

CAPÍTULO I

DISEÑO TEÓRICO Y METODOLÓGICO

1.1.INTRODUCCIÓN

Las propiedades de una mezcla asfáltica son indicadores que denotan el buen comportamiento que éstas tendrán en una vía, las mismas dependerán de la calidad y resistencia de los componentes que integran la mezcla.

No existen trabajos de investigación que traten de realizar una comparación de las propiedades de mezclas asfálticas con agregados alcalinos y ácidos, pero si existen estudios como el que se realizó en la Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica que utilizan como agregado pétreo en mezclas asfálticas en caliente a la caliza, la cual forma parte del grupo de los alcalinos y artículos que describen la calidad de agregados del tipo ácido y alcalino para mezclas asfálticas, clasificándolos en bueno regular y pobre según las propiedades deseables que se pretende tener en un pavimento flexible.

El presente trabajo de investigación pretende comparar las propiedades de las mezclas asfálticas con agregados alcalinos y ácidos, realizando una clasificación de la composición mineralógica de los agregados pétreos de las canteras y ríos de extracción de la Ciudad de Tarija y uno de la ciudad de Potosí, para determinar qué tipo de agregado tiene mejor funcionalidad con el cemento asfáltico y por ende con la mezcla asfáltica.

Se han considerado en algunos estudios en los que los del tipo alcalino responden de mejor manera al ácido nafténico del asfalto y existe una buena relación entre estos dos materiales, por lo contrario, los del tipo ácido no presentan una buena respuesta ante el contacto con el asfalto. Esta investigación está orientada a realizar una comparación de las propiedades que presenten las mezclas asfálticas con agregados alcalinos y ácidos, de tal manera sea aplicado en el diseño y elaboración de mezclas asfálticas con agregados que brinden una mejor funcionalidad al pavimento flexible, de esta manera tanto la sociedad como el usuario sea el principal beneficiario al tener carpetas de

rodaduras capaces de soportar las cargas del tránsito y evitar futuros asentamientos y desprendimientos de los elementos que componen una mezcla asfáltica.

1.2.ANTECEDENTES

Desde el diseño de mezclas asfálticas empleadas en los firmes asfálticos desde el año 1830 se viene mejorando la calidad de éstas cambiando el tamaño de los agregados, la cantidad de cemento asfáltico o añadiendo otros tipos de emulsionantes mejoradores de la calidad u otros elementos reciclados que alarguen la vida útil de las mezclas, aumentando su resistencia. Se escogen agregados que posean mejores propiedades y resistencia a la acción directa del tráfico, se las clasifica de acuerdo a su calidad, tamaño, forma, textura y dureza, pero son pocos los estudios que se realizan clasificándolos mineralógicamente en alcalinos y ácidos para evaluar el comportamiento que éstos tienen como elementos de resistencia en las mezclas bituminosas debido a que su composición incide en el contacto con los bitúmenes contrarrestándose en algunos casos y en otros favoreciendo el enlace que existe entre agregado y asfalto. La ingeniera Beatriz Alejandra Schevenin Pinedo realizó un estudio sobre los aditivos que evitan el desprendimiento entre otras fallas con el pavimento asfáltico¹, en el cual se explica cómo influye la composición mineralógica de los agregados del tipo alcalino y ácido cuando entran en contacto con el asfalto, debido a que el ácido nafténico no reacciona de igual forma en todos los agregados contrarrestándose en los ácidos. Este estudio realizado por la ingeniera fue el punto de partida para que esta investigación sea realizada para conocer cómo varían las propiedades de las mezclas asfálticas con distinto tipo de agregado.

¹ Adhesión entre agregado y asfalto- Ing. Beatriz Schevenin.

1.3.JUSTIFICACIÓN

El comportamiento de un pavimento se ve altamente influenciado por la selección apropiada del agregado, debido a que el agregado mismo proporciona la mayoría de las características de capacidad portante, y en su mayoría de las cuales depende el buen funcionamiento de los pavimentos es importante no sólo realizar una evaluación de la resistencia y demás propiedades externas de los agregados sino también realizar un análisis químico que verifique a qué grupo pertenece mineralógicamente, ya sean estos alcalinos o ácidos porque su composición influirá en las propiedades que presenten las mezclas asfálticas. La investigación planteada comprende dos etapas una de clasificación de los agregados en ácidos o básicos, y una etapa experimental de caracterización de los agregados y asfalto como también de las propiedades que presenten las mezclas asfálticas con distintos tipos de agregados mediante ensayos de laboratorio y así determinar qué tipo de agregado tiene mejor funcionalidad con el cemento asfáltico.

1.4.ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

Los diseños de mezclas asfálticas para su posterior aplicación en los firmes son llevados a cabo para que las mismas puedan facilitar la movilización del tránsito de vehículos y que el mismo se efectúe con un buen nivel de servicio para los usuarios, su buena o mala funcionalidad es producida por elementos que intervienen en una mezcla, es decir, agregados pétreos y asfalto una buena relación entre ellos da como resultado carpetas de rodadura más estables y duraderas. La investigación se desarrolla con la finalidad de conocer, a través de una comparación, las propiedades que presentan las mezclas asfálticas variando los agregados del tipo alcalino y ácido, realizando ensayos de caracterización para conocer sus propiedades individuales y las propiedades que presentan ante el contacto con el asfalto para determinar qué tipo de agregado tiene mejor funcionalidad con el cemento asfáltico.

1.6.2. Aplicación de la investigación

La presente investigación pretende dar a conocer las diferentes propiedades que se presentan en las mezclas asfálticas cambiando el tipo de agregado, generalmente en diversos proyectos que realizan de caminos o estructuras en los que es necesario la aplicación de materiales de construcción no existe un análisis o un estudio previo de la incidencia que hay en la mineralogía de los agregados pétreos, por ejemplo en estructuras de hormigón los agregados ácidos como la piritita generan ácido sulfúrico corroen al hormigón mediante ataques de sulfato, de igual manera los agregados ácidos no responden favorablemente con el asfalto ante la acción del agua, la investigación selecciona mediante un análisis de pH de alcalinidad y acidez, aplicado a los agregados de la ciudad de Tarija; de las canteras de extracción más conocidas de la ciudad, y uno de la ciudad de Potosí, en el cual se encuentran agregados ácidos debido al rubro minero existente en dicha ciudad; para elaborar mezclas asfálticas convencionales mediante la metodología Marshall y comparar las propiedades que estos presentan con agregados del tipo ácido y alcalino, de igual manera se analiza el fenómeno de Stripping en dichas mezclas. Mediante los resultados y análisis de los mismos, se pretende dar a conocer si realmente existen cambios en las propiedades que presenten como mezcla asfáltica, si existen comportamientos hidrofóbicos o hidrofílicos en los agregados ácidos y alcalinos.

Los resultados reflejan si la mineralogía de los agregados influye en menor o gran medida en las propiedades de las mezclas asfálticas, si será necesario o no, realizar un análisis químico previo a los agregados pétreos en construcciones viales.

1.5.DISEÑO TEÓRICO

1.5.1. Determinación de la perspectiva de solución

- **Objeto de estudio:** Propiedades de mezclas asfálticas con agregados alcalinos y ácidos.

- **Perspectiva:** Realizar una *comparación* de las propiedades de mezclas asfálticas utilizando agregados alcalinos y ácidos.
- **Cuestionante preliminar:**
¿Cómo una comparación técnica influirá en el conocimiento de los cambios que se generan en las propiedades de mezclas asfálticas con agregados alcalinos y ácidos?

1.5.2. Situación problémica

Las propiedades de una mezcla asfáltica son indicadores que denotan el buen comportamiento que éstas tendrán en una vía; las mismas dependerán de la calidad y resistencia de los componentes que integran la mezcla.

La buena funcionalidad de la estructura de los pavimentos y de las mezclas asfálticas se ve afectado por la poca información que se tiene sobre los cambios que sufren las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas asfálticas al desconocer la composición mineralógica alcalina o ácida de los agregados pétreos. En la ciudad de Tarija no se cuenta con registros de una clasificación entre agregados alcalinos y ácidos de las canteras y ríos de extracción para la elaboración de mezclas asfálticas de diferentes usos, se ha considerado en algunos estudios que los del tipo alcalino responden de mejor manera al ácido nafténico del asfalto y existe una buena relación entre estos dos materiales; por lo contrario, los del tipo ácido no presentan una buena respuesta ante el contacto con el asfalto. Este desconocimiento se ve reflejado, en menor medida, en el mal desempeño y la mala funcionalidad que tienen las vías, provocando un deterioro prematuro en las carpetas asfálticas y por ende una disminución de su resistencia mecánica.

Por lo que es de gran importancia, el desarrollo de una comparación técnica de las propiedades de mezclas asfálticas con agregados alcalinos y ácidos; y facilitar el conocimiento acerca del tipo de agregado que brinde mejores condiciones físicas y mecánicas, de manera que las mezclas asfálticas realizadas en nuestro medio tengan el comportamiento físico y mecánico deseado en un pavimento.

1.5.3. Determinación del problema

¿De qué manera una comparación de las propiedades de mezclas asfálticas con agregados alcalinos y ácidos brindará información sobre su funcionalidad?

1.5.4. Objetivos

1.5.4.1. Objetivo general

Comparar las propiedades de las mezclas asfálticas con agregados alcalinos y ácidos, realizando una clasificación de la composición mineralógica mediante el PH de los agregados pétreos grueso y fino, para determinar qué tipo de agregado tiene mejor funcionalidad con el cemento asfáltico.

1.5.4.2. Objetivos específicos

- Evaluar la calidad de los materiales pétreos, mediante los ensayos correspondientes según lo especificado en las normas AASHTO o ASTM.
- Elaborar un mapa comparativo de las propiedades de los agregados pétreos alcalinos y ácidos a partir de ensayos y características macroscópicas que presenten.
- Ensayar las mezclas de prueba mediante el método Marshall y observar si la mezcla asfáltica cumple con los criterios y especificaciones que establecen las normas.
- Verificar el fenómeno de Stripping en las mezclas asfálticas con agregados alcalinos y ácidos e identificar qué tipo de agregado presenta comportamientos hidrofílicos o hidrofóbicos.
- Realizar una clasificación mineralógica de alcalinidad y acidez mediante el análisis del PH en los agregados pétreos de las canteras y ríos de extracción de la ciudad de Tarija y uno de la ciudad de Potosí.

- Identificar las diferencias que presenten las mezclas asfálticas variando el agregado alcalino y ácido mediante pruebas físicas y/o mecánicas, mediante un cuadro comparativo.

1.5.5. Formulación de la hipótesis

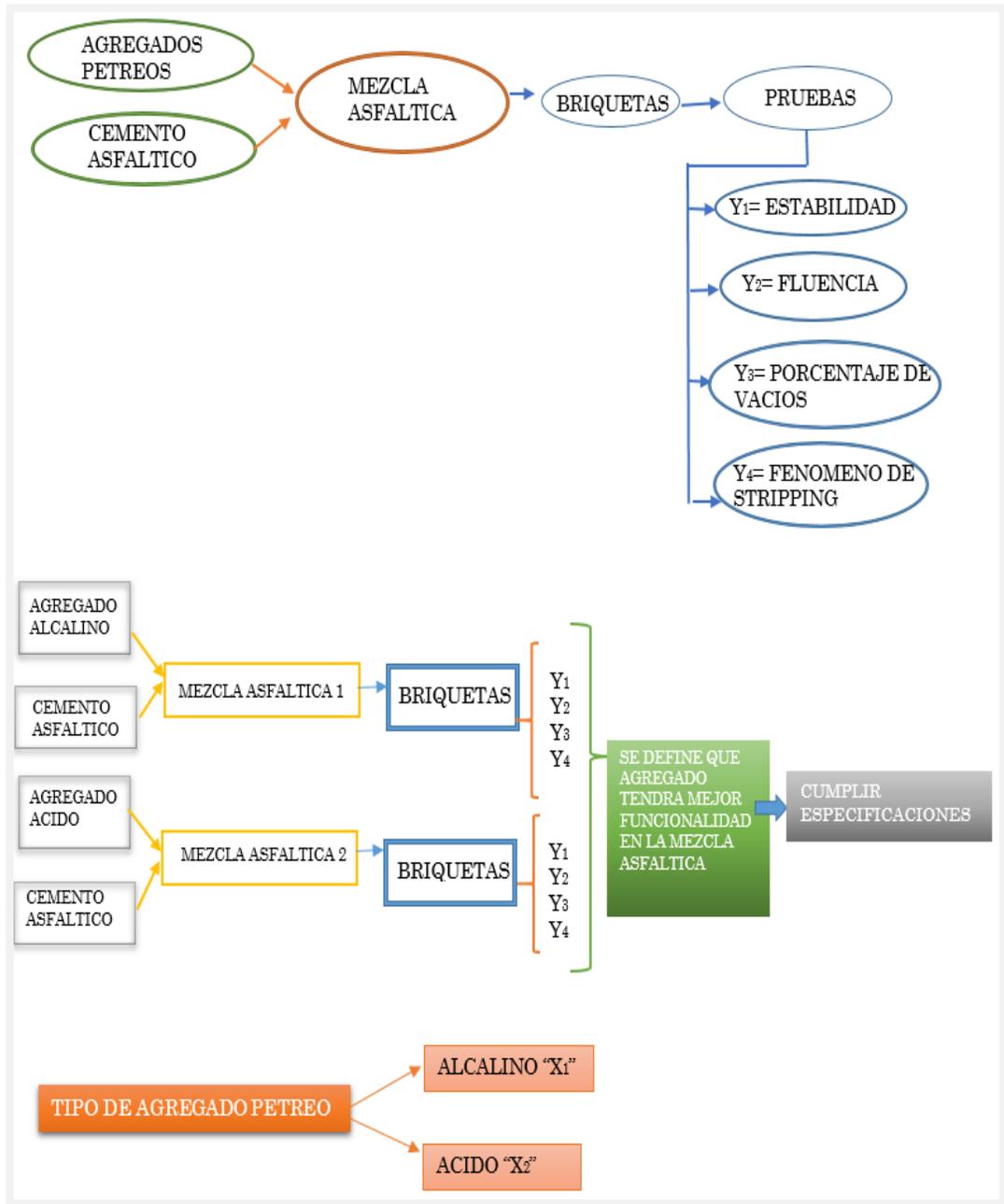
Si se realiza una comparación técnica entre agregado alcalino y ácido en mezclas asfálticas de acuerdo a la caracterización mineralógica de los agregados pétreos mediante el análisis de su PH, **entonces** se puede realizar una comparación de las propiedades de mezclas asfálticas con agregados alcalinos y ácidos para obtener briquetas, las cuales serán sometidas a pruebas físicas y/o mecánicas y de acuerdo a los resultados se puede definir qué agregado tiene mejor funcionalidad.

1.5.6. Variables

1.5.6.1. Identificación de variables

- Variable Dependiente.
Funcionalidad de mezclas asfálticas.
- Variables Independientes.
Características físicas de los agregados pétreos.
Propiedades del cemento asfáltico.
Fenómeno de Stripping.
- Variables Intervinientes.
Composición mineralógica de los agregados.

Figura 1. Metodología de investigación según las variables definidas.



Fuente: Elaboración propia.

1.5.6.2. Conceptualización y operacionalización de las variables

Tabla 1. Variable Dependiente.

Variable Dependiente	Conceptualización	Dimensión	Indicador	Valor/Acción
Funcionalidad de mezclas asfálticas	La funcionalidad de las mezclas asfálticas es una propiedad que permite definir si una mezcla asfáltica presenta buenas propiedades en su elaboración, puesta en obra y en la vida útil para el cual fue diseñado, proporcionando una superficie de rodamiento cómoda, segura y económica a los usuarios de la vía, facilitando la circulación de los vehículos.	Características físicas de los agregados pétreos	Tamaño	Ensayos de caracterización
			Resistencia	Pruebas de laboratorio
			Peso	Mediciones de acuerdo a la clasificación alcalina o acida
		Propiedades del cemento asfáltico	Estabilidad	Ensayo Marshall en laboratorio elaborando curvas de estabilidad seca y húmeda vs porcentaje de asfalto
			Fluencia	Ensayo Marshall en laboratorio elaborando curvas de flujo vs porcentaje de asfalto
			Porcentaje de vacíos	Ensayo Marshall en laboratorio elaborando curvas de porcentaje de vacíos vs porcentaje de asfalto ; curva VMA vs % asfalto
		Fenómeno de Stripping	Adherencia	Ensayo de desprendimiento por fricción

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Variable Independiente.

Variable Independiente	Conceptualización	Dimensión	Indicador	Valor/Acción
Características físicas de los agregados pétreos	Indicadores de calidad de los agregados pétreos para su utilización en diseños de obras civiles	Tamaño	De acuerdo normas de diseño	Ensayo de granulometría
		Resistencia	Pruebas de laboratorio	Desgaste de los ángeles
				Equivalente de arena
				Límites de Atterberg
				Plasticidad
		Peso	Mediciones directas	Densidad relativa
				Porcentaje de absorción
				Peso unitario

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Variables Intervinientes.

Variable Interviniente	Conceptualización	Dimensión	Indicador	Valor/Acción
Composición mineralógica de los agregados	Se denomina composición mineralógica de los agregados a las características y propiedades que conservan de la roca madre en cuanto a dureza, tenacidad, porosidad, densidad, textura y resistencia al intemperismo.	Alcalinos	Textura	Clasificarlos de acuerdo a la literatura especializada
			Absorción	Mediante ensayos de contenido de humedad
			Porosidad	Cuantificar porcentajes en laboratorio
		Ácidos	Textura	Clasificarlos de acuerdo a la literatura especializada
			Absorción	Mediante ensayos de contenido de humedad
			Porosidad	Cuantificar porcentajes en laboratorio

Fuente: Elaboración propia.

1.6.DISEÑO METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN

1.6.1. Identificación del tipo del diseño de investigación

El presente trabajo corresponde a una *investigación explicativa* ya que el principal propósito del mismo es el de buscar una relación entre dos variables los cuales serían los agregados alcalinos y ácidos; mediante la hipótesis formulada se pretende comparar las propiedades de las mezclas asfálticas con agregados alcalinos y ácidos a través de un tratamiento estadístico.

1.6.3. Unidades de estudio y decisión muestral

1.6.3.1. Unidad de estudio

Tabla 4. Unidad de muestreo.

Pregunta de investigación	Objeto de investigación	Unidad de muestreo
¿De qué manera una comparación de las propiedades de mezclas asfálticas con agregados alcalinos y ácidos brindará información sobre su funcionalidad?	Propiedades de mezclas asfálticas con agregados alcalinos y ácidos.	Las propiedades de mezclas asfálticas con diferentes agregados.

Fuente: Elaboración propia.

1.6.4. Población

Todas las propiedades características de las mezclas asfálticas.

- Estabilidad.
- Durabilidad.
- Flujo.

- Impermeabilidad.
- Trabajabilidad.
- Flexibilidad.
- Resistencia a la fatiga.
- Resistencia al deslizamiento.

1.6.5. Muestra

- Estabilidad.
- Fluencia.
- Porcentaje de vacíos.
- Porcentaje de vacíos del agregado mineral (VAM).
- Adherencia.
- Trabajabilidad.

1.6.5.1. Muestreo

Los materiales utilizados serán agregados gruesos chancados y finos de los bancos de extracción más conocidos y utilizados en proyectos de la ciudad de Tarija y uno de la ciudad de Potosí, los cuales serán sometidos a pulverización en la empresa minera “CH'ASQUITA S.R.L.” de la ciudad de Potosí, para ser analizados mediante el ensayo PH con Cloruro de Calcio 0,01 Molar (CaCl 0,01 M) y en Cloruro de Potasio 0,1 Molar (KCl 0,1 M) en el laboratorio químico Castro ubicado en la ciudad de Potosí y a través de la escala del PH ser clasificados en agregados alcalinos y ácidos.

1.6.5.1.1. Técnica empleada

Una vez clasificados en alcalinidad y acidez los agregados serán seleccionados y sometidos a ensayos de caracterización, de igual manera el cemento asfáltico será proporcionado por la planta de asfalto del Gobierno Municipal de la ciudad de Cercado, el mismo será sometido a ensayos de caracterización AASHTO M-20.

Con los agregados y el cemento asfáltico se procederá a diseñar la mezcla asfáltica convencional con la metodología Marshall para evaluar las propiedades que éstas

presentan como conjunto. Las mezclas asfálticas con distintos agregados serán sometidas a ensayos de adherencia evaluando de manera visual el desprendimiento que exista entre la interface asfalto-agregado.

1.6.6. Análisis estadístico del número de ensayos a realizar por variable

Se realiza el análisis estadístico según la metodología de la ingeniería en la investigación del Msc. Ing. Luis Alberto Yurquina Flores para la determinación de las cantidades de ensayos de caracterización de los agregados, asfalto, y las variables.

1.6.6.1. Nivel de confianza

Se escoge el nivel de confianza del 95% que expresado en probabilidades corresponde a un $Z= 1,96$.

1.6.6.2. Tamaño de muestra

Referido al total de ensayos realizados en la investigación:

$$n = \frac{z^2 * \sigma^2}{e^2}$$

Dónde:

e = Error ($e=0,05$).

z = Nivel de confianza (95% → $z=1,96$).

σ^2 = Varianza ($\sigma^2=0,25$).

n = Numero de ensayos.

$$n = \frac{(1,96)^2 * 0,25}{(0,05)^2}$$

Tabla 5. Tamaño

n=	384,16	385 ensayos
----	--------	-------------

de la muestra.

Ensayos	Ni	σ^2	Ni* σ^2	Wr	ni
---------	----	------------	----------------	----	----

Caracterización de agregados pétreos gruesos					
Granulometría (agregado grueso, intermedio y fino)	2	0,25	0,5	0,00519	2
Peso específico (agregado grueso y fino)	5	0,25	1,25	0,01299	3
Laminaridad	1	0,25	0,25	0,00260	1
Desgaste de los ángeles	3	0,25	0,75	0,00779	2
Porcentaje de caras fracturadas	1	0,25	0,25	0,00260	1
Peso unitario (agregado grueso y fino)	5	0,25	1,25	0,01299	3
Equivalente de arena	5	0,25	1,25	0,01299	3
Resistencia al sulfato de Sodio	1	0,25	0,25	0,00260	1
Límites de Atterberg	3	0,25	0,75	0,00779	2
Caracterización del asfalto					
Penetración	5	0,25	1,25	0,01299	3
Punto de inflamación Cleveland	3	0,25	0,75	0,00779	2
Punto de reblandecimiento anillo y bola	2	0,25	0,5	0,00519	2
Viscosidad	3	0,25	0,75	0,00779	2
Ductilidad	4	0,25	1	0,01039	3
Peso unitario	4	0,25	1	0,01039	3
Pruebas de resultados					
Estabilidad	68	0,25	17	0,17662	35
Fluencia	90	0,25	22,5	0,23377	46
Porcentaje de vacíos (mezcla, agregado mineral, bitumen)	60	0,25	15	0,15584	31
Peso unitario	60	0,25	15	0,15584	31
Stripping (desprendimiento por fricción)	60	0,25	15	0,15584	31
	$\Sigma=$	385	96,25		207

Fuente: Elaboración propia.

$$n = \frac{\Sigma N_i * \sigma^2}{N * \left(\frac{e}{z}\right)^2 + \frac{\Sigma N_i * \sigma^2}{N}}$$

Dónde:

e= Error.

z= Nivel de confianza.

σ^2 = Varianza.

