1	24	2,4
Ayudante de maquinaria y equipo	hr	0,03	16	0,48
Ayudante	hr	1,8	23	41,4
Peón	hr	0,072	12	0,864
<b>SUB TOTAL MANO DE OBRA:</b>				<b>66,456</b>
Cargas Sociales	55% del sub total mano de obra			36,55
Impuestos al valor agregado	14,94% de la suma del sub total de mano de obra más carga social			15,39
<b>TOTAL MANO DE OBRA:</b>				<b>118,40</b>
<b>2. HERRAMIENTAS Y EQUIPO</b>				
Cargador frontal	hr	0,0001	423	0,0423
Compactador de rodillo liso	hr	0,035	302	10,57
Distribuidor de mezcla autopropulsado	hr	0,028	460	12,88
Escoba mecánica autopropulsada	hr	0,028	68	1,904
Planta de calentamiento de asfalto	hr	0,09	963	86,67
Rodillo neumático TS	hr	0,084	333	27,972
Terminadora de asfalto	hr	0,075	684	51,3
Volqueta	hr	0,03	223	6,69
Herramientas menores	5% del total de mano de obra			5,92
<b>TOTAL DE HERRAMIENTAS Y EQUIPO:</b>				<b>203,95</b>
<b>SUB TOTAL COSTO UNITARIO:</b>				<b>2338,39</b>
Gastos generales y administrativos	7% del sub total			163,69
Utilidad	10% de gastos generales y administrativos+ el sub total			250,21
<b>COSTO PARCIAL:</b>				<b>2752,29</b>
Impuesto de transacciones	3,09% del costo parcial			85,05
<b>PRECIO TOTAL UNITARIO:</b>				<b>2837,34</b>
<b>PRECIO ADOPTADO:</b>				<b>2837,34</b>

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 60. Análisis de Precios Unitarios mezcla Reciclada en frío con Emulsión Asfáltica (Universidad)**

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS MEZCLA RECICLADA EN FRÍO CON EMULSIÓN ASFÁLTICA (UNIVERSIDAD)				
<b>Actividad:</b>	Carpeta asfáltica reciclada con emulsión asfáltica			
<b>Cantidad:</b>	32,5			
<b>Unidad:</b>	m3			
<b>Moneda:</b>	Bolivianos			
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
<b>1. MATERIALES</b>				
Emulsión asfáltica	lt	28,84	20	576,8
Diésel	lt	36	3,75	135
<b>TOTAL COSTO DE MATERIALES:</b>				<b>711,8</b>
<b>2. MANO DE OBRA</b>				
Chofer	hr	0,01	16	0,19
Operador de equipo pesado	hr	0,82	24	19,68
Operador de equipo liviano	hr	0,08	18	1,44
Operador en planta	hr	0,1	24	2,4
Ayudante de maquinaria y equipo	hr	0,03	16	0,48
Ayudante	hr	1,8	23	41,4
Peón		0,072	12	0,864
<b>Mano de obra que se necesita para el reciclado</b>				
Ayudante	hr	0,5	12	6
Operador de retroexcavadora	hr	0,07	19	1,33
<b>SUB TOTAL MANO DE OBRA:</b>				<b>73,79</b>
Cargas Sociales	55% de sub. total mano de obra			40,58
Impuestos al valor agregado	14,94% de la suma del sub total de mano de obra más carga social			17,09
<b>TOTAL MANO DE OBRA:</b>				<b>131,45</b>
<b>2. HERRAMIENTAS Y EQUIPO</b>				
Cargador frontal	hr	0,0001	423	0,0423
Compactador de rodillo liso	hr	0,035	302	10,57
Distribuidor de mezcla autopropulsado	hr	0,028	460	12,88
Escoba mecánica autopropulsada	hr	0,028	68	1,904
Planta de calentamiento de asfalto	hr	0,09	963	86,67
Rodillo neumático TS	hr	0,084	333	27,972
Terminadora de asfalto	hr	0,075	684	51,3
Volqueta	hr	0,07	223	15,61
<b>Equipo necesario para el reciclado</b>				
Retroexcavadora	hr	0,07	224	15,68
Volqueta	hr	0,07	223	15,61
Chancadora	hr	1	350	350
Herramientas menores	5% del total de mano de obra			6,57
<b>TOTAL DE HERRAMIENTAS Y EQUIPO:</b>				<b>594,81</b>
<b>SUB TOTAL COSTO UNITARIO:</b>				<b>1438,07</b>
Gastos generales y administrativos	18% del sub total			258,85
Utilidad	10% de gastos generales y administrativos el sub total			169,69
<b>COSTO PARCIAL:</b>				<b>1866,61</b>
Impuesto de transacciones	3,09% del costo parcial			57,68
<b>PRECIO TOTAL UNITARIO:</b>				<b>1924,29</b>
<b>PRECIO ADOPTADO:</b>				<b>1924,29</b>