N= Número de ensayos.

$$n = \frac{96,25}{385 * \left(\frac{0,05}{1,96}\right)^2 + \frac{96,25}{385}}$$

n=	192,29	193 ensayos
----	--------	-------------

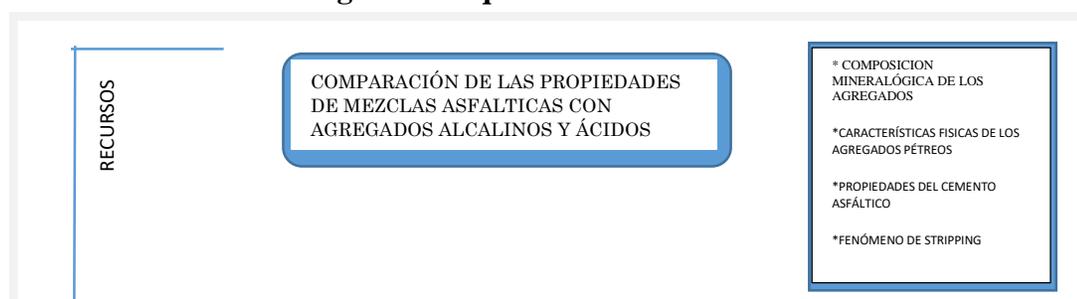
1.6.7. Selección de las técnicas de muestreo

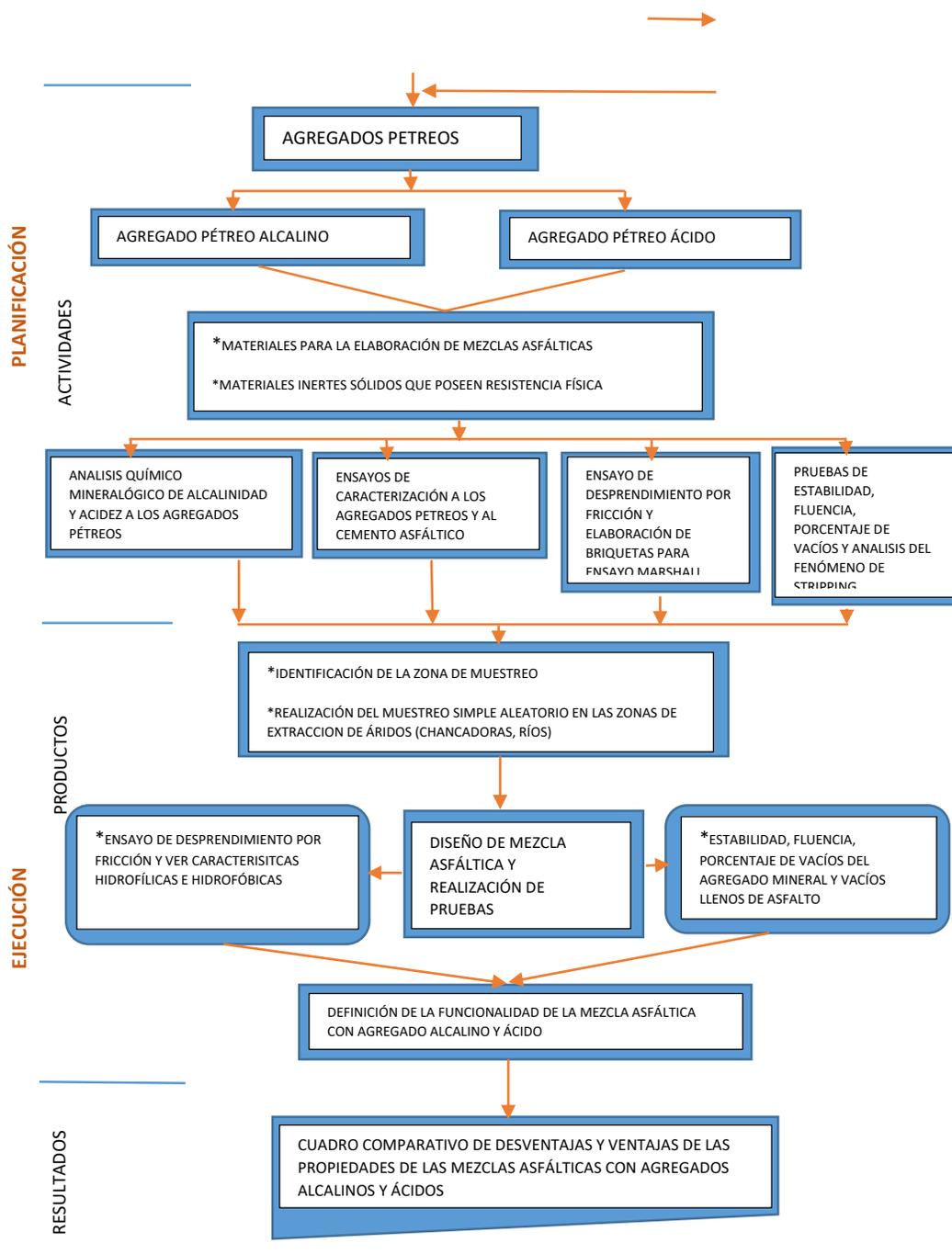
- Muestreo simple aleatorio

Se tomará esta técnica de muestreo para la determinación de muestras de agregados pétreos de las canteras y ríos de extracción, una vez identificadas las zonas de muestreo se procederá a definir aleatoriamente los tipos de agregados, después se elegirá el número de elementos suficientes para realizar una clasificación de alcalinidad y acidez mediante el PH que posean los agregados en el laboratorio químico Castro, ubicado en la ciudad de Potosí; y ser sometidos a ensayos de caracterización para la elaboración de briquetas según el método Marshall y obtener propiedades de la mezcla asfáltica.

1.6.7.1. Esquema de actividades en función a procedimiento definido por la perspectiva

Figura 2. Esquema de actividades.





Fuente: Elaboración propia.

1.6.7.2. Productos esperados

Según las variables se espera que las mismas puedan cumplir con las especificaciones planteadas en norma para tráfico pesado de 10^6 Ejes equivalentes.

- Estabilidad (Y_1) = ≥ 1500 Lb (75 golpes).
- Fluencia (Y_2) = 8 – 18.
- Porcentaje de vacíos (Y_3):
 Porcentaje de vacíos en la mezcla (V_A)= 3 – 5.
 Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (V_{AM})= Min 12.
 Porcentaje de vacíos llenados de asfalto (V_{FA})= 75 – 82.
- Fenómeno de Stripping (Y_4) = Clasificarlos en hidrofóbicas e hidrofílicas según el comportamiento que presenten ante la acción del agua.

1.6.8. Tratamiento estadístico

1.6.8.1. Selección del programa a utilizar

Se realizará un análisis estadístico por variable dependiente para observar el comportamiento, tendencias, establecer parámetros y probar la hipótesis.

Se realizará en los programas que presenten mejor presentación y claridad en los resultados, se puede mencionar los siguientes:

- Minitab.
- SAS.
- Stat graphics.
- Siss.

1.6.8.2. Estadística descriptiva.

Las variables que se indican a continuación serán sometidas a una estadística descriptiva a través de un Software:

- Estabilidad (Y_1).
- Fluencia (Y_2).

- Porcentaje de vacíos (Y₃).
- Fenómeno de Stripping (Y₄).

Utilizada para analizar los comportamientos y tendencias de los resultados, se puede aclarar que las variables ya mencionadas serán expuestas a las siguientes análisis y medidas:

- Análisis de frecuencias.
 - Frecuencia absoluta.
 - Frecuencia relativa.
 - Frecuencia absoluta acumulada.
 - Frecuencia relativa acumulada.
- Medidas de tendencia.
 - Media.
 - Mediana.
- Medidas de dispersión.
 - Desviación estándar.
 - Varianza.

1.6.8.3. Estadística Inferencial.

Utilizada para establecer parámetros y probar la hipótesis.

- No paramétrica.
 - Prueba Chi-cuadrado.

CAPÍTULO II

ESTADO DE CONOCIMIENTO

2.1. MARCO CONCEPTUAL

2.1.1. Roca

Una roca es un agregado de uno o más minerales sólidos, con propiedades físicas y químicas definidas, que se agrupan de forma natural. Forman la mayor parte de la tierra y su importancia radica en que contienen el registro del ambiente geológico del tiempo en el que se formaron.²

2.1.2. Clasificación de rocas

Las rocas se dividen en tres tipos generales: sedimentarias, ígneas y metamórficas (Figura 3). Esta clasificación está basada en el tipo de formación de cada roca.

2.1.2.1. Rocas sedimentarias

Las rocas sedimentarias se forman por la acumulación de sedimentos (partículas finas) en el agua o a medida que el agua se deposita. El sedimento puede consistir de partículas minerales o fragmentos (como es el caso de las areniscas y la arcilla esquistosa), de residuos de productos animales (algunas calizas), de plantas (carbón), de los productos finales de una acción química o una evaporación (sal, yeso), o de la combinación de cualquiera de estos tipos de materiales. Dos términos que usualmente se aplican a rocas sedimentarias son silíceos y calcáreos. Rocas sedimentarias silíceas son aquellas que contienen un alto porcentaje de sílice. Aquellas rocas que contienen un alto porcentaje de carbonato de calcio (calizas) son llamadas calcáreas.

Las rocas sedimentarias se encuentran, normalmente, en capas (estratos), dentro de la corteza terrestre. Esta estratificación es el resultado directo de la manera en que se formaron las rocas sedimentarias: a partir de depósitos de partículas finas, generalmente sedimentados sobre el fondo de lagos o mares antiguos.

2.1.2.2. Rocas ígneas

Las rocas ígneas constan de material fundido (magma) que se ha enfriado y solidificado. Hay dos tipos de rocas ígneas: extrusivas e intrusivas. Las rocas ígneas

² Servicio Geológico Mexicano (22 de marzo de 2017).

extrusivas son formadas a partir del material que se ha vertido afuera, sobre la superficie terrestre, durante una erupción volcánica o alguna actividad geológica similar. La roca resultante tiene una apariencia y estructura vidriosa, debido a que el material se enfría rápidamente al ser expuesto a la atmósfera. La riolita, la andesita y el basalto son ejemplos de rocas extrusivas.

Las rocas intrusivas, por otro lado, se forman a partir del magma que queda atrapado en las profundidades de la corteza terrestre. Al ser atrapado en la corteza, el magma se enfría y endurece lentamente, permitiendo la formación de una estructura cristalina. En consecuencia, la roca ígnea intrusiva es cristalina en estructura y apariencia; siendo ejemplos el granito, la diorita y el gabro. Los movimientos terrestres y los procesos de erosión traen rocas intrusivas a la superficie terrestre, donde pueden ser explotadas en canteras y posteriormente usadas.

2.1.2.3. Rocas metamórficas

Las rocas metamórficas son, generalmente, rocas sedimentarias o ígneas que han sido transformadas por procesos de intensa presión y calor dentro de la tierra, y también por reacciones químicas. Es muy difícil determinar el origen exacto de una roca metamórfica en particular, debido a que los procesos de formación son muy complejos. Muchos tipos de rocas metamórficas presentan un rasgo característico: los minerales están alineados en capas o planos paralelos. Partir la roca en el sentido de sus planos es mucho más fácil que partirla en sus otras direcciones. Las rocas metamórficas que exhiben este tipo de estructura se denominan foliadas. Ejemplos de rocas foliadas son los gneises, los esquistos (formados de rocas ígneas) y la pizarra (formada de la arcilla esquistosa; una roca sedimentaria). No todas las rocas metamórficas son foliadas. El mármol (formado de calizas) y la cuarcita (formada de las areniscas) son tipos comunes de rocas metamórficas que no presentan foliación.

Tabla 6. Clasificación de rocas.

Clasificación general de rocas		
Clase	Tipo	Familia

Sedimentarias	Calcáreas	Caliza
		Dolomita
	Silíceas	Arcilla esquistosa
		Arenisca
		Horsteno
Conglomerado		
Metamórficas	Foliadas	Breccia
		Gneis
		Esquisto
		Anfibolita
	No foliadas	Pizarra
		Cuarcita
		Mármol
Ígneas	Intrusivas	Serpentina
		Granito
		Sienita
		Diorita
		Gabbro
		Periodotila
		Piroxenita
	Hornablendita	
	Extrusivas	Obsidiana
		Pómez
		Tufa
		Riolita
		Traquita
		Andesita
Basalto		
Diabasa		

Fuente: Estudio comparativo entre mezclas asfálticas con diluido RC-250 con emulsión – Freddy Rolando.

2.1.3. Agregado

El agregado, también conocido como material granular o agregado mineral, es cualquier mineral duro e inerte usado, en forma de partículas graduadas o fragmentos, como parte de un pavimento de mezcla asfáltica³. Los agregados típicos incluyen arena,

³ Conceptos básicos – Prof. Liliana Quintero/ Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda UNEFM.

grava, piedra triturada, escoria y polvo de roca. El agregado constituye entre el 90 y el 95%, en peso, y entre el 75 y el 85%, en volumen, de la mayoría de las estructuras de pavimento. El comportamiento de un pavimento se ve altamente influenciado por la selección apropiada del agregado, debido a que el agregado mismo proporciona la mayoría de las características de capacidad portante.

2.1.4. Fuentes de agregados

Los agregados usados en el pavimento asfáltico se clasifican, generalmente, de acuerdo a su origen. Estos incluyen: agregados naturales, agregados procesados y agregados sintéticos o artificiales. Los tipos de agregados usados en las mezclas asfálticas son:

- **Agregado Grueso**

Los agregados gruesos son partículas grandes, mayores aproximadamente a 2,5mm (equivalente a 0, 1 plg). Normalmente son obtenidos de gravas naturales de lechos de ríos, rocas trituradas o de gravas trituradas y zarandeadas.

- **Piedra Triturada**

El material bruto para piedra triturada debe provenir de roca dura, como la arenisca, basalto, piedra caliza u otra piedra de calidad equivalente, o piedra de canto rodado con un tamaño de partícula de por lo menos tres veces más grande que el tamaño máximo requerido para el producto final. El producto triturado puede ser tamizado para obtener el tamaño del agregado deseado. Algunas veces, por razones de economía, el material triturado es usado tal como se lo produce con un ligero tamizado o sin él. Este agregado se lo denomina agregado "triturado sin cribar", en muchas oportunidades pueden utilizarse en la construcción de pavimentos asfálticos. Las piedras trituradas deben tener uniformidad, limpieza, dureza y durabilidad suficiente, y estar libres de una cantidad perjudicial de partículas planas o alargadas, sucias con barro o con materiales orgánicos y otras sustancias perjudiciales.

- **Grava Triturada**

Grava triturada son piezas trituradas de canto rodado o grava para hacerlo más apropiado para su uso en mezclas asfálticas para pavimentación. La calidad puede ser mejorada por medio de la trituración, al cambiar la textura superficial de las partículas

redondeadas en partículas angulosas con mejoras además en la distribución o rangos de tamaño de las partículas.

- Agregado Fino

Los agregados finos, presentan tamaños menores de aproximadamente 2.5mm (0,1plg). Son obtenidos de arena natural proveniente de las facciones finas, obtenidas por zarandeo en las operaciones de trituración de rocas o de gravas trituradas. Los áridos finos son aquellos que pasan el tamiz N°4.

- Arena

La arena se clasifica en: arena natural, arena artificial, polvo de trituración y arena especial. La arena natural se clasifica, por el lugar de excavación en: arena de río, arena de cantera y arena de mar. La arena artificial es producida por la trituración de roca o piedra de canto rodado. Las arenas son partículas rocosas que pasan el tamiz N°4 y quedan retenidas en el N°200; y dentro de estas se encuentran las arenas finas, que son el material que pasa el tamiz N°40 y quedan retenidas en el N°200, y el material que pasa el tamiz N°10 y retenidos en el tamiz N°40 se consideran arenas gruesas. Las partículas que pasan el tamiz N°8 o menos, que se obtienen durante la producción de piedra triturada, se mencionan como "polvo de trituración"

- Filler

Relleno mineral es un producto mineral finamente dividido del que al menos el 65% pasa por el tamiz número 200. La piedra caliza pulverizada es el filler más frecuentemente empleado, aunque pueden utilizarse también otros polvos de piedras, cal apagada, cemento Portland y algunas sustancias minerales muy finas y otras de origen volcánicas. El filler aumenta en muchos casos la estabilidad y la calidad de una mezcla, ayudando en la aportación de agregado fino cuando se utilizan gradaciones cerradas o densa, en estos casos es frecuente el empleo principalmente polvo mineral (Porción de los áridos finos que pasa el tamiz número 200), y otros fillers.

2.1.5. Propiedades del agregado y su evaluación

En un pavimento densamente graduado de mezcla asfáltica, el agregado conforma el 90 a 95%, en peso, de la mezcla de pavimentación. Esto hace que la calidad del

agregado usado sea un factor crítico en el comportamiento del pavimento. Sin embargo, además de la calidad, se aplican otros criterios que forman parte de la selección de un agregado en una obra de pavimentación. Éstos criterios incluyen el costo y la disponibilidad del agregado. Aún más, un agregado que cumple con los requisitos de costo y disponibilidad deberá poseer también ciertas propiedades para poder ser considerado apropiado para pavimento asfáltico de buena calidad. Éstas propiedades son:

- Graduación y tamaño máximo de partícula.
- Limpieza.
- Dureza.
- Forma de partícula.
- Textura de la superficie.
- Capacidad de absorción.
- Peso específico.
- Afinidad con el asfalto.

2.1.6. Asfalto

Son materiales aglomerantes sólidos o semisólidos de color que varía de negro a pardo oscuro y que se licuan gradualmente al calentarse, cuyos constituyentes predominantes son betunes que se dan en la naturaleza en forma sólida o semisólida o se obtienen de la destilación del petróleo; o combinaciones de éstos entre sí o con el petróleo o productos derivados de estas combinaciones⁴.

2.1.7. Clasificación, propiedades físicas y químicas del asfalto

2.1.7.1. Propiedades químicas del asfalto

El asfalto está conformado por una mezcla compleja de compuestos orgánicos de alto peso molecular en los que sobresalen los hidrocarburos. Estos hidrocarburos

⁴ ASTM Standard D8.

principalmente compuestos de carbono e hidrogeno, tienen en su composición azufre, nitrógeno, vanadio, níquel, entre otros compuestos y metales pesados. Estos minerales juegan un rol importante en el comportamiento del asfalto y en su desempeño de adherencia. Según su composición, estos hidrocarburos pueden pertenecer a los siguientes grupos:

- Alifáticos saturados o parafínicos.
- Nafténicos o cicloparafínicos.
- Aromáticos.
- Alifáticos no saturados.

Las moléculas del asfalto, al ser este mismo una mezcla de gran número de hidrocarburos de distinto peso molecular, poseen diferente carácter soluble y tienden a agruparse según sus características físicas, dando lugar a una estructura coloidal. Las moléculas más pesadas se agrupan formando una fase dispersa o en suspensión mientras que las más ligeras conforman el medio de dispersión. Estas moléculas pesadas en suspensión son llamadas asfaltenos, mientras que el medio de dispersión son los maltenos (León et al, 2006).

2.1.7.2. Propiedades físicas del asfalto.

Las propiedades físicas del asfalto, de mayor importancia para el diseño, construcción y mantenimiento de carreteras son: durabilidad, adhesión, susceptibilidad a la temperatura, envejecimiento y endurecimiento.

- Durabilidad

Es la medida de que tanto puede retener un asfalto sus características originales cuando es expuesto a procesos normales de degradación y envejecimiento. Es una propiedad juzgada principalmente a través del comportamiento del pavimento, y por consiguiente es difícil de definir solamente en términos de las propiedades del asfalto. Esto se debe a que el comportamiento del pavimento está afectado por el diseño de la mezcla, las

características del agregado, la mano de obra en construcción y otras variables que incluyen la misma durabilidad del asfalto.

- Adhesión y cohesión

La adhesión es la capacidad del asfalto para adherirse o pegarse al agregado en la mezcla de pavimentación. La cohesión es la capacidad del asfalto de mantener firmemente, en su puesto, las partículas de agregado en el pavimento terminado. No existe un ensayo directo sobre el asfalto que mida estas propiedades. Sin embargo, sí es posible medir la adherencia de un asfalto con un agregado específico. Esta es una propiedad muy importante en una mezcla asfáltica por lo que se discutirá más adelante con más detalle.

- Susceptibilidad a la temperatura

Todos los asfaltos son termoplásticos; esto es, se vuelven más duros (más viscosos) a medida que su temperatura disminuye, y más blandos (menos viscosos) a medida que la temperatura aumenta. Esta característica se conoce como susceptibilidad a la temperatura y es una de las propiedades más valiosas en un asfalto. La susceptibilidad a la temperatura varía entre asfaltos de petróleos de diferente origen, aún si los asfaltos tienen el mismo grado de consistencia. Es muy importante conocer la susceptibilidad a la temperatura del asfalto que va a ser utilizado pues ella indica la temperatura adecuada a la cual se debe mezclar el asfalto con el agregado, y la temperatura a la cual se debe compactar la mezcla sobre la base de la carretera.

Es de vital importancia que un asfalto sea susceptible a la temperatura puesto que debe tener suficiente fluidez para que pueda cubrir las partículas de agregado durante el mezclado y así permitir que estas partículas se desplacen unas respecto a otras durante la compactación. Luego deberá volverse lo suficientemente viscoso, a temperaturas ambientales normales, para mantener unidas las partículas de agregado.

- Endurecimiento y envejecimiento

Los asfaltos tienden a endurecerse en la mezcla asfáltica durante la construcción, y también en el pavimento terminado. Este endurecimiento es causado principalmente

por el proceso de oxidación (el asfalto combinándose con el oxígeno), el cual ocurre más fácilmente a altas temperaturas y en películas delgadas de asfalto (como la película que recubre las partículas de agregado). No todos los asfaltos se endurecen a la misma velocidad cuando son calentados en películas delgadas. Por lo tanto, cada asfalto debe ser ensayado por separado para poder determinar sus características de envejecimiento, y así poder ajustar las técnicas constructivas para minimizar el endurecimiento. Estos ajustes incluyen mezclar el asfalto con el agregado a la temperatura más baja posible y durante el tiempo más corto que pueda obtenerse en la práctica. El endurecimiento del asfalto continua después de la construcción. Una vez más, las causas principales son la oxidación y la polimerización. Estos procesos pueden ser retardados si se mantiene, en el pavimento terminado, una cantidad pequeña de vacíos (de aire) interconectados, junto con una capa gruesa de asfalto cubriendo las partículas de agregado.

2.1.8. Definición de mezcla asfáltica en caliente

Se define como mezcla asfáltica (o bituminosa) en caliente a la combinación de áridos (incluido el polvo mineral) con un ligante. Las cantidades relativas de ligante y áridos determinan las propiedades físicas de la mezcla. El proceso de fabricación implica calentar el agregado pétreo y el ligante a alta temperatura, muy superior a la ambiental.

2.1.9. Propiedades de las mezclas asfálticas

Las propiedades del cemento asfáltico como así también los del agregado pétreo influyen en las propiedades que presenta una mezcla asfáltica, estas dependen de varios factores entre ellos el medio ambiente, magnitud, tiempo de aplicación y frecuencia de las cargas de los vehículos y estado de tensiones, como algunas mezclas asfálticas en caliente no todas tienen las mismas propiedades cada una está diseñada para diferentes condiciones de solicitaciones de tráfico y ambiente. Consideramos algunas propiedades las siguiente:

- Estabilidad

Se define como la capacidad de las mezclas asfálticas de soportar cargas y resistir tensiones a las que se ve sometida, con unos valores de deformación tolerables, en otras palabras, es una representación empírica de la resistencia de material. Suelen evaluarse mediante ensayos de base fundamentalmente empíricos donde la probeta es llevada a una rotura, la carga de rotura es lo que se denomina estabilidad de la mezcla, la cual depende de la textura superficial, granulometría del agregado, forma de las partículas, densidad de la mezcla y contenido de asfalto.

- Resistencia a las deformaciones plásticas

La aplicación de las cargas a baja velocidad y a las altas temperaturas produce una acumulación de deformaciones de tipo plástico debido al comportamiento visco-elasto-plástico de las mezclas bituminosas.

- Resistencia a la fatiga

Se define como la capacidad del pavimento asfáltico de soportar flexiones repetidas causadas por el pasaje de las cargas de ruedas. Las pruebas han demostrado que la cantidad de asfalto es extremadamente importante cuando se considera la resistencia a la fatiga.

> contenido de asfalto = > resistencia a la fatiga.

La fatiga se traduce en un aumento de las deformaciones elásticas en superficie y cuando se llega a un estado avanzado de la misma se pueden observar agrietamientos lo que se denomina piel de cocodrilo.

- Durabilidad

Propiedad de una mezcla asfáltica que indica su capacidad de resistir desintegraciones debida al tránsito y al clima. El deterioro al clima se basa en los cambios de las características del asfalto, tales como su oxidación y volatilización que determina una alteración del pavimento y agregado sumado, a la acción del agua incluso su congelamiento y deshielo.

Se da mayor durabilidad si se incrementa el contenido de asfalto, cuando existan granulometrías cerradas del agregado y existan mezclas bien compactadas e impermeables.

- Flexibilidad

Es la capacidad de la mezcla asfáltica de adaptarse a asentamientos graduales y movimientos en la base y la subrasante, generalmente la flexibilidad de una mezcla asfáltica se incrementa con altos contenidos de asfalto y agregados de granulometría relativamente abierta.

- Resistencia al deslizamiento

Es la capacidad de la superficie del pavimento asfáltico, de ofrecer resistencia al resbalamiento o deslizamiento, especialmente cuando está húmeda, los principales contribuyentes para ofrecer una resistencia son adecuados contenidos de asfalto y agregados con textura superficial rugosa.

- Impermeabilidad

Resistencia que tiene un pavimento asfáltico al pasaje de agua y aire dentro y a través del mismo. El contenido de índice de vacíos puede ser un índice de la susceptibilidad de una mezcla compactada al pasaje de aire o agua es de mucha importancia la interconexión de vacíos y su comunicación con la superficie. La impermeabilidad al aire o agua es extremadamente importante desde el punto de vista de la durabilidad de las mezclas asfálticas.

- Trabajabilidad

Facilidad con que las mezclas asfálticas para pavimentación pueden ser colocadas y compactadas, si se pone especial cuidado en un diseño apropiado y se coloca con una maquina distribuidora, la trabajabilidad no será un problema, pero si se coloca de forma manual la trabajabilidad puede verse afectada. Algunas veces las propiedades de los agregados aseguran estabilidades altas, hacen que las mezclas asfálticas que contienen dichos agregados sean difíciles de distribuir o compactar. Como los problemas de trabajabilidad se descubren con mayor frecuencia durante operaciones de

pavimentación, los ajustes en el diseño de la mezcla deben ser realizados rápidamente para permitir la prosecución del trabajo tan eficientemente como sea posible.

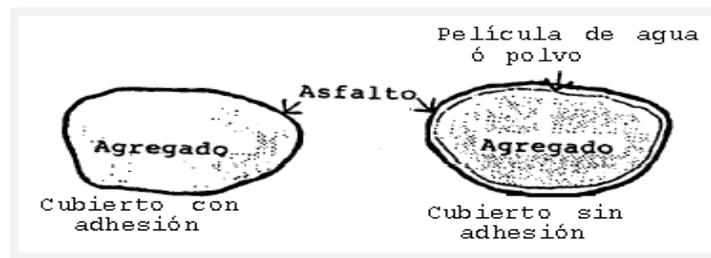
2.1.10. Afinidad asfalto – agregado

La afinidad es la capacidad de un agregado de retener una película de ligante bituminoso sobre su superficie aún en presencia de agua.

De acuerdo con dicha capacidad los agregados se clasifican en hidrófilos (hidrofilícos) cuando son más afines al agua que a los bitúmenes (agregados ácidos) e hidrofóbos cuando no presentan afinidad por el agua (agregados alcalinos).

La afinidad es también una función de la actividad superficial de los agregados la que está representada principalmente por el tipo de carga que presenta la superficie de las partículas que depende fundamentalmente de los minerales presentes.

Figura 3. Adherencia agregado – asfalto.



Fuente: Adhesión entre agregado y asfalto- Ing. Beatriz Schevenin.

En la fisicoquímica de los suelos se puede llegar a una comparación del comportamiento de una mezcla de concreto asfáltico con una arcilla, suelo donde las

fuerzas de superficie creadas por las valencias no satisfechas (iones de intercambio) de los minerales ionizados generan cargas eléctricas que producen fenómenos de atracción repulsión. En estos materiales, el conjunto formado por la capa de agua absorbida y las sustancias disueltas se denomina complejo de adsorción y se puede decir que es el lugar geométrico donde se producen todas las reacciones de atracción repulsión necesarias para generar la resistencia al corte de los suelos arcillosos. En el caso de un suelo granular, la mencionada actividad es mucho menor ya que las partículas presentan una superficie específica menor y una masa mucho mayor que las partículas de arcilla. Resumiendo, se puede concluir que, la actividad de un suelo se mide a través de la capacidad de atraer iones, la cual permite determinar en forma aproximada la magnitud de la carga disponible en una partícula.

En el caso de una mezcla asfáltica, lo que se trata de alcanzar es una cohesión a través del aglutinante para que esta, en combinación con la fricción interna de las partículas granulares, genere una resistencia al corte adecuado del material artificialmente producido. Esta cohesión dependerá entonces de la capacidad de las partículas de absorber una película de aglutinante que, además de recubrir las partículas y protegerlas del intemperismo, produce un efecto análogo al de la capa de agua absorbida de los suelos arcillosos.

La capacidad de absorber una película de ligante dependerá entonces de la actividad superficial de las partículas de agregado y, principalmente, del tipo de carga disponible. La carga eléctrica debida a las valencias no satisfechas podrá ser positiva o negativa. En el primer caso, las partículas granulares repelerán a las moléculas dipolares de agua produciendo un buen mojado de su superficie por parte del ligante (buena afinidad con el bitumen) y, en el segundo caso, ocurrirá un fenómeno inverso, es decir, las moléculas dipolares de agua serán atraídas por las partículas de los agregados y la absorción de aglutinante se verá inhibida (mala afinidad con el bitumen).

En consecuencia, se puede decir que, en la adherencia de las mezclas bituminosas intervienen fenómenos superficiales entre los agregados y el bitumen gobernados por la energía generada por las fuerzas en la interface de ambos, donde el factor más

importante y decisivo en la adherencia es la naturaleza de la piedra, pero, en mayor o menor grado interviene también la naturaleza del bitumen determinada por el crudo de origen (base asfáltica o parafínica).

2.1.11. Rocas alcalinas

Término aplicado a rocas ígneas en las que el feldespato es esencialmente sódico y/o potásico. El término alcalino también se utiliza para rocas que contienen feldespatoideos. Una roca u otro elemento alcalino es considerado cuando su PH es superior a 7 en la escala que varía de 1 a 14, también es denominada alcalinas cuando su contenido de sílice es inferior a 55 %.

2.1.12. Rocas ácidas

El concepto de roca ácida, o material parental ácido, se refiere a rocas ígneas que contienen una cantidad significativa de sílice (SiO_2) con más del 66% en peso de sílice, ejemplos de ello son el granito o la riolita, otras rocas ácidas son la espumita, la obsidiana, la sienita, y el basalto que es el más común en España. El término proviene de considerar a la sílice como un óxido ácido, en teoría, unido al agua, puede formar una clase de ácidos silícicos y así a los minerales que forman las rocas serían considerados como sales de estos ácidos. Si, por tanto, una roca contiene sílice en exceso, se considera como si tuviera un exceso del elemento ácido principal, las rocas ácidas fueron anteriormente definidas en términos de porcentaje de sílice.

Si el contenido de Sílice varía entre 55% y 66% el agregado se denomina como agregado intermedio y su comportamiento estará determinado no solo por su naturaleza, sino también por el tipo de cemento asfáltico.

2.1.13. Definición de PH

El pH es el grado de acidez de una sustancia, es decir la concentración de iones de H^+ en una solución acuosa, término (del francés *pouvoir hydrogène*, 'poder del hidrógeno') el pH también se expresa a menudo en términos de concentración de iones hidronio.

El agua y todas las soluciones acuosas contiene concentración de H^+ , si no iones de OH^- . En el agua pura se cumple que la concentración de iones H^+ es igual a la concentración de iones OH^- , por eso se dice que el agua es neutra.+ Como las concentraciones de iones H^+ de y OH^- son muy pequeñas, en 1909, el químico danés Sorensen definió el potencial hidrógeno (pH) como el logaritmo negativo de la concentración molar (más exactamente de la actividad molar) de los iones hidrógeno. Ésto es:

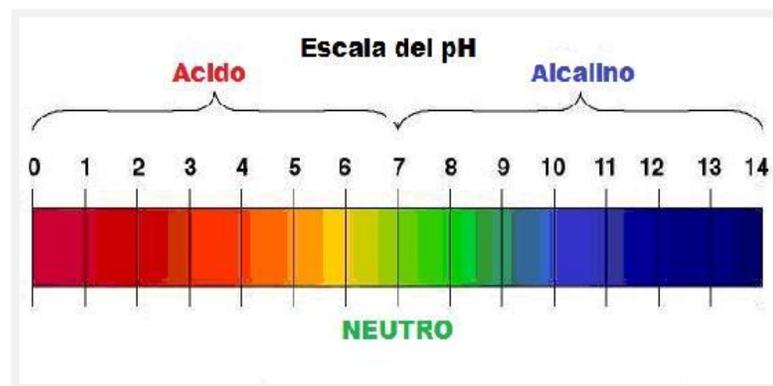
$$pH = - \log [H^+].$$

2.1.13.1. Interpretación de la escala de PH

La escala de pH se establece en una recta numérica que va desde el 0 hasta el 14. El número 7 corresponde a las soluciones neutras. El sector izquierdo de la recta numérica indica acidez, que va aumentando en intensidad cuando más lejos se está del 7.

Por ejemplo, una solución que tiene el pH 1 es más ácida o más fuerte que aquella que tiene un pH 6. De la misma manera, hacia la derecha del 7 las soluciones son básicas (alcalinos) y son más fuertes o más básicas cuanto más se alejan del 7. Por ejemplo, una base que tenga pH 14 es más fuerte que una que tenga pH 8.

Figura 4. Escala del pH.



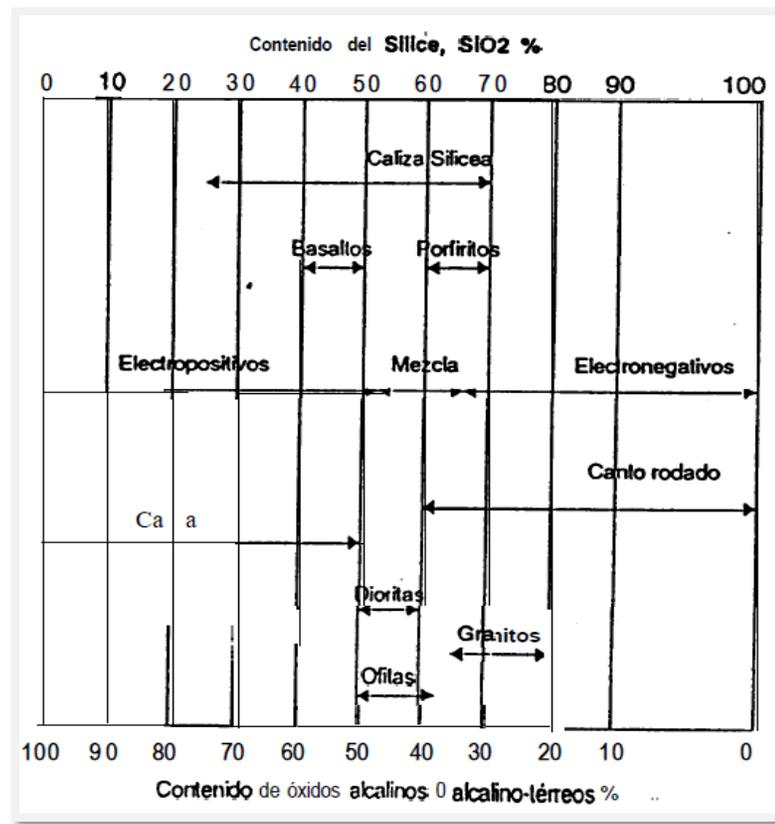
Fuente: Escala pH buscador Google/www.esperimentoscientificos.es/ph/escala-del-ph.

2.2. MARCO REFERENCIAL⁵

Las rocas, cualquiera que sea su origen se dividen, en tres grupos; Ígneas, sedimentarias y metamórficas y casi siempre presentan su punto en común que es la presencia de sílice, que constituye aproximadamente el 60% de la corteza terrestre. Los agregados son clasificados como alcalinos o ácidos. Los del tipo alcalino son calizas o carbonatos de calcio y mármoles, los del tipo ácido son silicatos como granitos y cuarzos. Esto simplifica al entender que todos los agregados contienen una mezcla de ambos tanto de minerales alcalinos como ácidos. Un factor importante para las propiedades de adhesión de un agregado es su contenido de sílica, SiO_2 , lo que muestra en la siguiente figura para los agregados más comunes:

Figura 5. Contenido de sílice en agregados.

⁵ Adhesión entre agregado y asfalto- Ing. Beatriz Schevenin.



Fuente: Adhesión entre agregado y asfalto- Ing. Beatriz Schevenin.

Hay una convicción general sobre los agregados tales como las calizas (bajas en contenido de sílice) que dan buena adhesión con el asfalto. Esto puede explicarse por el hecho de que los asfaltos contienen Ácido nafténico.

Este ácido tiene un grupo ácido carboxílico, $COOH$, y una parte de hidrocarburos que es similar a la estructura del asfalto. Cuando una molécula entra en contacto con su agregado alcalino, la parte Ácida carboxílica, será absorbida en la superficie con las terminales del hidrocarburo hacia afuera. Esto cambia la superficie del agregado lo suficiente para que el ligante se adhiera aún en presencia de agua.

La mayor desventaja de los agregados calizos es que normalmente tienden a desgastarse o pulirse con el paso del tráfico y en el futuro debido a los daños evitará el curso sobre la superficie.

Los agregados silíceos normalmente no son tan sensibles al desgaste o pulido, pero tienen otra desventaja que al ser ácidos no responden a la acción del ácido nafténico del asfalto. De hecho, los ácidos se contrarrestan entre ellos y es muy difícil de obtener un buen enlace entre ellos. Algunas veces hay componentes alcalinos en el ligante que son muy débiles y no pueden favorecer el enlace con la sílica.

La mayoría de los agregados están compuestos por varios minerales del tipo silíceo y alcalino; en la siguiente tabla se resumen propiedades deseables de rocas para agregados utilizados en mezclas asfálticas en caliente.

Tabla 7. Propiedades deseables en rocas para agregados utilizados en mezclas asfálticas en caliente.

Tipo de roca		Dureza, tenacidad	Resistencia al desprendimiento	Textura superficial	Forma fracturada
Ígnea	Granito	Regular	Regular	Regular	Regular
	Sienita	Bueno	Regular	Regular	Regular
	Diorita	Bueno	Regular	Regular	Bueno
	Basalto	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno
	Diabasa	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno
	Gabro	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno
Sedimentaria	Caliza, dolomita	Pobre	Bueno	Bueno	Regular
	Arenisca	Regular	Bueno	Bueno	Bueno
	Chert	Bueno	Regular	Pobre	Bueno
	Lutita	Pobre	Pobre	Regular	Regular
Metamórfica	Gneis	Regular	Regular	Bueno	Bueno
	Esquisto	Regular	Regular	Bueno	Regular
	Pizarra	Bueno	Regular	Regular	Regular
	Cuarcita	Bueno	Regular	Bueno	Bueno
	Mármol	Pobre	Bueno	Regular	Regular
	Serpentina	Bueno	Regular	Regular	Regular

Fuente: Calidad de agregados para mezclas asfálticas en caliente – Ing. Yury Lenin Ramírez.

2.3. MARCO NORMATIVO

El presente trabajo tiene como base las normas:

- ASTM (American Society of Testing Materials) con sus siglas en español Asociación Americana de Ensayos de Materiales. Utilizada esta norma como base para la realización de ensayos de caracterización de agregados pétreos y asfalto.
- Norma AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) con sus siglas en español Asociación Americana de Carreteras Estatales y Transportes. Utilizada esta norma como base para la realización de ensayos de caracterización de agregados pétreos y asfalto.

2.3.1. Parámetros de clasificación de la mezcla asfáltica

Tabla 8. Parámetros de clasificación de mezclas asfálticas.

Parámetro de clasificación	Tipo de mezcla
Fracciones de agregados empleados	Masilla
	Mortero
	Concreto
	Macadam
Temperatura de puesta en obra	En frío
	En caliente
Huecos en la mezcla (h)	Cerradas ($h < 6\%$)
	Semicerradas ($6\% < h < 12\%$)
	Abiertas ($h > 12\%$)
	Porosas ($h > 20\%$)
Tamaño máximo del agregado (t máx.)	Gruesas (t máx. > 10 mm)
	Finas (t máx. < 10 mm)
Estructura del agregado	Con esqueleto mineral
	Sin esqueleto mineral
Granulometría	Continuas
	Discontinuas

Fuente: Alejandro Padilla R. 2004 –Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de las mezclas bituminosas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pisa.

2.3.2. Criterios de diseño normalizados para los agregados

Para el diseño de mezclas asfálticas se debe cumplir con los ensayos de caracterización normados por AASHTO Y ASTM.

Tabla 9. Especificaciones normalmente empleadas para los ensayos en agregados gruesos y finos.

Áridos	AASHTO	ASTM
Tamizado:		
Tamizado por vía seca	-	-
Áridos, gruesos y finos	T27	C136
Filler	T37	D546
Tamizado por vía húmeda (véase Asphalt Plant Manual, Instituto del Asfalto, MS-3)	-	-
Equivalente de arena	T176	-
Abrasión (desgaste)	T96	C131
Resistencia a los sulfatos	T104	C88
Peso específico:		
Áridos gruesos	T85	C127
Áridos finos	T88	C128
Peso unitario	T19	C29
Humedad	-	-

Fuente: Manual del Instituto del Asfalto.

Tabla 10. Requisitos de calidad del material pétreo en concreto bituminoso mezclado en caliente.

Característica	Valor
Densidad relativa, mínimo	2,4 gr/cm ³
Desgaste de los ángeles %	Max. 40%

Pérdida de peso al sulfato de sodio %	Max. 12%
Equivalente de arena %	Min. 45%
Porcentaje de caras fracturadas	Min. 75%

Fuente: Especificaciones técnicas generales de mantenimiento periódico de carreteras del Servicio Nacional de Carreteras (La Paz – Bolivia 2003).

2.3.3. Criterios de diseño normalizados para el cemento asfáltico

Tabla 11. Especificaciones normalmente empleadas para los ensayos – betún asfáltico.

Betún asfáltico	AASHTO	ASTM
Penetración	T49	D5
Viscosidad (véase también el ensayo Saybolt-Furor, Método de ensayo AASHTO T72 o Método de ensayo ASTM D88)	T201	D2 140
Punto de inflamación (véase también el punto de inflamación Pensky-Manens, Método AASHTO T73 y ASTM D93)	T18	D92
Ensayo de estufa en película delgada	T179	D1754
Ductilidad	T51	D113
Solubilidad	T44	D4
Peso específico	T43	D70
Punto de reblandecimiento	TS3	D36

Fuente: Manual del Instituto del Asfalto.

Tabla 12. Especificaciones técnicas esenciales del producto bituminoso PROBISA S.A.– Cemento asfáltico de petróleo (C.A.P.) 85/100.

Características	Unidad	Especificación	Método	
			AASHTO	ASTM
Penetración 25°C, 100 gr, 5 seg.	0,1 mm	Min. 85 - Max. 100	T-49	D-5
Viscosidad 60°C.	Poises	Informar	T-316	D-4402

Gravedad específica a 25°C	Kg/m ³	Min. 1 - Max. 1,05	T-228	D-70
Punto de ablandamiento	°C	Min. 43 - Max. 53	T-53	D-36
Ductilidad 25°C. 5cm/min	cm	Min. 100	T-51	D-113
Ensayo de la mancha heptano-xilol, (20% xilol).		Negativo	T-102	---
Punto de inflamación	°C	Min. 232	T-48	D-92
Índice de penetración		Min. -1,5 / Max. +1,0	P. Abl.-Pen	
Solubilidad en tricloroetileno	%	Min 99	T-44	D-2042
Contenido de agua (% de volumen)	%	Max. 0,2	T-55	D-95
<u>Película delgada rotatoria</u>				
Penetración del residuo (% del original)	%	Min. 54	T-49	D-5
Perdida de calentamiento	%	Max. 1,0	T-240	D-2872
Viscosidad 60°C.	Poises	Informar	T-316	D-4402
Ductilidad 25°C. 5cm/min	cm	Min. 100	T-51	D-113
Índice de durabilidad		Max. 4,0	T-240	D-2872

Fuente: Especificaciones técnicas del cemento asfáltico PROBISA S.A. (C.A.P 85-100).

2.3.4. Diseño de mezclas asfálticas método de diseño Marshall

El concepto del método Marshall para diseño de mezclas de pavimentación fue formulado por Bruce Marshall, ingeniero de asfaltos del Departamento de Autopistas del estado de Mississippi. El cuerpo de ingenieros de Estados Unidos, a través de una extensiva investigación y estudios de correlación, mejoró y adicionó ciertos aspectos al procedimiento de prueba Marshall y desarrollo un criterio de diseño de mezclas. El método original de Marshall, sólo es aplicable a mezclas asfálticas en caliente para pavimentación que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1”) o menor. El método modificado se desarrolló para tamaños máximo arriba de 38 mm (1.5”). Está pensado para diseño en laboratorio y control de campo de mezclas asfálticas en caliente con graduación densa. Debido a que la prueba de estabilidad es de naturaleza empírica, la importancia de los resultados en términos de estimar el comportamiento en campo se pierde cuando se realizan modificaciones a los procedimientos estándar. El método Marshall utiliza especímenes de prueba estándar de una altura de 64 mm (2 ½”) y 102 mm (4”) de diámetro. Se preparan mediante un

procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar mezclas de asfalto-agregado. (ASTM D1559). Los dos aspectos principales del método de diseño son, la densidad-análisis de vacíos y la prueba de estabilidad y flujo de los especímenes compactados. La estabilidad del espécimen de prueba es la máxima resistencia en N (lb) que un espécimen estándar desarrollará a 60 °C cuando es ensayado. El valor de flujo es el movimiento total o deformación, en unidades de 0.25 mm (1/100") que ocurre en el espécimen entre estar sin carga y el punto máximo de carga durante la prueba de estabilidad.

2.3.4.1. Especificaciones de la metodología

Un punto inicial para el diseño es escoger el porcentaje de asfalto para el promedio de los límites de vacíos de aire, de 4%. Todas las propiedades medidas y calculadas bajo este contenido de asfalto deberán ser evaluadas comparándolas con los criterios para el diseño de mezclas (Tabla 14). Si todos los criterios se cumplen, entonces se tendrá el diseño preliminar de la mezcla asfáltica, en caso de que un criterio no se cumpla, se necesitará hacer ajustes, o rediseñar la mezcla, según los criterios del ingeniero.

Tabla 13. Límites sugeridos para los resultados de los ensayos método Marshall.

Método de proyecto	Tráfico pesado y muy pesado		Tráfico medio		Tráfico ligero	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Número de golpes de compactación en cada extremo de la probeta						

Estabilidad, libras	750	---	500	---	500	---
Fluencia, expresada en 0,01 pulgadas	8	18	8	18	8	20
Huecos en la mezcla total %						
Capas de superficie o nivelación	3	5	3	5	3	5
Sheet asphalt con arena o piedra	3	8	3	8	3	8
Capas intermedia o de base	3	8	3	8	3	8
Huecos de los áridos rellenos de asfalto %						
Capas de superficie o nivelación	75	82	75	85	75	85
Sheet asphalt con arena o piedra	65	82	65	75	65	75
Capas intermedia o de base	65	82	65	75	65	75

Fuente: Manual del Instituto del Asfalto.

La estabilidad que presenta como especificación en el Manual del Instituto del Asfalto es un valor muy bajo, ésto puede considerarse a la antigüedad de la norma y la no actualización del mismo, se tomara como especificación de la estabilidad a 75 golpes un valor igual a 1500 libras (Especificaciones técnicas generales de mantenimiento periódico de carreteras del Servicio Nacional de Carreteras (La Paz – Bolivia 2003).

Figura 6. Mínimo de porcentaje de vacíos de agregado mineral (VMA).

Máximo tamaño de partícula nominal		Porcentaje mínimo VMA		
		Porcentaje diseño vacíos de aire		
mm	in	3.0	4.0	5.0
1.18	No. 16	21.5	22.5	23.5
2.36	No. 8	19.0	20.0	21.0
4.75	No. 6	16.0	17.0	18.0
9.5	3/8.	14.0	15.0	16.0
12.5	1/2.	13.0	14.0	15.0
19	3/4.	12.0	13.0	14.0
25	1.0	11.0	12.0	13.0
37.5	1.5	10.0	11.0	12.0

Fuente: Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas-Secretaría de Comunicaciones y Transportes Instituto Mexicano del Transporte.

2.3.4.2. Evaluación y ajustes de una mezcla de diseño

Cuando se desarrolla una mezcla de diseño, es frecuentemente necesario hacer varias mezclas de prueba para encontrar una que cumpla con todos los criterios de diseño. Cada una de las mezclas de prueba sirve como una guía para evaluar y ajustar las pruebas siguientes. Para diseño de mezclas preliminares o exploratorias, es aconsejable comenzar con una graduación de agregado que se acerque a la media de los límites establecidos. Las mezclas de prueba iniciales sirven para establecer la fórmula de trabajo y verificar que la graduación de agregado dentro de los límites especificados puede ser reproducida en una planta mezcladora. Cuando las mezclas de pruebas iniciales fallan con los criterios de diseño en cualquier contenido de asfalto seleccionado, será necesario modificar o, en algunos casos, rediseñar la mezcla. Para corregir una deficiencia, la manera más fácil de rediseñar una mezcla es cambiar la graduación de los agregados ajustando los porcentajes utilizados. Frecuentemente este ajuste es suficiente para cumplir con las especificaciones. Si el ajuste de los porcentajes no es suficiente, se deberán realizar serias consideraciones. Existen lineamientos generales para ajustar las mezclas de prueba, aunque estas sugerencias no funcionan en todos los casos:

2.3.4.2.1. Vacíos bajos y estabilidad baja

Los vacíos pueden incrementarse en diferentes formas. Como un acercamiento general para lograr vacíos altos en el agregado mineral (en consecuencia, proveer de suficientes espacios, para una adecuada cantidad de asfalto y vacíos de aire), la graduación del agregado debe ajustarse mediante la adición de más agregado grueso o fino. Si el contenido de asfalto es más alto de lo normal y el exceso no es necesario para remplazar el absorbido por el agregado, entonces el contenido de asfalto deberá reducirse a fin de incrementar el porcentaje de vacíos, proveyendo un adecuado VAM. Se deberá recordar que disminuir el porcentaje de asfalto podrá tender a bajar la durabilidad del pavimento. Demasiada reducción en el contenido de asfalto puede ocasionar fracturación, oxidación acelerada e incremento de la permeabilidad. Si los ajustes anteriores no producen una mezcla estable, el agregado tendrá que cambiarse. Es también posible mejorar la estabilidad e incrementar el contenido de vacíos en el agregado de la mezcla, mediante el incremento del agregado grueso o reducción de la cantidad de material que pasa la malla No. 200. Con la incorporación de arena procesada, el contenido de vacíos puede mejorarse sin sacrificar la estabilidad de la mezcla.