Fuente: Elaboración Propia

### 3.7.3.2. Análisis comparativo del presupuesto general

**Tabla 61. Análisis Comparativo de Costos**

ITEM	DESCRIPCION DEL ITEM	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO NUMERAL	PRECIO PARCIAL NUMERAL
<b>CALLE GENERAL TRIGO</b>					
1	Carpeta asfáltica con emulsión asfáltica	m3	32,5	3401,60	110551,90
2	Carpeta asfáltica con cemento asfaltico	m3	32,5	2837,34	92213,41
3	Carpeta asfáltica reciclada con emulsión asfáltica	m3	32,5	1924,29	62539,36
Gasto de la carpeta asfáltica con emulsión					110551,90
Ahorro que existe usando una carpeta asfáltica reciclada					48012,55
Ahorro que existe usando una carpeta asfáltica reciclada en %					43,43
Gasto de carpeta asfáltica con cemento asfaltico					92213,41
Ahorro que existe usando una carpeta asfáltica reciclada					29674,05
Ahorro que existe usando una carpeta asfáltica reciclada en %					32,18
<b>SAN LORENCITO - ISCAYACHI</b>					
1	Carpeta asfáltica con emulsión asfáltica	m3	65	3401,60	221103,80
2	Carpeta asfáltica con cemento asfaltico	m3	65	3129,02	203386,58
3	Carpeta asfáltica reciclada con emulsión asfáltica	m3	65	1904,22	123774,06
Gasto de la carpeta asfáltica con emulsión					221103,80
Ahorro que existe usando una carpeta asfáltica reciclada					97329,75
Ahorro que existe usando una carpeta asfáltica reciclada en %					44,02
Gasto de carpeta asfáltica con cemento asfaltico					203386,58
Ahorro que existe usando una carpeta asfáltica reciclada					79612,53
Ahorro que existe usando una carpeta asfáltica reciclada en %					39,14
<b>UNIVERSIDAD</b>					
1	Carpeta asfáltica con emulsión asfáltica	m3	32,5	3401,60	110551,90
2	Carpeta asfáltica con cemento asfaltico	m3	32,5	3129,02	101693,29
3	Carpeta asfáltica reciclada con emulsión asfáltica	m3	32,5	1924,29	62539,36
Gasto de la carpeta asfáltica con emulsión					110551,90
Ahorro que existe usando una carpeta asfáltica reciclada					48012,55
Ahorro que existe usando una carpeta asfáltica reciclada en %					43,43
Gasto de carpeta asfáltica con cemento asfaltico					101693,29
Ahorro que existe usando una carpeta asfáltica reciclada					39153,94
Ahorro que existe usando una carpeta asfáltica reciclada en %					38,50

*Fuente:* Elaboración Propia

En la tabla se muestra la diferencia de precios unitarios, y del costo final, manteniendo constante la cantidad para cada muestra, y se observa una clara diferencia de costos entre las tres mezclas.