2.3.4.2.2. Vacíos bajos y estabilidad satisfactoria

Bajos contenidos de vacíos pueden eventualmente resultar en inestabilidad debido a flujo plástico o después de que el pavimento ha sido expuesto al tránsito por un periodo de tiempo ante la reorientación de las partículas y compactación adicional. Por su parte, insuficientes vacíos pueden ser producto de la cantidad requerida de asfalto para obtener una durabilidad alta en mezclas finas; sin embargo, la estabilidad es inicialmente satisfactoria por el tránsito específico. Una degradación de agregado pobre durante la producción de la mezcla y/o bajo la acción de tránsito puede ocasionar subsecuentemente inestabilidad y flujo si el contenido de vacíos de la mezcla no es suficiente. Por estas razones, mezclas con vacíos bajos tendrán que ajustarse por uno de los métodos dados, en el inciso anterior sin importar que la estabilidad inicial sea satisfactoria.

2.3.4.2.3. Vacíos satisfactorios y estabilidad baja

La baja estabilidad cuando los vacíos y la graduación del agregado son satisfactorios, puede indicar algunas deficiencias en el agregado. Se deberán tomar consideraciones para mejorar la forma de la partícula de los agregados utilizando material producto de trituración o incrementando el porcentaje de agregado grueso en la mezcla o posiblemente aumentando el tamaño máximo del agregado. Partículas de agregado con textura rugosa y superficies menos redondeadas, presentan más estabilidad cuando se mantiene o incrementa el volumen de vacíos.

2.3.4.2.4. Vacíos altos y estabilidad satisfactoria

Altos contenidos de vacíos se asocian frecuentemente con mezclas con alta permeabilidad; al permitir la circulación de aire y agua a través del pavimento pueden ocasionar endurecimiento prematuro del asfalto, desprendimiento del agregado, o posible desprendimiento del asfalto en el agregado. Aun cuando la estabilidad es satisfactoria, se deberán realizar ajustes para reducir los vacíos. Pequeñas reducciones se lograrán mediante la adición de polvo mineral a la mezcla. Podría ser necesario seleccionar o combinar agregados para lograr una graduación, la cual deberá estar cerca de la curva de máxima densidad.

2.3.4.2.5. Vacíos altos y estabilidad baja

Se deberán tomar en cuenta dos pasos para este tipo de condiciones; el primero es ajustar el volumen de vacíos mediante los métodos discutidos en los puntos anteriores; y en el segundo, si los ajustes no mejoran la estabilidad, deberá hacer una consideración de la calidad de los materiales, conforme en 2.3.4.2.1 y 2.3.4.2.2.

2.4. MARCO CONCEPTUAL

- **Roca:** Una roca es un agregado de uno o más minerales sólidos, con propiedades físicas y químicas definidas, que se agrupan de forma natural. Forman la mayor parte de la tierra y su importancia radica en que contienen el registro del ambiente geológico del tiempo en el que se formaron.
- **Agregado:** El agregado, también conocido como material granular o agregado mineral, es cualquier mineral duro e inerte usado, en forma de partículas graduadas o fragmentos, como parte de un pavimento de mezcla asfáltica (Conceptos básicos – Prof. Liliana Quintero/ Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda UNEFM)
- **Alcalinidad:** Término aplicado a rocas ígneas en las que el feldespato es esencialmente sódico y/o potásico. El termino alcalino también se utiliza para rocas que contienen feldespatoideas por ejemplo el basalto. Una roca u otro elemento alcalino es considerado cuando su PH es superior a 7 en la escala que varía de 1 a 14, también es denominada alcalinas cuando su contenido de sílice es inferior a 55 %.
- **Acidez:** El concepto de roca acida, o material parental ácido, se refiere a rocas ígneas que contienen una cantidad significativa de sílice (SiO₂) con más del 66% en peso de sílice.
- **Asfalto:** Son materiales aglomerantes sólidos o semisólidos de color que varía de negro a pardo oscuro y que se licuan gradualmente al calentarse, cuyos constituyentes predominantes son betunes que se dan en la naturaleza en forma sólida o semisólida o se obtienen de la destilación del petróleo; o combinaciones de éstos entre sí o con el petróleo o productos derivados de estas combinaciones (ASTM Standard D8).
- **Mezcla asfáltica:** las mezclas asfálticas, también reciben el nombre de aglomerados, están formadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonatado. Se fabrican en unas centrales fijas o móviles, se transportan después de la obra y allí se extienden y se compactan. (Kraemer et al. 2004)

- **PH:** El pH es un indicador de la cantidad de $[H^+]$ en la disolución que se forma al poner una determinada cantidad de agua destilada en contacto con una cantidad de suelo. Por tanto, el pH se utiliza como un indicador de la concentración de los iones hidrógeno en el suelo. (Norma UNE 77305).

2.5. ANÁLISIS Y TENDENCIAS

El presente trabajo de investigación realizará una comparación de las propiedades de mezclas asfálticas con agregados alcalinos y ácidos para ello su herramienta principal será la determinar de forma comparativa mediante cuadros y esquemas que denoten claramente las diferencias entre los resultados de los ensayos a realizar según las variables dependientes para ello se utilizará como herramienta la estadística descriptiva: para analizar los comportamientos y tendencias de los resultados y la estadística inferencial: para establecer parámetros y probar la hipótesis planteada.

2.6. POSICIÓN DEL INVESTIGADOR

Es importante conocer cuáles son las propiedades que tienen las mezclas asfálticas para tener buenos resultados al momento de ser colocados en el lugar donde tendrán que cumplir su vida útil de manera que no se presenten fallas en su resistencia mecánica ni física como desprendimientos y asentamientos.

Es relevante realizar un análisis por separado cada elemento que componente las mezclas asfálticas para conocer las propiedades que poseen individualmente y como una mezcla asfáltica.

CAPÍTULO III

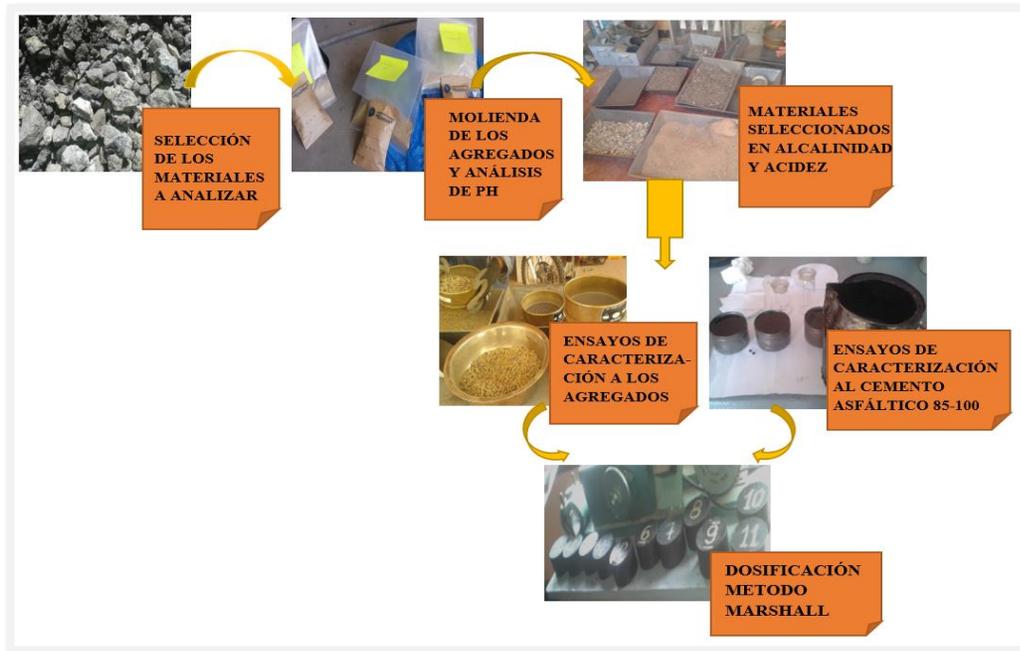
RELEVAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

3.3.INTRODUCCIÓN

En los capítulos anteriormente desarrollados se definieron los objetivos, variables y conceptos fundamentales que serán necesarios para poder llevar a cabo la investigación. En el presente capítulo se desarrollarán ensayos de caracterización a los tipos de agregados seleccionados de composición alcalina y acida, ensayos de caracterización del asfalto a usar (85-100) para la elaboración de la mezcla asfáltica en caliente y así comparar las propiedades que éstas presenten, variando la composición mineralógica de los agregados grueso y fino. A continuación, se describen dichos ensayos con la respectiva norma que los ampara.

3.1.1. Procedimiento a realizar

Figura 7. Resumen del procedimiento a realizar en la investigación.



Fuente: Elaboración propia.

3.2.IDENTIFICACIÓN DE LOS AGREGADOS A UTILIZAR

Los agregados que fueron seleccionados para el análisis de PH fueron escogidos aleatoriamente tomando en cuenta los siguientes factores:

- Que sean de fácil acceso para el acarreo y transporte
- Que sean los materiales más utilizados en obras civiles
- Que en lo posible cumplan con las especificaciones mínimas que rigen las normas.

3.2.1. Agregado de San José de Charaja (SEDECA)

El agregado se encuentra en la comunidad de San José de Charaja, municipio de Uriondo, Provincia de Avilés, departamento de Tarija, Bolivia a $21^{\circ}46'50.10''$ S y $64^{\circ}46'11.71''$ O, a una elevación de 1861 msnm.

Figura 8. Ubicación de la Chancadora San José de Charaja (SEDECA).



Fuente: Elaboración propia.

Los agregados como ser grava $\frac{3}{4}''$. Gravilla $\frac{3}{8}''$ y arena son extraídos del río Camacho en su totalidad son chancados para la provisión de material para la Institución del Servicio Departamental de Caminos de la ciudad de Tarija (SEDECA), los mismos son utilizados en diferentes proyectos de construcción de caminos debido a las buenas propiedades físicas y mecánicas que presenta.

3.2.2. Agregados de Rancho empresa constructora “ERIKA S.R.L.”

El agregado se encuentra en la ciudad de Tarija, Bolivia, en Km.8 carretera a San Lorenzo zona Rancho Sud a $21^{\circ}28'17.32''$ S y $64^{\circ}45'24.35''$ O, a una elevación de 1957 msnm.

Figura 9. Ubicación de la planta chancadora de la empresa constructora “ERIKA S.R.L.”.



Fuente: Elaboración propia.

Los agregados como ser grava $\frac{3}{4}''$. Gravilla $\frac{3}{8}''$ y arena son extraídos del río Guadalquivir en su totalidad son chancados para la provisión de material para la empresa constructora “ERIKA S.R.L.” los mismos son utilizados en diferentes proyectos de construcción en obras civiles que realiza la empresa.

3.2.3. Agregados de Tolomosa empresa constructora “PIARBOL S.R.L.”

El agregado de la empresa constructora se encuentra en la ciudad de Tarija, Bolivia, comunidad de Tolomosa a $21^{\circ}37'09.31''$ S y $64^{\circ}45'34.14''$ O, a una elevación de 1898 msnm.

Figura 10. Ubicación la planta chancadora de la empresa constructora “PIARBOL S.R.L.”.



Fuente: Elaboración propia.

Los agregados como ser grava $\frac{3}{4}$ ". Gravilla $\frac{3}{8}$ " y arena son extraídos del río Tolomosa en su mayoría son chancados para la provisión de material para la empresa constructora “PIARBOL S.R.L.” los mismos son utilizados en diferentes proyectos de construcción en obras civiles que realiza la empresa.

3.2.4. Agregados de la ciudad de Tarija “Recicladora La Salle”

El agregado de la recicladora La Salle se encuentra en la ciudad de Tarija, Bolivia, en la zona de Miraflores a $21^{\circ}34'12.74''$ S y $64^{\circ}42'27.42''$ O, a una elevación de 1829 msnm.

Figura 11. Ubicación de la planta chancadora de la “Seleccionadora La Salle”.



Fuente: Elaboración propia.

Los agregados como ser grava $\frac{3}{4}$ ". Gravilla $\frac{3}{8}$ " y arena son extraídos del río Guadalquivir en su mayoría son chancados para la comercialización de agregados que realiza la seleccionadora La Salle.

3.2.5. Agregados de Santa Ana empresa constructora “JOSBRA S.R.L.”

El agregado de la empresa constructora “JOSBRA S.R.L.” se encuentra en la comunidad de Santa Ana provincia Cercado de Tarija, Bolivia, a $21^{\circ}33'01.32''$ S y $64^{\circ}35'29.69''$ O, a una elevación de 1932 msnm.

Figura 12. Ubicación de la planta chancadora de la empresa constructora “JOSBRA S.R.L.”.



Fuente: Elaboración propia.

Los agregados como ser grava $\frac{3}{4}$ ". Gravilla $\frac{3}{8}$ " y arena son extraídos del rio Santa Ana en su mayoría son chancados para la comercialización de agregados que realiza la constructora “JOSBRA S.R.L.”.

3.2.6. Agregados de La Pintada (Alcaldía)

El agregado de la comunidad de La Pintada se encuentra en la provincia Cercado del departamento de Tarija, Bolivia, a $21^{\circ}37'04.06''$ S y $64^{\circ}38'34.72''$ O, a una elevación de 1780 msnm.

Figura 13. Ubicación de la planta chancadora de La Pintada (Gobierno Autónomo Municipal de la provincia de Cercado).



Fuente: Elaboración propia.

Los agregados como ser grava $\frac{3}{4}$ ". Gravilla $\frac{3}{8}$ " y arena son extraídos del río Santa Ana en su totalidad son chancados para la provisión de material para el gobierno autónomo municipal de Cercado (Tarija Capital), los mismos son utilizados en diferentes proyectos de construcción de asfaltado de calles de la ciudad de Tarija.

3.2.7. Agregados de San Simón - O'Connor empresa constructora "EUROFINSA"

Los agregados utilizados en el análisis de PH se encuentran en la comunidad de San Simón, municipio de Entre Ríos, Provincia Burnet O'Connor, departamento de Tarija, Bolivia a $21^{\circ}28'54.09''$ S y $64^{\circ}10'04.06''$ O, a una elevación de 1270 msnm.

Figura 14. Ubicación de la planta chancadora de la empresa constructora “EUROFINSA”.



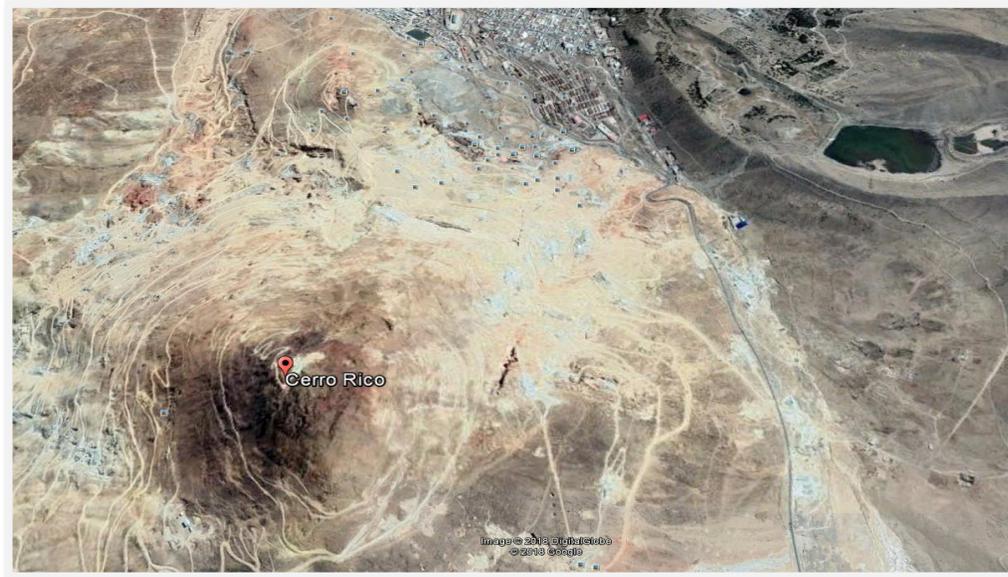
Fuente: Elaboración propia.

Los agregados como ser grava $\frac{3}{4}$ ". Gravilla $\frac{3}{8}$ ", arena fina y arena calero son extraídos de roca de montaña de la peña de San Simón, transportados a la comunidad El Pajonal para su realizar la trituración de las rocas en una maquina chancadora de agregados para su utilización en la construcción de las carreteras como ser Entre Ríos - Palos Blancos y otras afines a la provincia, debido a las buenas propiedades físicas y mecánicas que presentan estos agregados son utilizados en las capas del firme de las carreteras que realiza la empresa constructora “Eurofinsa”.

3.2.8. Agregados del Cerro Rico de Potosí

Los agregados utilizados en el análisis de PH son extraídos del Cerro Rico de la ciudad de Potosí, departamento de Potosí, Bolivia a $19^{\circ}37'09.99''$ S y $65^{\circ}44'31.05''$ O, a una elevación de 4444 msnm.

Figura 15. Ubicación del Cerro Rico del departamento de Potosí.



Fuente: Elaboración propia.

Los agregados extraídos del Cerro Rico de Potosí tienen composiciones mineralógicas diferentes y un alto índice de cristalinidad estos son exportados a países cercanos como Chile para la fabricación de aceros, para cerámica y otros usos en construcción civil.

Existen numerosas empresas mineras que realizan la extracción de estas rocas, las mismas son comercializadas a cooperativas mineras que realizan su trituración en diversos tamaños.

3.3. IDENTIFICACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO

El cemento asfáltico utilizado fue proporcionado por la dirección de obras públicas municipales del Gobierno Autónomo Municipal de la Ciudad de Tarija y la Provincia Cercado con las características de ser un betún C.A.P. 85-100 de procedencia chilena perteneciente a los productos bituminosos PROBISA S.A. Utilizado para la pavimentación de las calles de la ciudad de Tarija. La planta de calentamiento del cemento asfáltico se encuentra ubicado en la ciudad de Tarija, provincia Cercado zona Barrio el Carmen a $21^{\circ}31'29.90''$ S, $64^{\circ}44'23.45''$ O a una elevación 1896 msnm.

Figura 16. Ubicación de la posta municipal de la Alcaldía de la provincia Cercado para la obtención del cemento asfáltico.



Fuente: Elaboración propia.

3.4. SELECCIÓN DE LOS AGREGADOS A UTILIZAR

Una vez identificadas las zonas de extracción de los agregados se procedió a la recolección de muestras de agregados pétreos chancados (grueso, intermedio y fino) con un peso aproximadamente 1 Kg de cada graduación. Las mismas muestras fueron llevadas a la Ciudad de Potosí para la realización de un análisis químico que pueda permitir clasificar a los agregados en alcalinos y ácidos, El laboratorio particular perteneciente al Dr. Raúl Castro realiza dos tipos de procedimientos para identificar las muestras.

- Método Gravimétrico de sílice e insolubles que determina el contenido de Sílice existente en los suelos, rocas u otras muestras.

≥ 66 % de contenido de Sílice = Acido

< 55 % de contenido de Sílice = Alcalino

- Método PH-Metro el cual determina el PH con Cloruro de Calcio 0,01 Molar (CaCl 0,01 M) y en Cloruro de Potasio 1 Molar (KCl 0,1 M) de los suelos, rocas u otras muestras.

$\text{PH} > 7$ es considerado Alcalino.

$\text{PH} = 7$ es considerado neutro.

$\text{PH} < 7$ es considerado Acido.

Se escogió el método del PH-Metro debido al tiempo de realización que iba a demorar todas las muestras llevadas.

3.3.1. Procedimiento PH-Metro UNE 77305

El material y/o suelo a determinar se debe encontrar seco a una temperatura $T < 40^\circ\text{C}$ y con tamaño de partícula $< 2 \text{ mm}$.

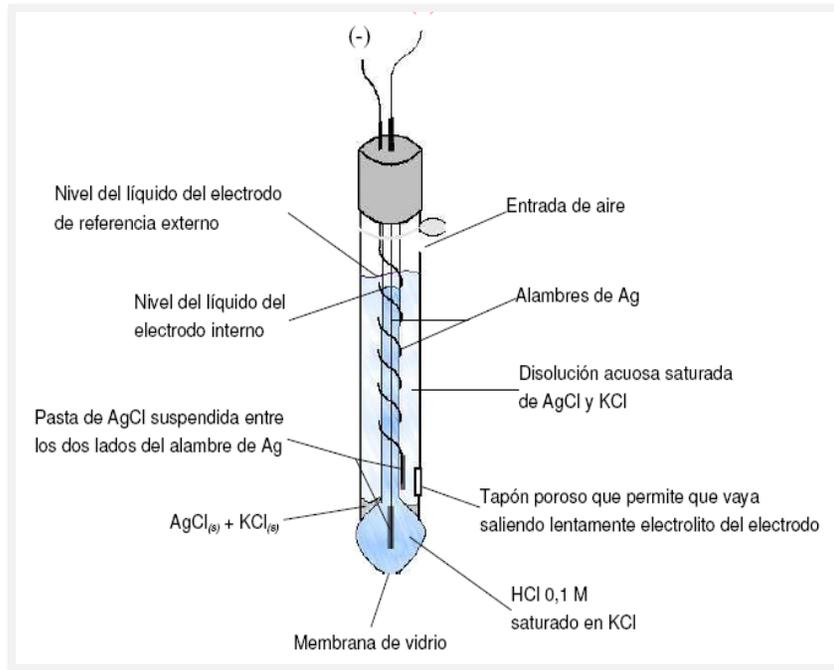
Figura 17. Molienda de las muestras de Grava 3/8", 3/4" y arena en la empresa minera GCAL "Ch'asquita" SRL.



Fuente: Elaboración propia.

Se debe colocar la muestra en una disolución de relación suelo: agua 1:5 en volumen (5mL de suelo en 25 mL de agua, o disolución 0,01M en CaCl_2 , o disolución 0,1M en KCl).

Figura 18. Electrodo de membrana de vidrio medidor de PH en suelos.



Fuente: Norma UNE 77305.

La medida se efectúa mediante un electrodo de membrana de vidrio combinado como el de la figura y un electrodo compensador de temperatura, introducidos en la disolución y conectados a un pHmetro que nos indicará el valor del pH de la disolución. La medida se toma en unidades y décimas.

La temperatura del líquido no ha de variar más de 1°C de la temperatura de las disoluciones de calibrado usadas.

Figura 19. Muestras pulverizadas para la determinación de PH.



Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se detallan las muestras seleccionadas y el valor de PH obtenidos.

Tabla 14. Resultados de PH-Metro en solución de Cloruro de Calcio 0,01 Molar aplicado en agregados gruesos.

Material		Valor de PH obtenido en CACL 0,01 M
Lugar de recolección	Procedencia	Agregado grueso tamaño máx. 3/4"
San José de Charaja (Chancadora de SEDECA Tarija)	Río Camacho	7,70
Rancho Sud (Empresa chancadora ERIKA S.R.L.)	Río Guadalquivir	7,59
Tolomosa (Empresa chancadora PIARBOL S.R.L.)	Río Tolomosa	7,72
Cercado zona San Blass (Seleccionadora La Salle)	Río Guadalquivir	7,57
Santa Ana la nueva (Empresa chancadora JOSBRA S.R.L.)	Río Santa Ana	8,30
La Pintada (Chancadora de la Alcaldía municipal de Cercado)	Río Santa Ana	7,96
San Simón- Entre Ríos (Empresa chancadora EUROFINSA)	Peña de San Simón	8,45
Ciudad de Potosí (Empresa minera "CH'ASQUITA" S.R.L.)	Cerro Rico de Potosí	6,38

Fuente: Resultados del laboratorio químico Castro- Ciudad de Potosí – ANEXO A.

Tabla 15. Resultados de PH-Metro en solución de Cloruro de Calcio 0,01 Molar aplicado en agregados finos.

Material		Valor de PH obtenido en CaCl 0,01 M.
Lugar de recolección	Procedencia	Agregado fino pasante tamiz N°4
San José de Charaja (Chancadora de SEDECA Tarija)	Río Camacho	7,48
Rancho Sud (Empresa chancadora ERIKA S.R.L.)	Río Guadalquivir	7,28
Tolomosa (Empresa chancadora PIARBOL S.R.L.)	Río Tolomosa	7,65
Cercado zona San Blass (Seleccionadora La Salle)	Río Guadalquivir	7,74
Santa Ana la nueva (Empresa chancadora JOSBRA S.R.L.)	Río Santa Ana	7,51
La Pintada (Chancadora de la Alcaldía municipal de Cercado)	Río Santa Ana	7,73
San Simón- Entre Ríos (Empresa chancadora EUROFINSA)	Peña de San Simón	8,57
San Simón- Entre Ríos (Empresa chancadora EUROFINSA)	Peña de San Simón – Arena Calero	8,06
Ciudad de Potosí (Empresa minera "CH'ASQUITA" S.R.L.)	Cerro Rico de Potosí	6,38

Fuente: Resultados del laboratorio químico Castro- Ciudad de Potosí – ANEXO A.

Tabla 16. Resultados de PH-Metro en solución de Cloruro de Potasio 0,1 Molar aplicado en agregados gruesos.

Material		Valor de PH obtenido en KCl 0,1 M.
Lugar de recolección	Procedencia	Agregado grueso tamaño máx. 3/4"
Cercado zona San Blass (Seleccionadora La Salle)	Río Guadalquivir	7,03
Santa Ana la nueva (Empresa chancadora JOSBRA S.R.L.)	Río Santa Ana	7,85
La Pintada (Chancadora de la Alcaldía municipal de Cercado)	Río Santa Ana	8,28
San Simón- Entre Ríos (Empresa chancadora EUROFINSA)	Peña de San Simón	7,78

Fuente: Resultados del laboratorio químico Castro- Ciudad de Potosí – ANEXO A.

Al encontrarse que todos los agregados gruesos y finos de la ciudad de Tarija son del tipo alcalino debido a que en su totalidad son de ríos, se tomó una muestra de un banco proveniente de roca de montaña ubicada en la localidad de San Simón, Provincia O'Connor del municipio de Entre Ríos y uno de la Ciudad de Potosí.

Comparación de los métodos aplicados para la determinación de PH en algunos agregados:

Tabla 17. Tabla comparativa de los resultados de PH-Metro en solución de Cloruro de Potasio 0,1 Molar en solución de Cloruro de Sodio 0,01 Molar aplicado en agregados gruesos.

Material		Valor de PH obtenido en KCl 0,1 M.	Valor de PH obtenido en CaCl 0,01 M.
Lugar de recolección	Procedencia	Agregado grueso tamaño máx. 3/4"	Agregado grueso tamaño máx. 3/4"
Cercado zona San Blass (Seleccionadora La Salle)	Río Guadalquivir	7,03	7,57
Santa Ana la nueva (Empresa chancadora JOSBRA S.R.L.)	Río Santa Ana	7,85	8,30
La Pintada (Chancadora de la Alcaldía municipal de Cercado)	Río Santa Ana	8,28	7,96
San Simón- Entre Ríos (Empresa chancadora EUROFINSA)	Peña de San Simón	7,78	8,45

Fuente: Resultados del laboratorio químico Castro- Ciudad de Potosí – ANEXO A.

Una vez establecidos los valores de PH de las canteras de extracción más conocidas del valle de Tarija, de la ciudad de Entre ríos y de la Ciudad de Potosí se procedió a seleccionar según la escala de PH la clasificación de los agregados según su composición alcalina y acida.

PH > 7 es considerado Alcalino.

PH = 7 es considerado neutro.

PH < 7 es considerado Acido.

Valoración según los resultados de PH obtenidos en agregados gruesos en Solución de Cloruro de Calcio 0,01 Molar (CaCl 0,01 M).⁶

Tabla 18. Valoración de alcalinidad y acidez según los resultados de PH en solución de Cloruro de Calcio 0,01 Molar de Agregados Gruesos.

Material		Valor de PH obtenido en CaCl 0,01 M.	Clasificación según la escala de PH
Lugar de recolección	Procedencia	Agregado grueso tamaño máx. 3/4"	
San José de Charaja (Chancadora de SEDECA Tarija)	Río Camacho	7,70	Alcalino
Rancho Sud (Empresa chancadora ERIKA S.R.L.)	Río Guadalquivir	7,59	Alcalino
Tolomosa (Empresa chancadora PIARBOL S.R.L.)	Río Tolomosa	7,72	Alcalino
Cercado zona San Blass (Seleccionadora La Salle)	Río Guadalquivir	7,57	Alcalino
Santa Ana la nueva (Empresa chancadora JOSBRA S.R.L.)	Río Santa Ana	8,30	Alcalino
La Pintada (Chancadora de la Alcaldía municipal de Cercado)	Río Santa Ana	7,96	Alcalino
San Simón- Entre Ríos (Empresa chancadora EUROFINSA)	Peña de San Simón	8,45	Alcalino
Ciudad de Potosí (Empresa minera "CH'ASQUITA" S.R.L.)	Cerro Rico de Potosí	6,38	Ácido

Fuente: Resultados del laboratorio químico Castro- Ciudad de Potosí – ANEXO A/ escala del PH.

Valoración según los resultados de PH obtenidos en agregados finos en Solución de Cloruro de Calcio 0,01 Molar (CaCl 0,01 M).

⁶ Para ver los resultados del análisis de PH de los agregados grueso y fino, realizados en el laboratorio químico Castro ir a ANEXO A.

Tabla 19. Valoración de alcalinidad y acidez según los resultados de PH en solución de Cloruro de Calcio 0,01 Molar de Agregados Finos.

Material		Valor de PH obtenido en CaCl 0,01 M.	Clasificación según la escala de PH
Lugar de recolección	Procedencia	Agregado fino pasante tamiz N°4	
San José de Charaja (Chancadora de SEDECA Tarija)	Río Camacho	7,48	Alcalino
Rancho Sud (Empresa chancadora ERIKA S.R.L.)	Río Guadalquivir	7,28	Alcalino
Tolomosa (Empresa chancadora PIARBOL S.R.L.)	Río Tolomosa	7,65	Alcalino
Cercado zona San Blass (Seleccionadora La Salle)	Río Guadalquivir	7,74	Alcalino
Santa Ana la nueva (Empresa chancadora JOSBRA S.R.L.)	Río Santa Ana	7,51	Alcalino
La Pintada (Chancadora de la Alcaldía municipal de Cercado)	Río Santa Ana	7,73	Alcalino
San Simón- Entre Ríos (Empresa chancadora EUROFINSA)	Peña de San Simón	8,57	Alcalino
San Simón- Entre Ríos (Empresa chancadora EUROFINSA)	Peña de San Simón – Arena Calero	8,06	Alcalino
Ciudad de Potosí (Empresa minera "CH'ASQUITA" S.R.L.)	Cerro Rico de Potosí	6,38	Ácido

Fuente: Resultados del laboratorio químico Castro- Ciudad de Potosí – escala del PH.

Una vez analizados los agregados en PH y clasificados de acuerdo a la escala del mismo se escogieron los agregados de:

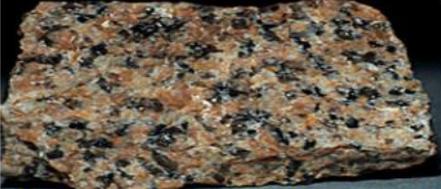
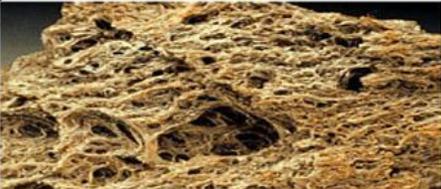
- San José de Charaja del río Camacho (En función a los resultados de PH realizados se definen como agregados alcalinos estos pueden ser de origen: Calizas, Carbonatos de Calcio, Mármoles, Feldespato u otros de composición mineralógica, dependiendo de los accidentes en el momento de la intrusión o extrusión del tamaño del cuerpo ígneo y de su historia de enfriamiento podremos determinar el tipo de roca al que corresponda.) debido a que presenta uno de los valores de PH altos en alcalinidad, es de fácil acceso para su transporte y lo más importante es uno de los agregados más utilizados en construcciones civiles en el área de vías de comunicación, debido a las buenas propiedades que presenta.
- Ciudad de Potosí - Cerro Rico (Se definen como agregados ácidos estos pueden ser origen Granitos, Cuarzo, Cuarzitas) debido a que es el único agregado que fue reconocido como ácido en el análisis de PH, no es de fácil acceso debido a que las empresas mineras de la ciudad de Potosí comercializan por toneladas estos minerales, pero a la gracia a la empresa minera “Ch'asquita S.R.L” fue posible la venta de estos minerales por menor, estos agregados no son evaluados con ensayos de caracterización porque generalmente no son usados frecuentemente en obras civiles pero si en materiales de construcción como acero, cerámica u otro en el país de Chile. Como autora de la investigación será un reto el aplicarlos en el diseño de mezclas asfálticas porque es una incertidumbre conocer, si las propiedades de resistencia que presenten estas mezclas con estos agregados, serán buenas o malas.

3.4. CARACTERIZACIÓN MACROSCÓPICA DE LOS AGREGADOS ALCALINOS Y ÁCIDOS

3.4.1. Grado de cristalinidad – Textura⁷

Cuando comienza el enfriamiento del magma, algunos de sus átomos se unen formando pequeños núcleos minerales cristalinos. A medida que avanza el enfriamiento otros átomos se unen a estos granos minerales, ordenándose según una estructura cristalina interna.

Tabla 20. Textura de rocas ígneas plutónicas y volcánicas efusivas.

 <p>TEXTURA FANERITICA HOLOCRISTALINA</p>	<p>De grano grueso solo cristales formadas en un tiempo lento de cristalización y cristales grandes. La roca puede tener cualquier composición se da en rocas plutónicas las cuales se forman a gran profundidad y después quedan expuestas por denudación</p>
 <p>TEXTURA AFANITICA HIPOCRISTALINA</p>	<p>Son de grano fino vidrio y cristales pequeños. La roca puede tener cualquier composición se da en rocas efusivas (lava vertida por los volcanes que se enfría y consolida)</p>
 <p>TEXTURA VITRIA HOLOHIALINA</p>	<p>Sin cristales (Solo vidrio) se forman en un tiempo extremadamente rápido de enfriamiento. La roca puede tener cualquier composición, se da también en rocas efusivas.</p>
 <p>TEXTURA VESICULAR</p>	<p>Son de textura porosa, propia de algunas rocas piroclásticas. Los poros se forman por escape rápido de grandes cantidades de gas en el momento que se enfrían</p>

Fuente: Minerales y rocas –“Las Rocas” Juan Montero Olarte 1999.

⁷ Textura de rocas ígneas plutónicas y volcánicas efusivas. - Minerales y rocas –“Las Rocas” Juan Montero Olarte 1999.

Figura 20. Agregado alcalino procedente del banco de áridos San José de Charaja.



Fuente: Elaboración propia.

Se escogió este tipo de agregado, mediante el análisis de PH al agregado alcalino de San José de Charaja, agregado muy utilizado en proyecto de carreteras por el Servicio Departamental de Caminos, este agregado alcalino es de origen metamórfico con textura afanítica hipocristalina con masa de minerales muy pequeños no reconocibles a simple vista. no ferromagnesianos de colores claros, son más livianos (Densidad $< 3 \text{ gr/cm}^3$). Esta textura se produce cuando el enfriamiento es muy rápido y no hay tiempo de que crezcan los cristales.

Figura 21. Agregado ácido procedente del Cerro Rico de la ciudad de Potosí.



Fuente: Elaboración propia.

Agregado ácido de origen ígneo con textura fanerítica holocristalina, es decir poseen cristales bien desarrollados con más del 90% en volumen, poseen cristales minerales bien desarrollados, reconocibles a simple vista. Generalmente son ferromagnesianos de colores oscuros con densidades mayores a 3 gr/cm^3

3.5. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS ALCALINOS Y ÁCIDOS⁸

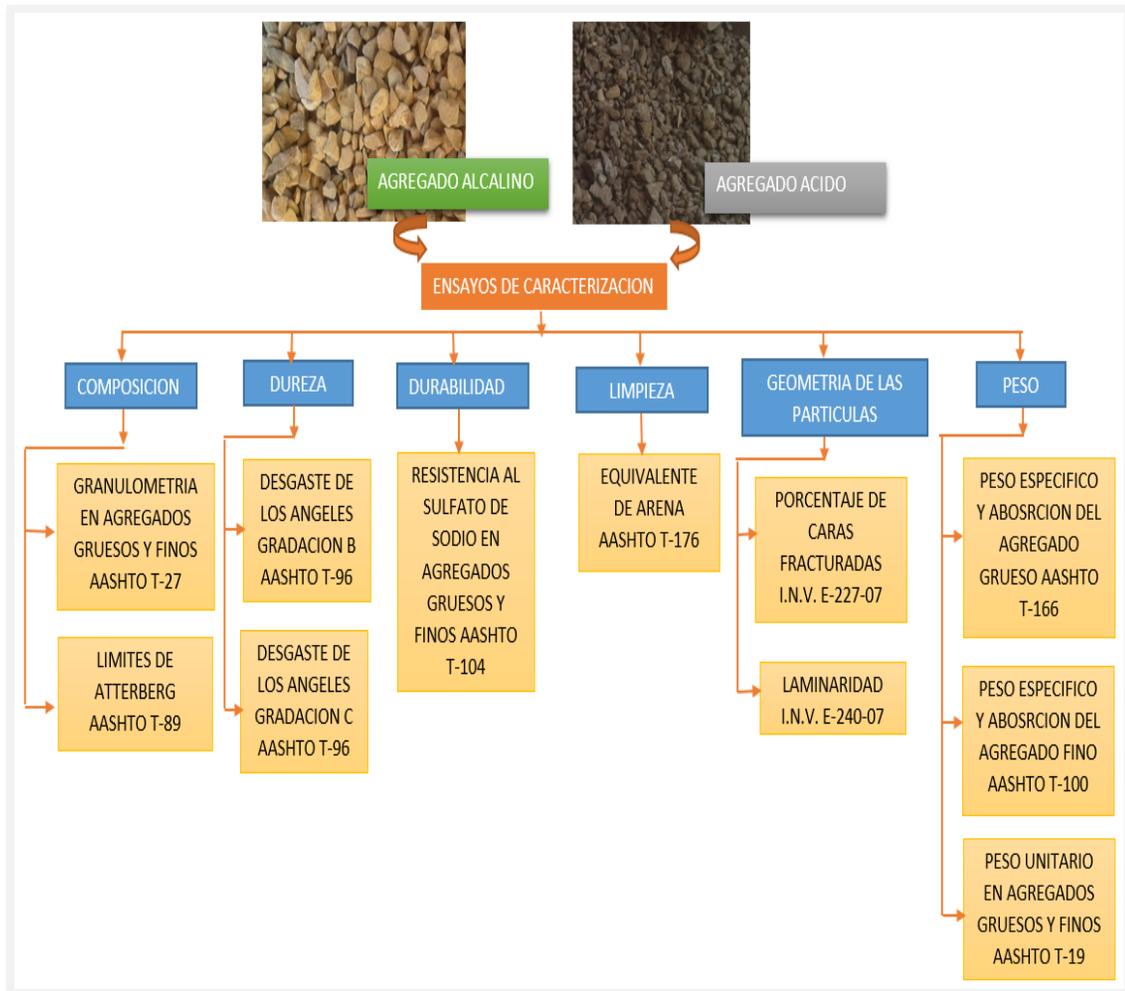
3.5.1. Metodología para la realización de los ensayos de caracterización de los agregados

Una vez identificados los agregados para evaluar las propiedades que estas brinden a las mezclas asfálticas, es necesario realizar ensayos de caracterización para evaluar y

⁸ Para ver el procedimiento de los ensayos de caracterización de los agregados ir a ANEXO B

analizar las características físicas y/o mecánicas que estas poseen, a continuación, se detallan los resultados obtenidos.

Figura 22. Metodología para la realización de los ensayos de caracterización en agregados pétreos.



Fuente: Elaboración propia.

3.5.2. Resumen de los ensayos de caracterización a los agregados alcalinos

Tabla 21. Resumen de los ensayos de caracterización a los agregados alcalinos – Charaja.

Resumen de los ensayos de caracterización de los agregados alcalinos - San José de Charaja			
Ensayo	Norma de ensayo	Valor medido en laboratorio	Exigencia de la norma
Composición			
Granulometría	AASHTO T-27	-	-
Límites de Atterberg (Limite liquido)	AASHTO T-89	15,6	-
Dureza			
Desgaste de los ángeles (Gradación B)	AASHTO T-96	25,87%	Máx. 40%
Desgaste de los ángeles (Gradación C)	AASHTO T-96	27,93%	Máx. 40%
Durabilidad			
Pérdida en el ensayo de solidez en Sulfato de sodio agregado fino	AASHTO T-104	1,65%	Máx. 12%
Pérdida en el ensayo de solidez en Sulfato de sodio agregado grueso	AASHTO T-104	1,43%	Máx. 12%
Limpieza			
Equivalente de arena	AASHTO T-176	48%	Mín. 45%
Geometría de las partículas			
Porcentaje de caras fracturadas	I.N.V. E-227-07	97%	Mín. 75%
Laminaridad (partículas planas y alargadas)	I.N.V. E-240-07	7,2%	Máx. 10%
Peso			
Peso específico y absorción del agregado fino	AASHTO T-100	2,694 gr/cm ³	-
Peso específico y absorción del agregado grueso	AASHTO T-166	2,655 gr/cm ³	-
Peso unitario del agregado fino	AASHTO T-19	1,559 gr/cm ³	-
Peso unitario del agregado grueso	AASHTO T-19	1,367 gr/cm ³	-

Fuente: Elaboración propia.

3.5.3. Resumen de los ensayos de caracterización a los agregados ácidos

Tabla 22. Resumen de los ensayos de caracterización a los agregados ácidos – Cerro Rico de Potosí.

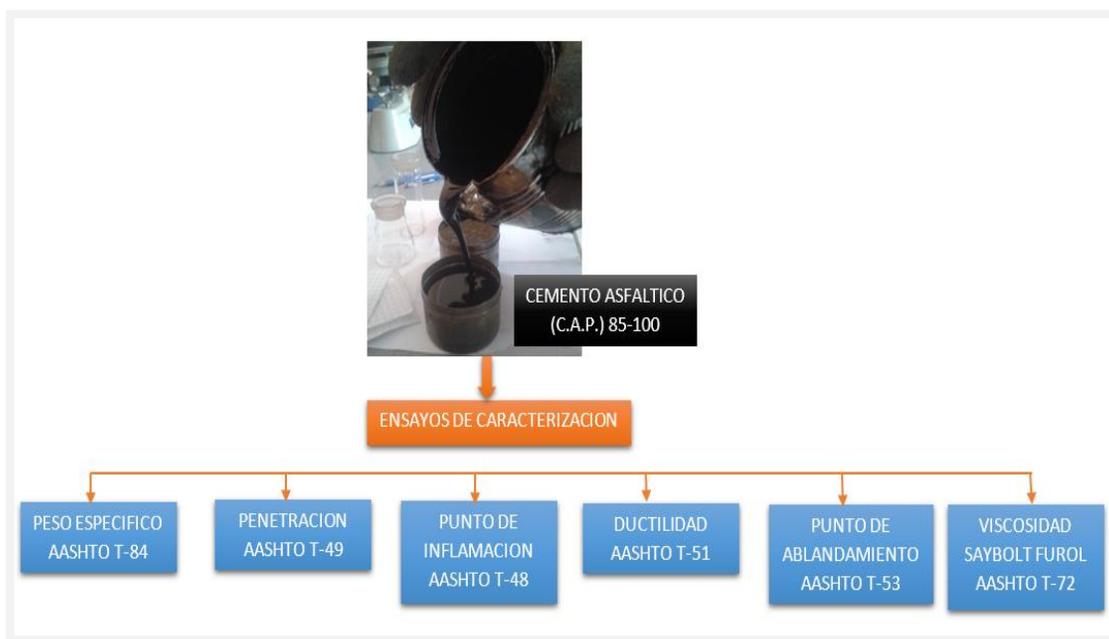
Resumen de los ensayos de caracterización de los agregados ácidos – Cerro Rico de Potosí			
Ensayo	Norma de ensayo	Valor medido en laboratorio	Exigencia de la norma
Composición			
Granulometría	AASHTO T-27	-	-
Límites de Atterberg (Limite liquido)	AASHTO T-89	10,3	-
Dureza			
Desgaste de los ángeles (Gradación B)	AASHTO T-96	37,58%	Máx. 40%
Desgaste de los ángeles (Gradación C)	AASHTO T-96	40,25%	Máx. 40%
Durabilidad			
Pérdida en el ensayo de solidez en Sulfato de sodio agregado fino	AASHTO T-104	1,92%	Máx. 12%
Pérdida en el ensayo de solidez en Sulfato de sodio agregado grueso	AASHTO T-104	4,23%	Máx. 12%
Limpieza			
Equivalente de arena	AASHTO T-176	74%	Mín. 45%
Geometría de las partículas			
Porcentaje de caras fracturadas	I.N.V. E-227-07	99%	Mín. 75%
Laminaridad (partículas planas y alargadas)	I.N.V. E-240-07	0,4%	Máx. 10%
Peso			
Peso específico y absorción del agregado fino	AASHTO T-100	4,158 gr/cm ³	-
Peso específico y absorción del agregado grueso	AASHTO T-166	4,099 gr/cm ³	-
Peso unitario del agregado fino	AASHTO T-19	2,219 gr/cm ³	-
Peso unitario del agregado grueso	AASHTO T-19	1,973 gr/cm ³	-

Fuente: Elaboración propia.

3.6. CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO ASFALTICO PROBISA C.A.P. 85-100⁹

3.6.1. Metodología para la realización de los ensayos de caracterización al cemento asfáltico

Figura 23. Metodología para la realización de los ensayos de caracterización al cemento asfáltico.



Fuente: Elaboración propia.

El ensayo de viscosidad Saybolt Furol AASHTO T-72 no se pudo realizar debido a que muchos de los laboratorios disponibles de la Ciudad de Tarija no cuentan con este equipo disponible, el laboratorio de la universidad Juan Misael Saracho cuenta con este equipo, pero solo para diluidos a temperaturas menores a 100°C, el laboratorio de suelos y asfalto del Servicio Departamental de Caminos (SEDECA) cuenta con el equipo para la realización de este ensayo pero se me informó que los equipos están en

⁹ Para ver el procedimiento de los ensayos de caracterización ir a ANEXO C.

mantenimiento desde inicio de este año y es por ello que no se están prestando los servicios de laboratorio.

3.6.2. Resumen de los ensayos de caracterización del cemento asfáltico PROBISA (C.A.P) 85-100

Tabla 23. Resumen de los ensayos de caracterización del cemento asfáltico PROBISA 85-100.

Resumen de los ensayos de caracterización del cemento asfáltico PROBISA C.A.P 85-100				
Ensayo	Norma de ensayo	Valor medido en laboratorio	Exigencia de la norma	
			Mín.	Máx.
Peso específico	AASHTO T-84	1,001 gr/cm ³	1,00 gr/cm ³	1,05 gr/cm ³
Penetración	AASHTO T-49	89 mm	85 mm	100 mm
Punto de inflamación	AASHTO T-48	269 °C	232 °C	-
Ductilidad	AASHTO T-51	107 cm	100 cm	-
Punto de ablandamiento	AASHTO T-53	45 °C	43 °C	53 °C
Viscosidad Saybolt Furol a 135 °C	AASHTO T-72	-	100	-

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO IV

TRABAJOS DE DISEÑO, COMPARACIÓN, TRATAMIENTO ESTADÍSTICO Y PRESUPUESTO ECONÓMICO

La metodología Marshall utiliza una gráfica semilogarítmica para definir la granulometría permitida, la selección de una curva granulométrica para el diseño de una mezcla asfáltica cerrada o densa, está en función de dos parámetros: el tamaño máximo nominal del agregado y el de las líneas de control (superior e inferior), Las líneas de control son puntos de paso obligado para la curva granulométrica. La Tabla N°24 presenta los tamaños máximos nominales más utilizados, así como sus líneas de control de acuerdo con las especificaciones técnicas generales de la metodología AASHTO FP-85.

Tabla 24. Curva granulométrica de los agregados para el diseño Marshall.

Designación de tamices	Gradación de los agregados			
	A	B	C	D
2"	100	---	---	---
1 1/2"	97 - 100	100	---	---
1"	---	97 - 100	100	---
3/4"	66 - 80 (5)	---	97 - 100	100
1/2"	---	---	76 - 88 (5)	97 - 100
3/8"	48 - 60 (6)	53 - 70 (6)	---	---
N°4	33 - 45 (5)	40 - 52 (6)	49 - 59 (7)	57 - 69 (6)
N°8	25 - 33 (4)	25 - 39 (4)	36 - 45 (5)	41 - 49 (6)
N°40	9 - 17 (3)	10 - 19 (3)	14 - 22 (3)	14 - 22 (3)
N°200	3 - 8 (2)	3 - 8 (2)	3 - 7 (2)	3 - 8 (2)
Bitúmen soluble en CS2 (+) %	4.0 - 7.0	4.5 - 7.5	4.5 - 9.0	4.5 - 9.0

Fuente: Norma AASHTO FP-85.

Las tolerancias admitidas (\pm) de la tabla están entre paréntesis.

La curva granulométrica, indicada como curva de trabajo, podrá presentar las siguientes tolerancias máximas:

Tabla 25. Tolerancias máximas de la curva granulométrica de los agregados para el diseño Marshall.

Tamiz	% Que pasa en peso
3/8" - 1 1/2"	± 7
N°40 - N°4	± 5
N°80	± 3
N°200	± 2

Fuente: Norma AASHTO FP-85.