Realizando el análisis de las mezcla de emulsión asfáltica con la de reciclado con emulsión asfáltica, se encuentra un ahorro de un 43 a 44%, en las tres muestras

ensayadas, lo que significa que en el reciclado con emulsión asfáltica el costo se reduce casi el 50%, en cuanto a la comparación de la mezcla de cemento asfáltico y reciclado con emulsión asfáltica se encuentra un ahorro de un 32 a 39%, lo que significa que en el reciclado con emulsión el costo se reduce por lo menos el 40 %, donde se ve la conveniencia del método de reciclado con emulsión, debido al significativo ahorro del costo.

## CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1. CONCLUSIONES

- Se logró describir las características y propiedades de la emulsión asfáltica como también se experimentó la facilidad de trabajo de la misma.
- Se pudo realizar el muestreo lo más representativo posible, basándonos en las entidades que trabajan en nuestra ciudad con la finalidad de obtener resultados de la mayoría de opciones de carpetas de rodadura que se puedan reciclar.
- Se realizó la caracterización tanto del material reciclado como de la emulsión asfáltica pudiendo conocer las características necesarias para la investigación.
- En la presente investigación se puede observar que se ha cumplido con los objetivos planteados tanto el general como los específicos ya que se logra analizar el comportamiento de la mezcla asfáltica elaborada con reciclado de carpetas asfálticas utilizando emulsión, evaluando la estabilidad, deformación, % de vacíos, % de huecos ocupados por la emulsión y peso volumétrico, mediante tal evaluación se logra obtener el porcentaje óptimo de emulsión y de agua, demostrando que el reciclado, es una opción que permite la reutilización de carpetas asfálticas deteriorada, dando buenos resultados.
- Se realizó tres mezclas variando el material reciclado, siendo el reciclado de la c/General Trigo donde se ven mejores resultados de resistencia técnica, debido a que no era un asfalto degradado ni presentaba fallas de consideración, a diferencia de la muestra de San Lorencito–Iscayachi y la del campus universitario de la U.A.J.M.S., las cuales mostraban fallas superficiales como estructurales.
- Es importante decir que el método Marshall Modificado es aplicable a mezclas recicladas en frío que utilicen sólo reciclado donde una de las principales potencialidades del método expuesto es la rapidez y facilidad con la cual puede realizarse un diseño de mezcla reciclada.

- En el análisis de costos, se puede observar que existe un ahorro como mínimo del 30%, con el método de reciclado con emulsión asfáltica, siendo un método donde tiene una considerable disminución del costo y tiempo empleado para su aplicación como también el aprovechamiento máximo de sus recursos mediante su reutilización con el objetivo de cuidar el medio ambiente mediante el reciclado en sí y la utilización de la emulsión asfáltica y así evitar la masificación de los vertederos y contribuir a la disminución en el uso de materias primas naturales.

#### **4.2. RECOMENDACIONES**

- Para determinar el Contenido inicial de Emulsión (CIE) se recomienda tomar con cautela el método, ya que los valores de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC), no eran lógicos por que eran demasiado altos, siendo imposible hacer incrementos del porcentaje de emulsión, por lo que trabajamos con los valores del método del Instituto de Asfaltos (AI), el cual resultó ser práctico para la metodología de diseño.
- Se aconseja tener en cuenta con la manipulación y almacenamiento de la emulsión ya que debido a eso se puede perder propiedades y porcentaje de agua debido a la evaporación de la misma.
- Dar mantenimiento al equipo Marshall para compactación y sobre todo a la prensa debido a la calibración, porque podría afectar a los resultados.
- Se recomienda profundizar el estudio ampliando el campo de investigación al reciclado de carpetas asfálticas con emulsión, ya que es un método nunca aplicado en nuestra ciudad pero el mismo resulta ser muy factible en costo, tiempo y sobre todo con el fin de proteger el medio ambiente.