4.1. DISEÑO MARSHALL CON AGREGADOS ALCALINOS

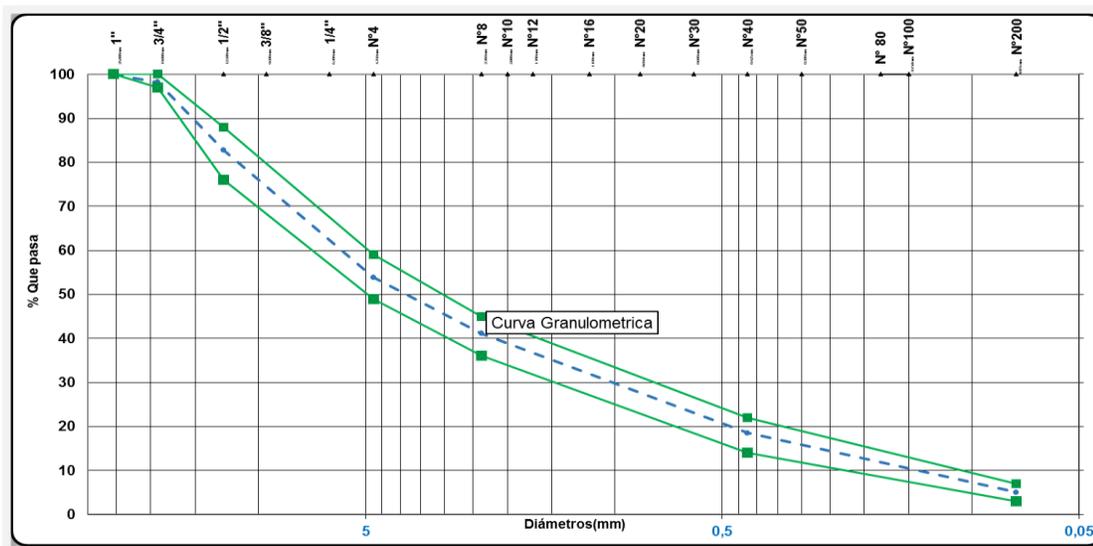
Utilizando las especificaciones para la granulometría mencionadas anteriormente se toma como gradación en función al tamaño máximo del agregado (3/4") la curva granulométrica C.

Tabla 26. Granulometría de los agregados alcalinos para el diseño Marshall.

Granulometrías agregados alcalinos - Charaja										
Agregado		Grava 3/4" - Triturada		Gravilla 3/8" - Triturada		Arena - Triturada		% Que pasa	Faja C	
% Usado		20%		30%		50%			Curva de trabajo	
Tamices		% Total	% Enc.	% Total	% Enc.	% Total	% Enc.		Inf.	Sup.
Plg	mm.									
1"	25,40	100,0	20,0	100,0	30,0	100,0	50,0	100,0	100	100
3/4"	19,10	91,0	18,2	100,0	30,0	100,0	50,0	98,2	97	100
1/2"	12,50	14,1	2,8	100,0	30,0	100,0	50,0	82,8	76	88
3/8"	9,50	1,5	0,3	98,0	29,4	100,0	50,0	79,7	-	-
N°4	4,75	0,2	0,0	15,6	4,7	98,3	49,2	53,9	49	59
N°10	2,360	0,2	0,0	3,7	1,1	79,8	39,9	41,1	36	45
N°16	1,180	0,2	0,0	2,9	0,9	61,2	30,6	31,5	-	-
N°40	0,425	0,1	0,0	2,8	0,8	35,3	17,7	18,5	14	22
N°80	0,180	0,2	0,0	2,3	0,7	23,2	11,6	12,3	-	-
N°200	0,075	0,1	0,0	1,8	0,5	8,9	4,5	5,0	3	7

Fuente: Elaboración propia.

Figura 24. Curva granulométrica de los agregados alcalinos en función a la gradación para el diseño Marshall.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 27. Dosificación tentativa de la mezcla asfáltica con agregados alcalinos.

Dosificación tentativa Marshall agregados alcalinos - Charaja															
TAMIZ	% Pasa	% Retenido	% Ret. Tamiz	4,5%		5,0%		5,5%		6,0%		6,5%		7,0%	
				P. Parcial (gr)	P. Acum. (gr)										
				0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1"	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3/4"	98,2	1,8	1,8	20,6	20,6	20,5	20,5	20,4	20,4	20,3	20,3	20,2	20,2	20,1	20,1
1/2"	82,8	17,2	15,4	176,4	197,0	175,4	195,9	174,5	194,9	173,6	193,9	172,7	192,8	171,7	191,8
3/8"	79,7	20,3	3,1	35,8	232,7	35,6	231,5	35,4	230,3	35,2	229,1	35,0	227,9	34,8	226,6
N°4	53,9	46,1	25,8	295,7	528,4	294,1	525,7	292,6	522,9	291,1	520,1	289,5	517,4	288,0	514,6
N°10	41,1	58,9	12,8	147,1	675,5	146,3	672,0	145,5	668,4	144,8	664,9	144,0	661,4	143,2	657,8
N°16	31,5	68,5	9,5	109,3	784,8	108,7	780,7	108,1	776,6	107,6	772,5	107,0	768,4	106,4	764,3
N°40	18,5	81,5	13,0	149,1	933,9	148,3	929,0	147,5	924,1	146,7	919,2	146,0	914,3	145,2	909,4
N°80	12,3	87,7	6,2	70,8	1004,7	70,4	999,4	70,1	994,2	69,7	988,9	69,3	983,6	68,9	978,4
N°200	5,0	95,0	7,3	83,7	1088,4	83,3	1082,7	82,8	1077,0	82,4	1071,3	82,0	1065,6	81,5	1059,9
Filler	0,0	100,0	5,0	57,6	1146,0	57,3	1140,0	57,0	1134,0	56,7	1128,0	56,4	1122,0	56,1	1116,0
Peso Total (gr)=				1146,0		1140,0		1134,0		1128,0		1122,0		1116,0	

Peso Muestra (gr)=	1146,0	1140,0	1134,0	1128,0	1122,0	1116,0
Peso Asfalto (gr)=	54,0	60,0	66,0	72,0	78,0	84,0
Peso Total Material + C. Asf. (gr)=	1200,0	1200,0	1200,0	1200,0	1200,0	1200,0

Fuente: Elaboración propia.

Una vez realizada la dosificación tentativa de acuerdo a la granulometría de los agregados se procede a elaborar las briquetas de acuerdo a cada porcentaje de cemento asfáltico.

Se realizaron 3 briquetas de cada contenido de asfalto, se detallará brevemente el procedimiento.

- Se debe calentar los agregados de acuerdo al tamaño especificado en la dosificación tentativa, para evitar la pérdida de peso por humedad al momento de elaborar la mezcla, una vez calentados, pesar de acuerdo al contenido de asfalto correspondiente, cada plato de material debe ser colocado al horno para que tenga la misma temperatura de la mezcla a realizar.

Figura 25. Pesado de los agregados pétreos alcalinos para el diseño de la mezcla asfáltica.



Fuente: Elaboración propia.

- Una vez pesados los materiales se deberá calentar el cemento asfáltico, el martillo y los moldes a utilizar, se agregará cemento asfáltico de acuerdo a los porcentajes calculados hasta alcanzar los pesos totales (agregados pétreos más cemento asfáltico).

Figura 26. Adición de cemento asfáltico 85-100 para el diseño de la mezcla asfáltica.



Fuente: Elaboración propia.

- Mezclar los agregados con cemento asfáltico de manera homogénea, se debe verificar la temperatura de la mezcla antes de compactar la misma, la temperatura no deberá ser menor a 130°C. se debe colocar la mezcla en los moldes especificados según la metodología Marshall, con filtros de papel para evitar la adhesión de la mezcla con el martillo, compactar a 75 golpes por lado.

Figura 27. Compactación de la mezcla asfáltica según metodología Marshall.



Fuente: Elaboración propia.

- Una vez compactadas, y puestas temperatura ambiente, las briquetas de cada porcentaje de asfalto, deberán ser desmoldadas con ayuda de una prensa.

Figura 28. Desmoldado de las briquetas.



Fuente: Elaboración propia.

4.1.1. Determinación del peso específico Bulk

Una vez desmoldadas las briquetas, se debe medir la altura de las mismas a cada extremo y en diferentes puntos para determinar la altura promedio de la briketa. Para el cálculo de la densidad se deberá pesar el peso seco de la briketa, el peso saturado superficialmente seco (en saturación de agua a 25°C durante 10 minutos), y el peso sumergido de la briketa (nuevamente saturadas en agua a la temperatura especificada).

La densidad de la briketa se determina con la siguiente fórmula.

$$Densidad = \frac{A}{(B - C)}$$

Donde:

A= Peso seco de la briketa.

B= Peso saturado superficialmente seco de la briketa.

C= Peso sumergido de la briketa.

Figura 29. Determinación del peso seco de la briqueta.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 30. Determinación del peso saturado superficialmente seco de la briqueta.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 31. Determinación del peso sumergido de la briqueta.



Fuente: Elaboración propia.

4.1.2. Determinación del flujo y estabilidad

Pesadas las briquetas para determinar su densidad, éstas deberán ser colocadas en saturación de agua a 65°C durante 30 minutos antes de ser llevadas a la prensa Marshall. Una vez transcurrido el tiempo se deberá determinar la estabilidad y flujo de cada briqueta.

Figura 32. Determinación de la estabilidad y flujo de las briquetas en la prensa Marshall.



Fuente: Elaboración propia.

4.1.3. Análisis de densidad y vacíos

Una vez determinada la estabilidad y flujo se deberá realizar un análisis de las características de cada porcentaje de asfalto, se calcula el peso específico bulk de la briqueta, el peso máximo teórico de la mezcla, de ahí se deduce: el porcentaje de vacíos de la mezcla, porcentaje de vacíos en el agregado mineral y el porcentaje de vacíos llenos de asfalto.

4.1.4. Diseño de la mezcla asfáltica método Marshall

Tabla 28. Diseño de la mezcla asfáltica con agregados alcalinos método Marshall.

Pesos Específicos (AASHTO T-100, T-85)			% de Agregados		C. Asfáltico AASHTO M-20				DOSIFICACION				GRAVA	GRAVILLA	ARENA CHANCADA								
Mat. Retenido Tamiz N° 4	2,655	gr/cm ³	46,1	Tipo de asfalto AASHTO M 20	85-100	ORIGEN AGREGADOS :				3/4"	3/8"	N° 4											
Mat. Pasa Tamiz N° 4	2,694	gr/cm ³	53,9	P. Especifico Total AASHTO T-22	1,001	% DE AGREGADOS :				20%	30%	50%											
P. Esp. Agregado Total (Gag)	2,676	gr/cm ³	100	PROBISA C.A.P.85-100		ORIGEN AGREGADOS :				Agregados alcalinos San Jose de Charaja													
N° GOLPES:			75	130 °C Compactación																			
IDENTIFICACION	ALTURA BRIQUETA (CM)	% DE ASFALTO		PESO BRIQUETA EN EL AIRE (gr)	PESO BRIQUETA EN EL AIRE S.S.S. (gr)	PESO BRIQUETA SUMERGIDA EN AGUA (gr)	VOLUMEN BRIQUETA (cm ³)	DENSIDAD BRIQUETA			% Vacíos			ESTABILIDAD (Lb)						LECT. DIAL	FLUJO 1/100"	MEDIA	
		BASE AGREGADO	BASE MEZCLA					REAL (D _r)	PROMEDIO (D _m)	MAXIMA TEORICA	MEZCLA (V _v)	AGREGADOS (VAM)	LLENOS DE ASFALTO (RBV)	LECT. DIAL	REAL	MEDIA	FACTOR DE CORRECCION (ALTURA)		MEDIA f.c.				CORREGIDA
																	mm						
																	a	b					
(a * 100) / 100 - a		D			r - d	c / e		1	2	3	4												
1	6,37	4,71	4,50	1193,5	1194,8	681,0	513,8	2,323					88	2170,9		0,995			68	6,8			
2	6,29	4,71	4,50	1190,0	1192,0	682,2	509,8	2,334					87	2146,2		1,016			70	7,0			
3	6,34	4,71	4,50	1184,9	1185,7	677,6	508,1	2,332	2,330	2,489	6,38	16,85	62,14	83	2047,6	2121,6	1,003	1,005	2132,2	75	7,5	7,10	
4	6,35	5,26	5,00	1197,1	1198,0	689,8	508,2	2,356						105	2590,3		1,000			85	8,5		
5	6,35	5,26	5,00	1195,3	1195,9	688,0	507,9	2,353						98	2417,6		1,000			90	9,0		
6	6,34	5,26	5,00	1196,7	1195,8	685,6	510,2	2,346	2,352	2,469	4,77	16,52	71,12	100	2466,9	2491,6	1,003	1,001	2494,1	89	8,9	8,80	
7	6,27	5,82	5,50	1191,8	1192,4	690,0	502,4	2,372						100	2466,9		1,021			100	10,0		
8	6,31	5,82	5,50	1195,8	1196,5	689,8	506,7	2,360						105	2590,3		1,011			95	9,5		
9	6,38	5,82	5,50	1197,9	1198,4	691,0	507,4	2,361	2,364	2,450	3,51	16,50	78,72	107	2639,6	2565,6	0,993	1,008	2586,2	103	10,3	9,93	
10	6,27	6,38	6,00	1193,3	1194,2	693,8	500,4	2,385						93	2294,3		1,021			120	12,0		
11	6,30	6,38	6,00	1203,1	1204,3	700,4	503,9	2,388						103	2541,0		1,013			115	11,5		
12	6,29	6,38	6,00	1199,7	1200,2	695,0	505,2	2,375	2,382	2,432	2,03	16,31	87,54	96	2368,3	2401,2	1,016	1,017	2442,0	125	12,5	12,00	
13	6,19	6,95	6,50	1184,5	1185,3	688,3	497,0	2,383						91	2244,9		1,043			134	13,4		
14	6,18	6,95	6,50	1183,5	1184,2	686,0	498,2	2,376						89	2195,6		1,046			120	12,0		
15	6,20	6,95	6,50	1186,3	1187,0	686,9	500,1	2,372	2,377	2,413	1,51	16,94	91,10	86	2121,6	2187,4	1,040	1,043	2281,4	140	14,0	13,13	

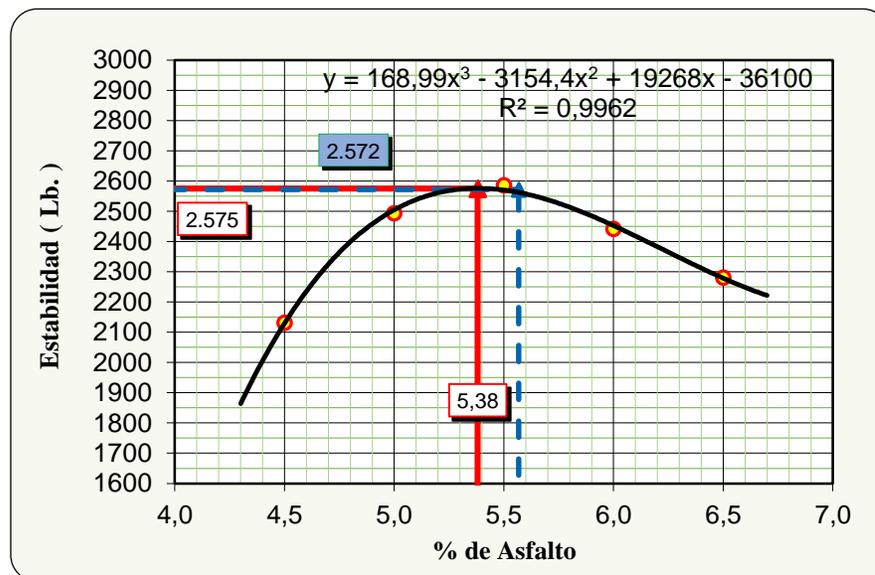
Fuente: Elaboración propia.

4.1.5. Interpretación de los resultados y representación gráfica

4.1.5.1. Curva de estabilidad

La curva de estabilidad representa una rama ascendente, conocida como “Rama seca” que crece a medida que se incrementa el porcentaje de asfalto, hasta llegar a un máximo y luego comienza a decrecer con incrementos sucesivos de ligante; esta rama se la conoce como “Rama rica en asfalto”, esta curva en forma convexa hacia arriba, está íntimamente relacionada con la curva densidad. Para contenidos bajos de asfalto y ante un esfuerzo dado de compactación, para una granulometría dada, los esfuerzos que se le suministran son absorbidos prácticamente por las partículas por lo que la resistencia se debe casi exclusivamente a la fricción de las partículas del agregado. A medida que se incrementa el asfalto, el aporte de cohesión es mayor complementándose con el aporte de fricción de las partículas del agregado. Esto sucede hasta un punto en el cual, ante un exceso de asfalto se comienza a perder contacto interarticular y la estabilidad comienza a decrecer y es aportada por el ligante y la fracción fina del agregado.

Figura 33. Estabilidad vs % de asfalto – mezcla asfáltica con agregados alcalinos.



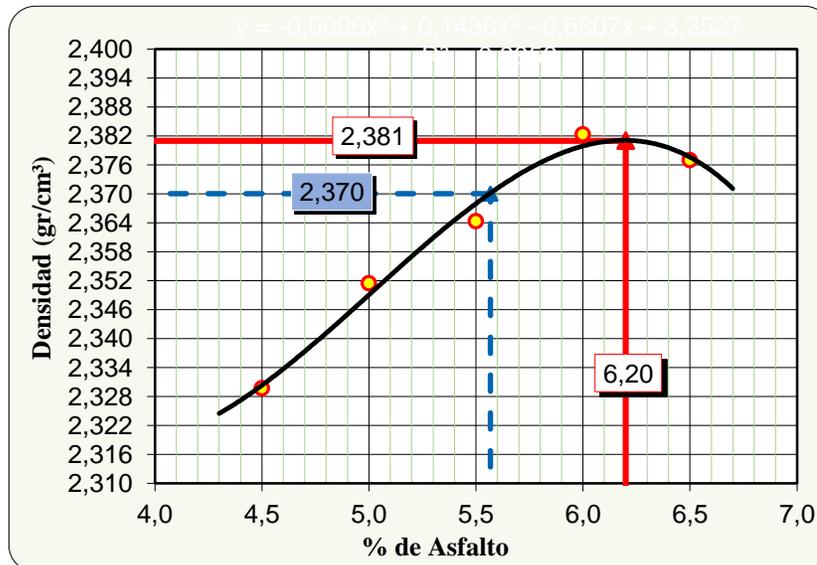
Fuente: Elaboración propia.

A medida que se aumenta la cantidad de asfalto, se sigue perdiendo porte de fricción, el de cohesión tiende a estabilizarse y la estabilidad continúa descendiendo (Teoría de los pavimentos – Ing. Mg. Hugo León Arenas Lozano).

4.1.5.2. Curva densidad

Representa la misma tendencia que la curva de estabilidad, aún cuando el porcentaje de ligante para la máxima densidad normalmente ocurre en valores de asfalto ligeramente superiores que para máxima estabilidad (Teoría de los pavimentos – Ing. Mg. Hugo León Arenas Lozano).

Figura 34. Densidad vs % de asfalto – mezcla con agregados alcalinos.

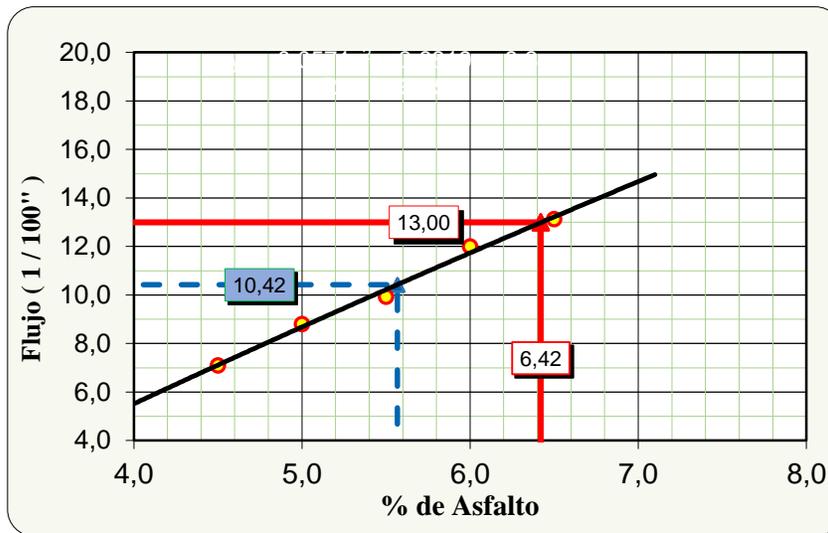


Fuente: Elaboración propia.

4.1.5.3. Curva de flujo

El flujo aumenta con el incremento del asfalto, siendo una consecuencia lógica de que las mezclas más ricas en asfalto son más flexibles y deformables que las mezclas secas (Teoría de los pavimentos – Ing. Mg. Hugo León Arenas Lozano).

Figura 35. Fluencia vs % de asfalto – mezcla asfáltica con agregados alcalinos.



Fuente: Elaboración propia.

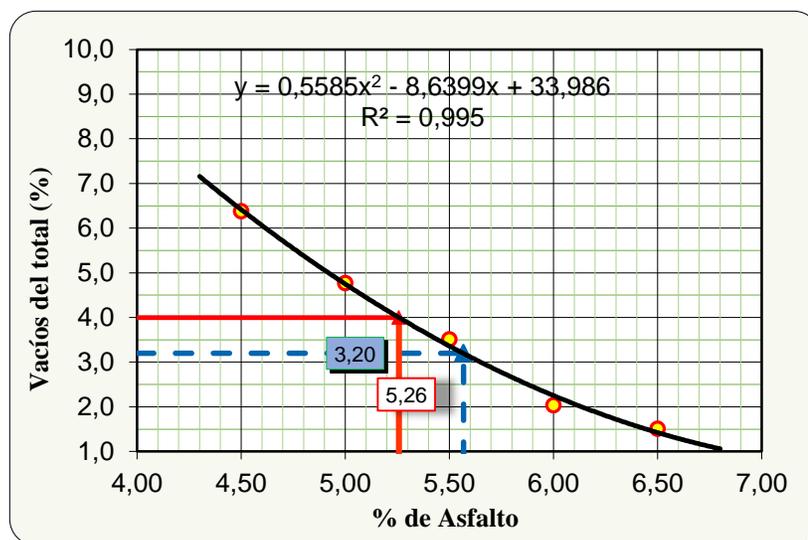
4.1.5.4. Curva de vacíos

A medida que se incrementa el contenido de asfalto se van llenando los vacíos ocupados por el aire y como consecuencia su porcentaje respecto al volumen de la briqueta, se hace menor. Las mezclas de agregado sin ligante logran su mayor grado de densidad ante un esfuerzo de compactación, a medida que se incrementa el contenido de ligante, este cubre las partículas y hace que ellas comiencen a separarse, perdiendo el contacto grano a grano, y por lo tanto los espacios no ocupados por los agregados, lo que es el VAM, comienza a crecer.

A medida que comienza a aumentar el contenido de asfalto, éste comienza a actuar como agente lubricante, las partículas vuelven a buscar un mejor acomodo y los espacios entre los granos, nuevamente el VAM, tiende a disminuir. De este punto en adelante, nuevos incrementos del contenido de ligante continúan mejorando el acomodo y mejorando su densidad y disminuyendo los vacíos no ocupados por los agregados.

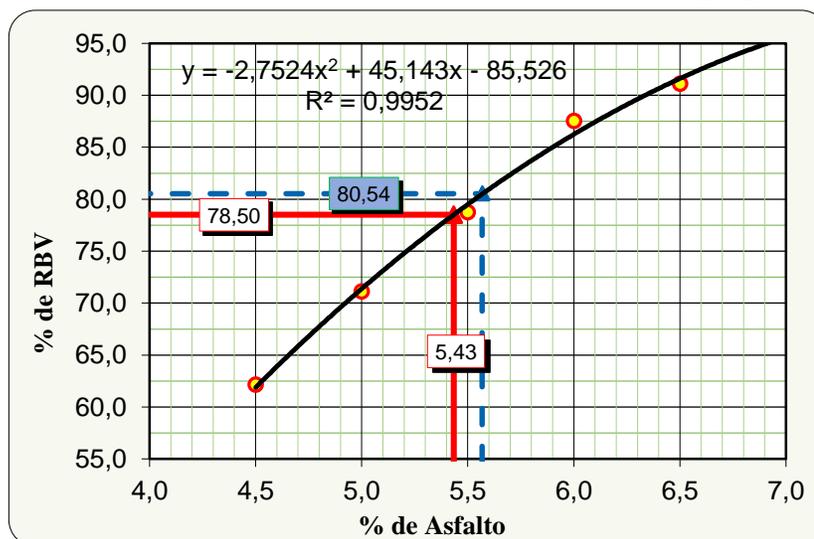
Cuando los vacíos se llenan con el máximo de asfalto, cantidades adicionales de ligante y, en consecuencia, los valores del VAM, comienzan a aumentar con cada incremento de asfalto (Teoría de los pavimentos – Ing. Mg. Hugo León Arenas Lozano).

Figura 36. % de vacíos en la mezcla vs % de asfalto – mezcla asfáltica con agregados alcalinos.



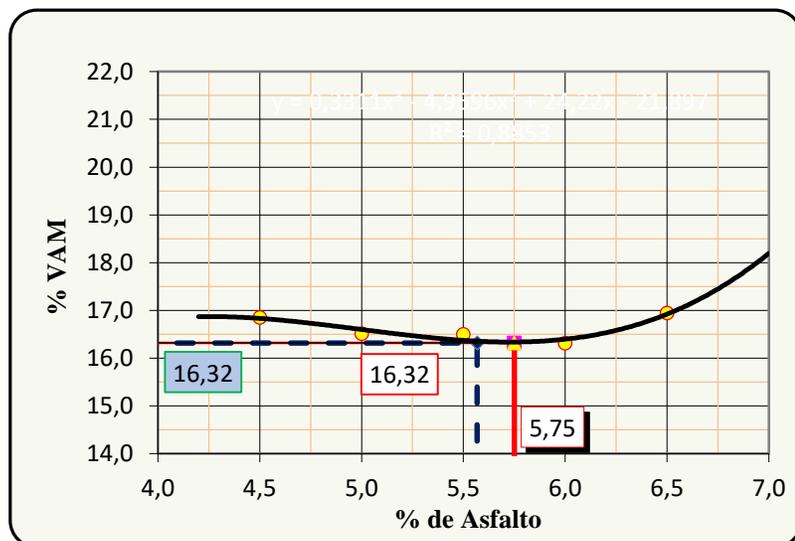
Fuente: Elaboración propia.

Figura 37. % de RBV vs % de asfalto – mezcla asfáltica con agregados alcalinos.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 38. % de vacíos en el agregado mineral vs % de asfalto – mezcla asfáltica con agregados alcalinos.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 29. Porcentaje de asfalto tentativos de la mezcla asfáltica con agregados alcalinos, obtenidos de las curvas Marshall.

Valores				
Características	% De asfalto	Obtenidos de gráficos	Especificaciones técnicas	
Densidad	6,20	2,381	-	-
% Vacíos	5,26	4,0	3	5
% R.B.V.	5,43	78,5	75	82
% V.A.M	-	16,3	12	-
Estabilidad (Lb)	5,38	2574,9	> 1500 Lb. (75 Golpes)	
Fluencia 1/100"	-	13,0	8	18
Promedio (%)	5,57	Determinación del contenido óptimo de asfalto promedio de las gráficas (Densidad, Vv, RBV y estabilidad)		

Fuente: Elaboración propia.

4.1.6. Determinación del contenido óptimo de asfalto

Una vez determinado el porcentaje de asfalto de cada curva de la metodología Marshall se deberá optar como criterio aquellos valores que cumplan las especificaciones dadas en el punto 2.3.4.1. de la investigación (Tabla 13 – Figura 6).

Tabla 30. Porcentaje óptimo de asfalto de la mezcla asfáltica con agregados alcalinos.

Valores obtenidos diseño Marshall				
Características	% De asfalto	Valores con el % óptimo	Especificaciones técnicas	
Densidad	5,57	2,370	-	-
% Vacíos	5,57	3,20	3	5
% R.B.V.	5,57	80,54	75	82
% V.A.M	5,57	16,32	12	-
Estabilidad (Lb)	5,57	2572	> 1500 Lb. (75 Golpes)	
Fluencia 1/100"	5,57	10,42	8	18
% Óptimo de asfalto propuesto			5,57	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 31. Porcentajes de materiales para el diseño de la mezcla asfáltica con agregados alcalinos.

Observaciones		
Mezcla bituminosa total	Grava 3/4"	18,89 %
	Gravilla 3/8"	28,33 %
	Arena chancada	47,22 %
	% Asf. óptimo.	5,57 %
	Total	100,0%

Fuente: Elaboración propia.

Una vez determinado el contenido óptimo de cemento asfáltico, se procede a realizar briquetas con la metodología Marshall especificada anteriormente para el tratamiento estadístico y realizar las comparaciones respectivas con los agregados ácidos.

4.1.7. Diseño de briquetas con el contenido óptimo de cemento asfáltico

Tabla 32. Diseño de briquetas con el contenido óptimo de asfalto de la mezcla asfáltica con agregados alcalinos.

Pesos Específicos (AASHTO T-100, T-85)		% de Agregados		Cemento Asfáltico AASHTO M 20		Peso Específico Total AASHTO T-228		No.de Golpes/Capa													
Mat. Retenido Tamiz Nº 4	2,655	46,1		85-100		1,001		75													
Mat. Pasa Tamiz Nº 4	2,694	53,9																			
Peso Específico Total	2,676	100																			
Peso Específico Bulk de Mezclas Bituminosas Compactadas (AASHTO T-166)							Peso Esp. Max. de Mezclas Compact. (AASHTO T-209)														
Nº Probeta	Altura de Probeta	% Asfalto		Peso Probeta			Vol. Probeta	Densidad Probeta			% de Vacíos				Estabilidad Marshall				Flujo		
		Base mezcla	Base Agregado	Seco	Sat. Sup. Seca	Sumergida en Agua		Densidad Real	Densidad Promedio	Densidad Máxima	Teórica	Total	V. A.M. (Vacíos Agregados Mineral)	R.E.V. (Relación Betumen Vacíos)	LEC. DIAL	Carga	Factor corrección	Carga Real Correjada	Carga Promedio	Lectura Dial	En 1/100 pulgadas
		%	%	grs.	grs.	grs.		CC	Grs./cm3	Grs./cm3	Grs./cm3	%	%	%	Kg	Libras		Libras	Libras	Ptg	

1	6,25	5,57	5,9	1190,3	1191,2	688,7	502,5	2,369	2,369	2,45	3,23	16,41	80,31	102	2516,3	1,027	2584,2	2584	106	10,6
2	6,18	5,57	5,9	1192,3	1193,4	689,8	503,6	2,368	2,368	2,45	3,28	16,45	80,06	100	2466,9	1,046	2580,4	2580	108	10,8
3	6,27	5,57	5,9	1193,1	1194,2	690,2	504,0	2,367	2,367	2,45	3,29	16,46	80,00	102	2516,3	1,021	2569,1	2569	106	10,6
4	6,31	5,57	5,9	1189,6	1189,9	687,8	502,1	2,369	2,369	2,45	3,21	16,39	80,41	103	2541,0	1,011	2568,9	2569	105	10,5
5	6,17	5,57	5,9	1194,1	1195,2	690,8	504,4	2,367	2,367	2,45	3,29	16,46	80,02	99	2442,3	1,049	2561,9	2562	107	10,7
6	6,35	5,57	5,9	1195,6	1196,2	691,2	505,0	2,368	2,368	2,45	3,28	16,45	80,06	104	2565,6	1,000	2565,6	2566	102	10,2
7	6,32	5,57	5,9	1195,7	1196,4	691,7	504,7	2,369	2,369	2,45	3,22	16,39	80,39	104	2565,6	1,008	2586,2	2586	103	10,3
8	6,31	5,57	5,9	1195,9	1196,7	691,6	505,1	2,368	2,368	2,45	3,28	16,45	80,08	103	2541,0	1,011	2568,9	2569	101	10,1
9	6,35	5,57	5,9	1192,8	1193,4	690,1	503,3	2,370	2,370	2,45	3,18	16,36	80,56	104	2565,6	1,000	2565,6	2566	104	10,4
10	6,16	5,57	5,9	1194,7	1195,8	691,2	504,6	2,368	2,368	2,45	3,28	16,45	80,07	99	2442,3	1,053	2571,7	2572	108	10,8
11	6,22	5,57	5,9	1197,7	1198,3	692,7	505,6	2,369	2,369	2,45	3,23	16,40	80,33	101	2491,6	1,035	2578,8	2579	106	10,6
12	6,35	5,57	5,9	1197,2	1198,1	692,8	505,3	2,369	2,369	2,45	3,21	16,39	80,42	104	2565,6	1,000	2565,6	2566	103	10,3
13	6,37	5,57	5,9	1196,7	1197,2	692,1	505,1	2,369	2,369	2,45	3,21	16,39	80,41	105	2590,3	0,995	2577,3	2577	103	10,3
14	6,34	5,57	5,9	1191,5	1192,6	689,8	502,8	2,370	2,370	2,45	3,19	16,37	80,51	104	2565,6	1,003	2573,3	2573	104	10,4
15	6,23	5,57	5,9	1193,8	1194,5	690,2	504,3	2,367	2,367	2,45	3,29	16,46	80,00	100	2466,9	1,032	2545,9	2546	108	10,8

OBSERVACIÓN:									
Especificación	Mínimo	3	12	75				1500	8
	Máximo	5		82					18

N° Probeta	Altura de Probeta	% Asfalto		Peso Probeta			Vol.	Densidad Probeta		% de Vacíos				Estabilidad Marshall				Flujo		
		Base mezcla	Base Agregado	Seco	Sat. Sup. Seca	Sumergida en Agua	Probeta	Densidad Real	Densidad Promedio	Densidad Máxima Teórica	% de Vacíos Mezcla Total	V. A. M. (Vacíos Agregados Mineral)	R. B. V. (Relación Betumen Vacíos)	LEC. DIAL	Carga	Factor corrección	Carga Real Corregida	Carga Promedio	Lectura Dial	En 1/100 pulgadas
		%	%	grs.	grs.	grs.	CC	Grs./cm3	Grs./cm3	Grs./cm3	%	%	%	Kg	Libras		Libras	Libras	Plg	
16	6,23	5,57	5,9	1192,7	1193,4	689,8	503,6	2,368	2,368	2,45	3,25	16,42	80,22	101	2491,6	1,032	2571,3	2571	106	10,6
17	6,34	5,57	5,9	1193,5	1194,2	690,6	503,6	2,370	2,370	2,45	3,18	16,36	80,55	104	2565,6	1,003	2573,3	2573	104	10,4
18	6,29	5,57	5,9	1189,7	1190,6	688,7	501,9	2,370	2,370	2,45	3,16	16,35	80,65	103	2541,0	1,016	2581,6	2582	108	10,8
19	6,19	5,57	5,9	1193,2	1193,9	689,9	504,0	2,367	2,367	2,45	3,28	16,45	80,04	100	2466,9	1,043	2573,0	2573	106	10,6
20	6,25	5,57	5,9	1189,9	1190,3	687,9	502,4	2,368	2,368	2,45	3,24	16,42	80,24	102	2516,3	1,027	2584,2	2584	105	10,5
21	6,30	5,57	5,9	1192,7	1193,6	690,2	503,4	2,369	2,369	2,45	3,21	16,39	80,42	103	2541,0	1,013	2574,0	2574	104	10,4
22	6,18	5,57	5,9	1192,6	1193,2	689,3	503,9	2,367	2,367	2,45	3,31	16,48	79,89	100	2466,9	1,046	2580,4	2580	108	10,8
23	6,17	5,57	5,9	1193,2	1193,8	689,7	504,1	2,367	2,367	2,45	3,30	16,47	79,95	99	2442,3	1,049	2561,9	2562	109	10,9
24	6,23	5,57	5,9	1191,6	1192,3	689,3	503,0	2,369	2,369	2,45	3,22	16,40	80,36	101	2491,6	1,032	2571,3	2571	109	10,9
25	6,31	5,57	5,9	1195,2	1196,4	692,1	504,3	2,370	2,370	2,45	3,18	16,36	80,57	103	2541,0	1,011	2568,9	2569	105	10,5
26	6,28	5,57	5,9	1196,1	1197,7	692,8	504,9	2,369	2,369	2,45	3,22	16,40	80,36	102	2516,3	1,019	2564,1	2564	108	10,8
27	6,35	5,57	5,9	1192,1	1192,8	689,3	503,5	2,368	2,368	2,45	3,28	16,45	80,08	104	2565,6	1,000	2565,6	2566	103	10,3
28	6,36	5,57	5,9	1193,8	1194,4	690,0	504,4	2,367	2,367	2,45	3,31	16,48	79,90	104	2565,6	0,998	2559,2	2559	105	10,5
29	6,29	5,57	5,9	1194,6	1195,7	691,6	504,1	2,370	2,370	2,45	3,19	16,37	80,52	103	2541,0	1,016	2581,6	2582	104	10,4
30	6,27	5,57	5,9	1191,7	1192,4	689,4	503,0	2,369	2,369	2,45	3,21	16,39	80,40	102	2516,3	1,021	2569,1	2569	105	10,5
OBSERVACIÓN:																				
Especificación		Mínimo		3	12	75											1500		8	
		Máximo		5		82													18	

Fuente: Elaboración propia.

4.1.8. Ensayo de Desprendimiento por fricción (N-CMT-4-04, materiales pétreos para mezclas asfálticas)

Se realiza este procedimiento para determinar la pérdida de la película de asfalto en los materiales pétreos. La prueba consiste en someter a la acción del agua y a varios ciclos de agitado dentro de un frasco de vidrio, varias muestras de mezcla asfáltica de granulometría definida, evaluando su estado físico una vez sometido a ese tratamiento.

La granulometría de los agregados es definida por el manual M-MMP-4-04-001 (Muestreo de materiales pétreos para mezclas asfálticas) según indica las tablas que se muestran a continuación.

Tabla 33. Juego de mallas para agregados gruesos – ensayo de desprendimiento por fricción.

Designación	Abertura (mm)
2"	50
1 ½"	37,5
1 ¼"	31,5
1"	25
¾"	19
1/2"	12,5
3/8"	9,5
1/4"	6,3
N°4	4,75

Fuente: Norma N-CMT-4-04 materiales pétreos para mezclas asfálticas.

Tabla 34. Juego de mallas para agregados finos – ensayo de desprendimiento por fricción.

Designación	Abertura (mm)
N°10	2
N°20	0,85
N°40	0,425
N°60	0,25
N°100	0,15
N°200	0,075

Fuente: Norma N-CMT-4-04 materiales pétreos para mezclas asfálticas.

Una vez establecido la granulometría de los agregados se coloca a calentar a temperatura de $135^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. el contenido de asfalto se establece conforme indica la norma en la siguiente figura.

Tabla 35. Contenido de cemento asfáltico – ensayo de desprendimiento por fricción.

Porción	Contenido de producto asfáltico ⁽²⁾
1 y 2	Contenido óptimo más 0,5% de la masa del material pétreo
3 y 4	Contenido óptimo ⁽¹⁾
5 y 6	Contenido óptimo menos 0,5% de la masa del material pétreo
(1) El contenido óptimo de cemento asfáltico se determinará conforme al procedimiento que establezca el proyecto o apruebe la Secretaría, y será proporcionado como dato para ejecutar esta prueba.	
(2) El propósito de generar porciones con diferentes cantidades de material asfáltico es comparar la afinidad dentro de un rango de variación que se puede presentar en campo.	

Fuente: Norma N-CMT-4-04 materiales pétreos para mezclas asfálticas.

Con cada contenido de cemento asfáltico se procede a la realización de las mezclas asfálticas realizando la homogeneización de cada mezcla asfáltica. Posteriormente se deja enfriar cada una de las fracciones y orear a temperatura ambiente, se colocan las fracciones de prueba en frascos de vidrio y se agrega agua destilada hasta lograr la saturación de la mezcla, se tapan los frascos con mezclas y agua y se deja reposar durante 24 horas.

Si transcurrido dicho tiempo no se aprecia desprendimiento de la película de asfalto en alguno de los frascos se deberán agitar dichos frascos durante 60 ciclos por minuto, 3 periodos de 5 minutos cada uno.

$$P_{FR} = \frac{\sum P_{fr}}{N}$$

Donde:

P_{FR} = Pérdida por fricción promedio (%).

P_{fr} = Pérdida por fricción de cada una de las muestras consideradas, obtenidas como se muestra en la fracción anterior (%).

N= Número de muestras consideradas, contenidas en los frascos.

Figura 39. Ensayo de desprendimiento por fricción norma N-CMT-4-04 materiales pétreos para mezclas asfálticas.



Fuente: Elaboración propia.

Los criterios de adherencia que adopta este método son:

< 10% adherencia normal.

10% - 25% regular adherencia.

> 25% baja adherencia.

Figura 40. Evaluación del desprendimiento agregado pétreo – asfalto.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 36. Desprendimiento por fricción y evaluación de la adherencia de la mezcla asfáltica con agregados alcalinos método N-CMT-4-04.

Mezcla asfáltica con agregados alcalinos - Charaja				
Contenido óptimo de asfalto más 0,5 % de la masa del material pétreo				
Peso agregado pétreo= 1133,2 gr.			Peso asfalto= 72,8 gr.	
N°	∑Pfr (%)	N	PFR (%)	Adherencia
1	17	28	0,61	Normal
2	14	25	0,56	Normal
3	12	23	0,52	Normal
4	13	19	0,68	Normal
5	16	29	0,55	Normal
6	18	31	0,58	Normal
7	11	17	0,65	Normal
8	10	15	0,67	Normal
9	13	24	0,54	Normal
10	12	26	0,46	Normal
Contenido óptimo de asfalto 5,57%				
Peso agregado pétreo= 1133,2 gr.			Peso asfalto= 66,8 gr.	
N°	∑Pfr (%)	N	PFR (%)	Adherencia
1	126	30	4,2	Normal
2	184	41	4,5	Normal
3	186	36	5,2	Normal
4	183	38	4,8	Normal
5	174	32	5,4	Normal
6	172	41	4,2	Normal
7	188	45	4,2	Normal
8	176	30	5,9	Normal
9	169	29	5,8	Normal
10	161	33	4,9	Normal
Contenido óptimo de asfalto menos 0,5 % de la masa del material pétreo				
Peso agregado pétreo= 1133,2 gr.			Peso asfalto= 61,1 gr.	
N°	∑Pfr (%)	N	PFR (%)	Adherencia
1	432	49	8,8	Normal
2	398	47	8,5	Normal
3	384	43	8,9	Normal
4	422	51	8,3	Normal
5	395	42	9,4	Normal
6	486	52	9,3	Normal
7	423	46	9,2	Normal
8	384	41	9,4	Normal
9	392	44	8,9	Normal
10	397	45	8,8	Normal

Fuente: Elaboración propia.

4.1.9. Cubrimiento de los agregados alcalinos con materiales asfálticos en presencia del agua (Stripping) AASHTO T-182 – 84 (2002) / NLT 166 -92 / I.N.V. E – 737 – 07

Esta norma describe los procedimientos de cubrimiento e inmersión estática que se deben seguir para valorar, el efecto de la acción del agua sobre la película asfáltica que recubre un agregado. El ensayo es aplicable a cementos asfálticos, asfaltos líquidos, emulsiones asfálticas y alquitrán.

Los agregados pétreos se preparan los agregados tal que el 100% pase el tamiz de 9.5 mm (3/8”) y quede retenido en el tamiz de 6.3 mm (1/8”). El agregado para prueba de cubrimiento en seco debe ser lavado con agua destilada para remover los finos adheridos a las partículas, secado a una temperatura comprendida entre 135° y 149° C (275° a 300° F) hasta masa constante y, una vez alcance la temperatura ambiente.

Figura 41. Pesado de los agregados pétreos para el ensayo de adherencia AASHTO T-182.



Fuente: Elaboración propia

Se pesan en un recipiente de aluminio o estaño 100 ± 1 g de agregado seco a la temperatura ambiente. Se añaden 5.5 ± 0.2 g del material asfáltico, precalentado cuando sea necesario, a la temperatura necesaria hasta su grado de fluidez sin perder sus propiedades. El material asfáltico y los agregados se mezclan vigorosamente con la espátula durante 2 minutos.

Figura 42. Mezclado de agregado – asfalto para el ensayo de adherencia AASHTO T-182.



Fuente: Elaboración propia.

Los agregados cubiertos se curarán dentro del recipiente de mezclado durante 2 horas en un horno a 60° C (140° F), manteniendo abiertos los dispositivos de ventilación del mismo. Después del período de curado, se continúa el proceso de mezclado hasta que la mezcla alcance la temperatura ambiente o hasta que el material asfáltico deje de escurrir de las partículas.

Figura 43. Vaciado de la mezcla asfáltica en recipientes y sometidos a saturación en agua destilada, método AASHTO T-182.



Fuente: Elaboración propia.

El cubrimiento deber ser completo después del remezclado, es decir, no se permitirán zonas sin cubrir de ligante.

Inmersión en agua – Se pasa el agregado cubierto a un vaso de vidrio de unos 500 ml de capacidad, se cubre inmediatamente con 400 ml de agua destilada a temperatura ambiente, (aproximadamente 25° C (77° F)) y se deja en reposo de 16 a 18 horas.

Estimación visual del área cubierta – Sin perturbar o agitar el agregado cubierto, se retira cuidadosamente cualquier película que flote en la superficie del agua. Se ilumina la mezcla con una lámpara, colocada de tal manera que no produzca brillos en la superficie del agua. Por observación a través del agua, desde arriba, se estimará el porcentaje del área total del agregado visible que permanece cubierto como mayor del 95%. Se considerarán totalmente cubiertas las zonas que, aun teniendo un color más claro, conserven material bituminoso recubriéndolo.

Figura 44. Estimación visual del desprendimiento ocasionado por el fenómeno de Stripping, método AASHTO T-182.



Fuente: Elaboración propia.

Este ensayo debe ser considerado como un ensayo subjetivo de tipo apreciativo de "apto - no apto", en relación con este nivel del 95%, ya que la precisión a niveles más bajos no es satisfactoria.

Tabla 37. Adherencia en inmersión estática y evaluación de la adherencia de la mezcla asfáltica con agregados alcalinos método AASHTO T-182.

Mezcla asfáltica con agregados alcalinos			
N°	Adherencia evaluada en laboratorio	Mínimo establecido por norma	Observación
1	92%	96,0%	Apto
2	97%	96,0%	Apto
3	90%	94,0%	No apto
4	95%	98,0%	Apto
5	97%	97,0%	Apto
6	97%	98,0%	Apto
7	95%	98,0%	Apto
8	96%	98,0%	Apto
9	96%	99,0%	Apto
10	97%	99,0%	Apto
11	94%	99,0%	Apto
12	95%	98,0%	Apto
13	96%	97,0%	Apto
14	94%	95,0%	Apto
15	96%	95,0%	Apto

Fuente: elaboración propia.

La metodología de la norma mexicana N-CMT-4-04 (Ensayo de Desprendimiento por fricción, materiales pétreos para mezclas asfálticas) presenta parámetros de adherencia en mezclas asfálticas utilizando todo el peso de las briquetas en la metodología Marshall, pero variando el contenido de asfalto en las mezclas simulando los casos más desfavorables de exudación y escasez de asfalto, la metodología AASHTO T-182 utiliza solo agregados gruesos con un determinado peso de asfalto, ambas metodologías son válidas para la evaluación visual de la adherencia pero sus parámetros de especificación son distintos, se analizara mediante graficas de comparación en el punto 4.4. los resultados obtenidos en ambas metodologías de adherencia agregado-asfalto.

4.1.10. Resumen de los resultados obtenidos y tratamiento estadístico descriptivo en el programa Statgraphics¹⁰

Tabla 38. Resumen de los resultados y tratamiento estadístico descriptivo del diseño de mezcla asfáltica con agregados alcalinos.

Mezcla asfáltica con agregados alcalinos - Charaja						Desprendimiento por fricción (%) norma N-CMT-4-04			Adherencia inmersión estática (%) AASHTO T-182
Densidad (gr/cm ³)	Estabilidad (Lb)	Flujo (1/100")	% vacíos	% VAM	% RBV	+0,5% asfalto	% optimo	-0,5% asfalto	
						< 10% adherencia normal			
-	1500	8-18	3-5	12	75-82	10% - 25% regular adherencia			
2370	2572	10,42	3,20	16,32	80,54	> 25% baja adherencia			> 95% de adherencia=Material apto
2,369	2584	10,6	3,23	16,41	80,31	0,61	4,2	8,8	96,00
2,368	2580	10,8	3,28	16,45	80,06	0,56	4,5	8,5	96,00
2,367	2569	10,6	3,29	16,46	80,00	0,52	5,2	8,9	94,00
2,369	2569	10,5	3,21	16,39	80,41	0,68	4,8	8,3	98,00
2,367	2562	10,7	3,29	16,46	80,02	0,55	5,4	9,4	97,00
2,368	2566	10,2	3,28	16,45	80,06	0,58	4,2	9,3	98,00
2,369	2586	10,3	3,22	16,39	80,39	0,65	4,2	9,2	98,00
2,368	2569	10,1	3,28	16,45	80,08	0,67	5,9	9,4	98,00
2,370	2566	10,4	3,18	16,36	80,56	0,54	5,8	8,9	99,00
2,368	2572	10,8	3,28	16,45	80,07	0,46	4,9	8,8	99,00
2,369	2579	10,6	3,23	16,40	80,33	-	-	-	99,00

¹⁰ Para ver el procedimiento del tratamiento estadístico descriptivo en el programa STATGRAPHICS ir a ANEXO D y G.

2,369	2566	10,3	3,21	16,39	80,42	-	-	-	98,00	
2,369	2577	10,3	3,21	16,39	80,41	-	-	-	97,00	
2,370	2573	10,4	3,19	16,37	80,51	-	-	-	95,00	
2,367	2546	10,8	3,29	16,46	80,00	-	-	-	95,00	
2,368	2571	10,6	3,25	16,42	80,22	-	-	-	-	
2,370	2573	10,4	3,18	16,36	80,55	-	-	-	-	
2,370	2582	10,8	3,16	16,35	80,65	-	-	-	-	
2,367	2573	10,6	3,28	16,45	80,04	-	-	-	-	
2,368	2584	10,5	3,24	16,42	80,24	-	-	-	-	
2,369	2574	10,4	3,21	16,39	80,42	-	-	-	-	
2,367	2580	10,8	3,31	16,48	79,89	-	-	-	-	
2,367	2562	10,9	3,30	16,47	79,95	-	-	-	-	
2,369	2571	10,9	3,22	16,40	80,36	-	-	-	-	
2,370	2569	10,5	3,18	16,36	80,57	-	-	-	-	
2,369	2564	10,8	3,22	16,40	80,36	-	-	-	-	
2,368	2566	10,3	3,28	16,45	80,08	-	-	-	-	
2,367	2559	10,5	3,31	16,48	79,90	-	-	-	-	
2,370	2582	10,4	3,19	16,37	80,52	-	-	-	-	
2,369	2569	10,5	3,21	16,39	80,40	-	-	-	-	
Recuento	30	30	30	30	30	30	10	10	10	15
Promedio	2,3685	2571,43	10,5433	3,24033	16,4157	80,2593	0,582	4,91	8,95	97,1333
Mediana	2,369	2571	10,5	3,23	16,405	80,32	0,57	4,85	8,9	98
Moda	2,369	2569	10,8	3,28	-	-	-	4,2	-	98
Media geométrica	2,3685	2571,42	10,5412	3,24003	16,4156	80,259	0,578091	4,872	8,94287	97,121

Varianza	1,15517E-06	75,2885	0,0466782	0,00202402	0,00161161	0,0516961	0,00497333	0,421	0,140556	2,55238
Desviación estándar	0,00107479	8,67689	0,216051	0,0449891	0,0401449	0,227368	0,0705219	0,648845	0,374907	1,59762
Coefficiente de variación	0,05%	0,34%	2,05%	1,39%	0,24%	0,28%	12,12%	13,21%	4,19%	1,64%
Error estándar	0,000196229	1,58418	0,0394454	0,00821386	0,00732941	0,0415115	0,022301	0,205183	0,118556	0,412503
Mínimo	2,367	2546	10,1	3,16	16,35	79,89	0,46	4,2	8,3	94
Máximo	2,37	2586	10,9	3,31	16,48	80,65	0,68	5,9	9,4	99
Rango	0,003	40	0,8	0,15	0,13	0,76	0,22	1,7	1,1	5
Dispersión (D)	0,0037	40,26	0,8	0,15	0,13	0,75	0,22	1,7	1,1	5
Valor de dispersión (T)	0,0015	0,02	0,08	0,05	0,01	0,01	0,38	0,35	0,12	0,05
Error absoluto total	0,0019	8,6	0,2	0,04	0,04	0,22	0,07	0,62	0,36	1,54
Error relativo %	0,0790	0,33	2,02	1,36	0,23	0,28	11,67	12,76	3,98	1,59

Fuente: Elaboración propia.

4.1.11. Resumen de los resultados de las variables sometidas a pruebas de bondad de ajuste

La prueba estadística, tiene por objeto medir la certidumbre que se tiene al hacer una hipótesis estadística sobre una población y/o muestra. La prueba de bondad de ajuste escogida para el análisis de la hipótesis por variable es la prueba estadística Chi-cuadrado (χ^2), el cual se basa en el análisis de frecuencias tanto de valores observados, como valores esperados, para un número determinado de intervalos.

Esta prueba es comúnmente usada, para verificar la bondad de ajuste de la distribución empírica a una distribución teórica, fue propuesta por Karl Pearson en 1900.¹¹

Criterios de decisión de la prueba Chi-cuadrado (χ^2):

- Si el Chi-cuadrado calculado es menor o igual que el valor tabular, es decir:

$$\chi_c^2 \leq \chi_t^2$$

entonces, se acepta la hipótesis que el ajuste es bueno al nivel de significación seleccionado.

- Si el Chi-cuadrado calculado es mayor que el valor tabular, es decir:

$$\chi_c^2 > \chi_t^2$$

entonces, el ajuste es malo y se rechaza la hipótesis, siendo necesario probar con otra distribución teórica.

¹¹ Hidrología estadística / Pág. (174) – Máximo Villón Béjar.

4.1.11.1. Análisis de la hipótesis y ajuste de datos por variable¹²**Tabla 39. Resumen de los resultados del tratamiento estadístico inferencial del diseño de mezcla asfáltica con agregados alcalinos.**

Mezcla asfáltica con agregados alcalinos - Charaja						
Variable analizada	Numero de datos analizados	Chi-Cuadrado calculado χ_c^2	Valor tabular del Chi-Cuadrado χ_t^2 $\alpha = 0,05 = 95\%$ de probabilidad	Hipótesis	Ajuste de datos	Análisis de datos
Estabilidad (Lb)	30	10,37	21	Ho: Hipótesis nula	Bueno	Datos homogéneos, se acepta la hipótesis
Fluencia (1/100'')	30	24,16	21	Ha: Hipótesis alternativa	Malo	Datos no homogéneos, se rechaza la hipótesis
% De vacíos	30	26,58	21	Ha: Hipótesis alternativa	Malo	Datos no homogéneos, se rechaza la hipótesis
% De VAM	30	24,5	21	Ha: Hipótesis alternativa	Malo	Datos no homogéneos, se rechaza la hipótesis
% De RBV	30	21	21	Ho: Hipótesis nula	Bueno	Datos homogéneos, se acepta la hipótesis
Desprendimiento por fricción - Norma N-CMT-4-04						
+0,5% Asfalto	10	0,67	5,99	Ho: Hipótesis nula	Bueno	Datos homogéneos, se acepta la hipótesis
% Óptimo	10	4	5,99	Ho: Hipótesis nula	Bueno	Datos homogéneos, se acepta la hipótesis
-0,5% Asfalto	10	4,33	5,99	Ho: Hipótesis nula	Bueno	Datos homogéneos, se acepta la hipótesis
Adherencia en inmersión estática - Norma AASHTO T-182						
Adherencia	15	2,58	11,1	Ho: Hipótesis nula	Bueno	Datos homogéneos, se acepta la hipótesis

Fuente: Elaboración propia.

¹² Para ver el procedimiento del tratamiento estadístico inferencial con los parámetros de la prueba de Chi-cuadrado (χ^2) ir a ANEXO D.

4.2. DISEÑO MARSHALL CON AGREGADOS ÁCIDOS

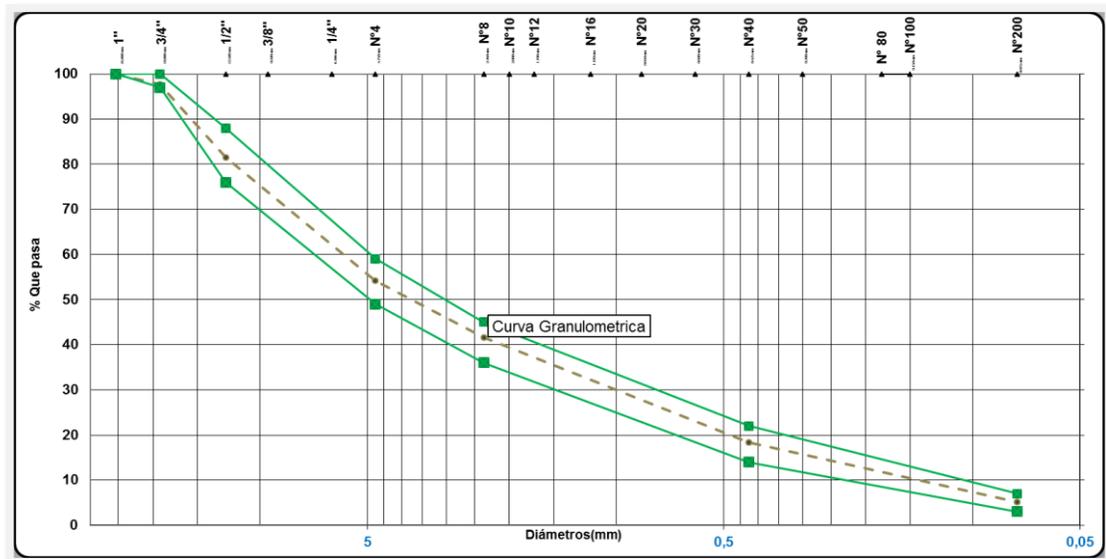
Utilizando las especificaciones para la granulometría mencionadas anteriormente, se toma como gradación la curva granulométrica C.

Tabla 40. Granulometría de los agregados ácidos para el diseño Marshall.

Granulometrías agregados ácidos – Cerro Rico de Potosí								
Agregado		Grava - Triturada		Arena - Triturada		% Que pasa	faja c	
% Usado		50%		50%			Curva de trabajo	
Plg	mm.	% Total	% Enc.	% Total	% Enc.		Inf.	Sup.
1"	25,40	100,0	50,0	100,0	50,0	100,0	100	100
3/4"	19,10	95,3	47,7	100,0	50,0	97,7	97	100
1/2"	12,50	62,9	31,5	100,0	50,0	81,5	76	88
3/8"	9,50	56,5	28,3	100,0	50,0	78,3	-	-
N°4	4,75	9,6	4,8	98,8	49,4	54,2	49	59
N°10	2,360	0,3	0,2	82,9	41,5	41,6	36	45
N°16	1,180	0,2	0,1	62,5	31,3	31,4	-	-
N°40	0,425	0,2	0,1	36,4	18,2	18,3	14	22
N°80	0,180	0,1	0,1	26,8	13,4	13,5	-	-
N°200	0,075	0,1	0,1	10,1	5,1	5,1	3	7

Fuente: Elaboración propia.

Figura 45. Curva granulométrica de los agregados ácidos en función a la gradación para el diseño Marshall.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 41. Dosificación tentativa de la mezcla asfáltica con agregados ácidos.

Dosificación tentativa Marshall agregados ácidos – Cerro Rico de Potosí															
Tamiz	% Pasa	% Retenido	% Ret. Tamiz	3,0%		3,5%		4,0%		4,5%		5,0%		5,5%	
				P. Parcial (gr)	P. Acum. (gr)										
1"	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3/4"	97,7	2,3	2,3	39,9	39,9	39,7	39,7	39,5	39,5	39,3	39,3	39,1	39,1	38,9	38,9
1/2"	81,5	18,6	16,2	275,0	314,9	273,6	313,3	272,2	311,6	270,7	310,0	269,3	308,4	267,9	306,8
3/8"	78,3	21,7	3,2	54,2	369,0	53,9	367,1	53,6	365,2	53,3	363,3	53,0	361,4	52,8	359,5
Nº4	54,2	45,8	24,0	408,0	777,1	405,9	773,0	403,8	769,0	401,7	765,0	399,6	761,0	397,5	757,0
Nº10	41,6	58,4	12,6	214,1	991,1	213,0	986,0	211,9	980,9	210,8	975,8	209,7	970,7	208,6	965,6
Nº16	31,4	68,6	10,2	173,8	1165,0	172,9	1159,0	172,0	1153,0	171,1	1147,0	170,2	1141,0	169,4	1134,9
Nº40	18,3	81,7	13,1	222,1	1387,1	220,9	1379,9	219,8	1372,8	218,7	1365,6	217,5	1358,5	216,4	1351,3
Nº80	13,5	86,5	4,8	81,7	1468,8	81,3	1461,2	80,9	1453,6	80,4	1446,1	80,0	1438,5	79,6	1430,9
Nº200	5,1	94,9	8,4	141,8	1610,6	141,1	1602,3	140,4	1594,0	139,6	1585,7	138,9	1577,4	138,2	1569,1
Filler	0,0	100,0	5,1	86,9	1697,5	86,4	1688,8	86,0	1680,0	85,5	1671,3	85,1	1662,5	84,7	1653,8
Peso Total (gr)=				1697,5		1688,8		1680,0		1671,3		1662,5		1653,8	

Peso Muestra (gr)=	1697,5	1688,75	1680	1671,25	1662,5	1653,75
Peso Asfalto (gr)=	52,5	61,25	70	78,75	87,5	96,25
Peso Total Material + C. Asf. (gr)=	1750	1750	1750	1750	1750	1750

Fuente: Elaboración propia.

Luego de realizar la granulometría correspondiente de la gradación de los agregados y en función al tamaño máximo del agregado grueso se realizó la dosificación tentativa para el método Marshall con el mismo procedimiento que se explicó en el punto 4.1. – 4.1.1. – 4.1.2. – 4.1.3.

4.2.1. Diseño de la mezcla asfáltica método Marshall

Tabla 42. Diseño de la mezcla asfáltica con agregados ácidos método Marshall.

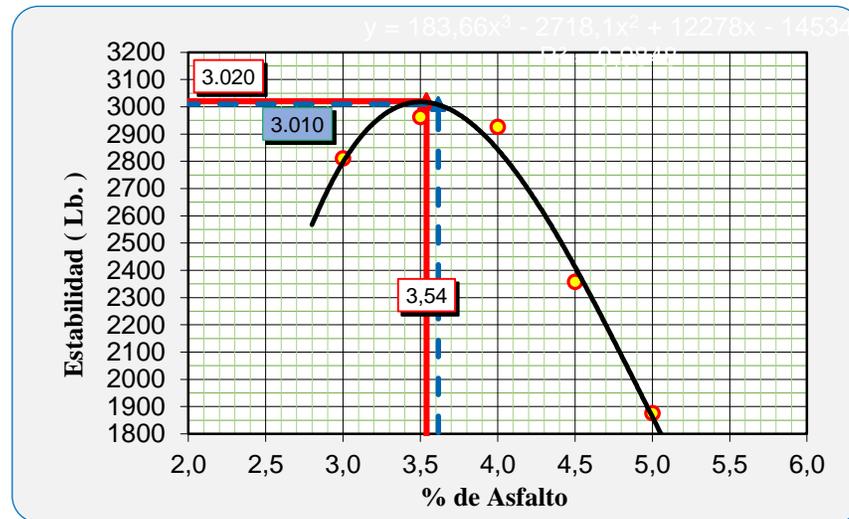
Pesos Específicos (AASHTO T-100, T-85)		% de Agregados		C. Asfáltico AASHTO M-20		DOSIFICACION		GRAYA	GRAVILLA	ARENA CHANCADA																											
Mat. Retenido Tamiz N° 4	4,099	gr/cm ³	45,8	Tipo de asfalto AASHTO M 20	85-100			3/4"	3/8"	N° 4																											
Mat. Pasa Tamiz N° 4	4,158	gr/cm ³	54,2	P. Especifico Total AASHTO T-22	1,001	% DE AGREGADOS :		50%		50%																											
P. Esp. Agregado Total (Gag)	4,131	gr/cm ³	100	PROBISA C.A.P.85-100		ORIGEN AGREGADOS :		Agregados ácidos Ciudad de Potosi																													
N° GOLPES:		75		130 °C Compactación																																	
IDENTIFICACION	ALTURA BRIQUETA (CM)	% DE ASFALTO		PESO BRIQUETA EN EL AIRE (gr)	PESO BRIQUETA EN EL AIRE S.S.S. (gr)	PESO BRIQUETA SUMERGIDA EN AGUA (gr)	VOLUMEN BRIQUETA (cm ³)	DENSIDAD BRIQUETA			% Vacíos			ESTABILIDAD (Lb)					LECT. DIAL	FLUJO 1/100"	MEDIA																
		BASE AGREGADO	BASE MEZCLA					REAL (Dr.)	PROMEDIO (Dr.m.)	MAXIMA TEORICA (kg/cm ³)	MEZCLA (Vv)	AGREGADOS (VAM)	LLEAMOS DE ASFALTO (RBV)	LECT. DIAL	REAL	MEDIA	FACTOR DE CORRECCION (ALTURA) mm	MEDIA f.c.				CORREGIDA															
																							a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o
																							D		r-d		c/e		1		2		3		4		
1	6,07	3,09	3,00	1712,7	1713,8	1231,3	482,5	3,550					104	2565,6		1,081			61	6,1																	
2	6,10	3,09	3,00	1721,0	1722,6	1239,6	483,0	3,563					109	2689,0		1,071			75	7,5																	
3	6,00	3,09	3,00	1718,4	1719,1	1234,3	484,8	3,545	3,552	3,777	5,93	16,58	64,21	102	2516,3	2590,3	1,103	1,085	2810,5	70	7,0	6,87															
4	6,03	3,63	3,50	1709,7	1711,0	1231,7	479,3	3,567						109	2689,0		1,093			72	7,2																
5	5,98	3,63	3,50	1713,1	1714,2	1234,4	479,8	3,570						117	2886,3		1,109			90	9,0																
6	6,37	3,63	3,50	1710,8	1711,4	1232,5	478,9	3,572	3,570	3,723	4,12	16,60	75,19	112	2763,0	2779,4	0,995	1,066	2962,9	85	8,5	8,23															
7	5,99	4,17	4,00	1739,2	1740,1	1254,0	486,1	3,578						117	2886,3		1,106			105	10,5																
8	6,10	4,17	4,00	1749,1	1750,1	1259,2	490,9	3,563						108	2664,3		1,071			100	10,0																
9	6,35	4,17	4,00	1747,6	1748,3	1257,2	491,1	3,559	3,566	3,672	2,86	17,11	83,27	111	2738,3	2763,0	1,000	1,059	2926,0	98	9,8	10,10															
10	6,08	4,71	4,50	1741,6	1742,5	1251,4	491,1	3,546						88	2170,9		1,078			120	12,0																
11	6,15	4,71	4,50	1753,1	1753,8	1260,3	493,5	3,552						89	2195,6		1,056			130	13,0																
12	6,16	4,71	4,50	1721,4	1722,3	1238,0	484,3	3,554	3,551	3,621	1,94	17,90	89,17	93	2294,3	2220,3	1,053	1,062	2357,9	123	12,3	12,43															
13	6,13	5,26	5,00	1746,0	1747,0	1252,6	494,4	3,532						70	1726,9		1,062			155	15,5																
14	6,13	5,26	5,00	1738,6	1739,2	1244,3	494,9	3,513						76	1874,9		1,062			150	15,0																
15	6,40	5,26	5,00	1743,8	1744,3	1250,0	494,3	3,528	3,524	3,572	1,35	18,95	92,89	74	1825,5	1809,1	0,988	1,037	1876,0	142	14,2	14,90															

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2. Interpretación de los resultados y representación gráfica

4.2.2.1. Curva estabilidad

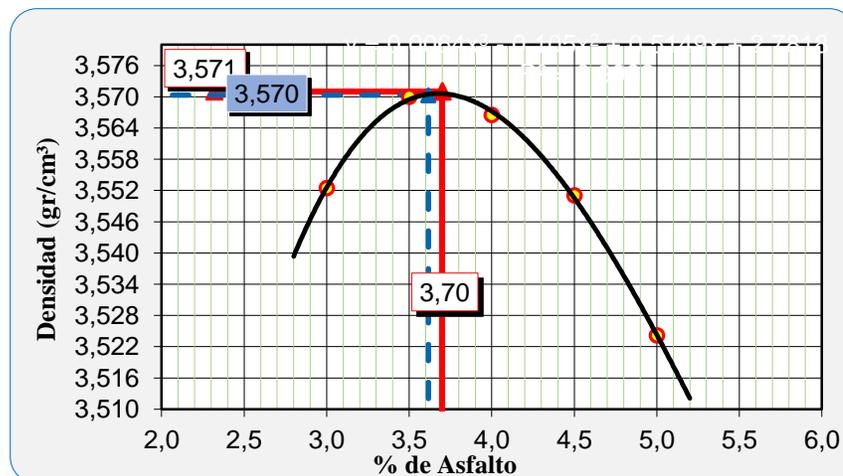
Figura 46. Estabilidad vs % de asfalto – mezcla asfáltica con agregados ácidos.



Fuente: Elaboración propia.

4.2.2.2. Curva densidad

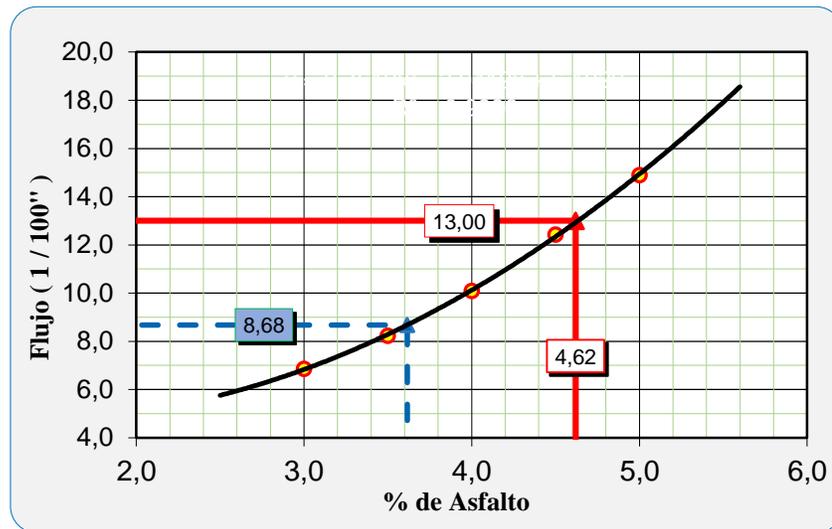
Figura 47. Densidad vs % de asfalto – mezcla asfáltica con agregados ácidos.



Fuente: Elaboración propia.

4.2.2.3. Curva de flujo

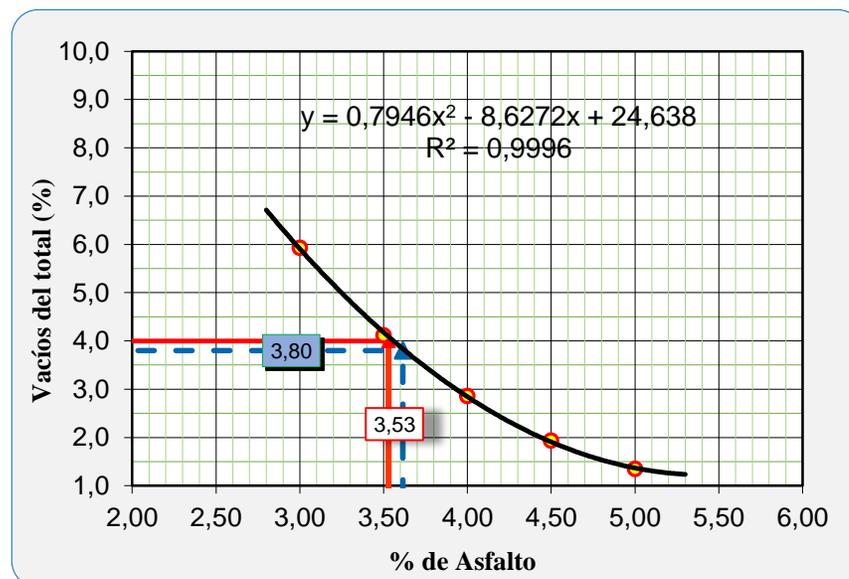
Figura 48. Fluencia vs % de asfalto – mezcla asfáltica con agregados ácidos.



Fuente: Elaboración propia.

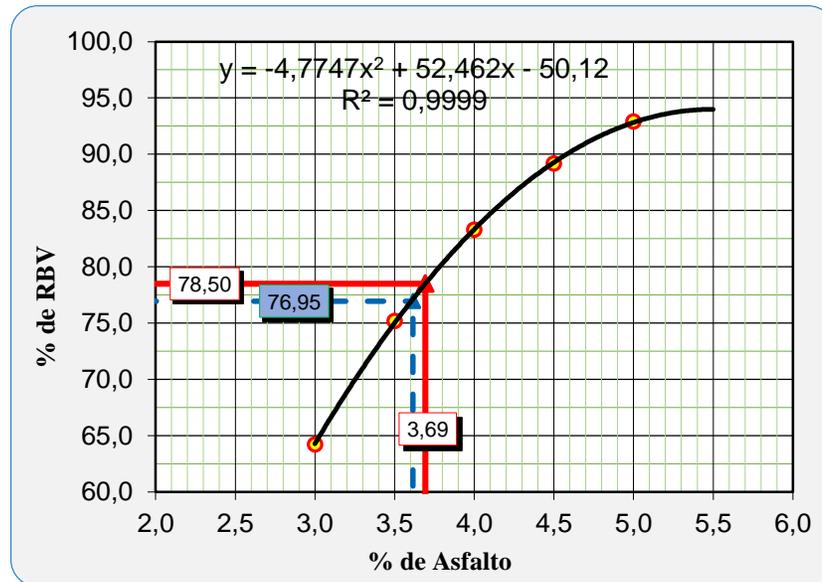
4.2.2.4. Curva de vacíos

Figura 49. % de vacíos en la mezcla vs % de asfalto – mezcla asfáltica con agregados ácidos.



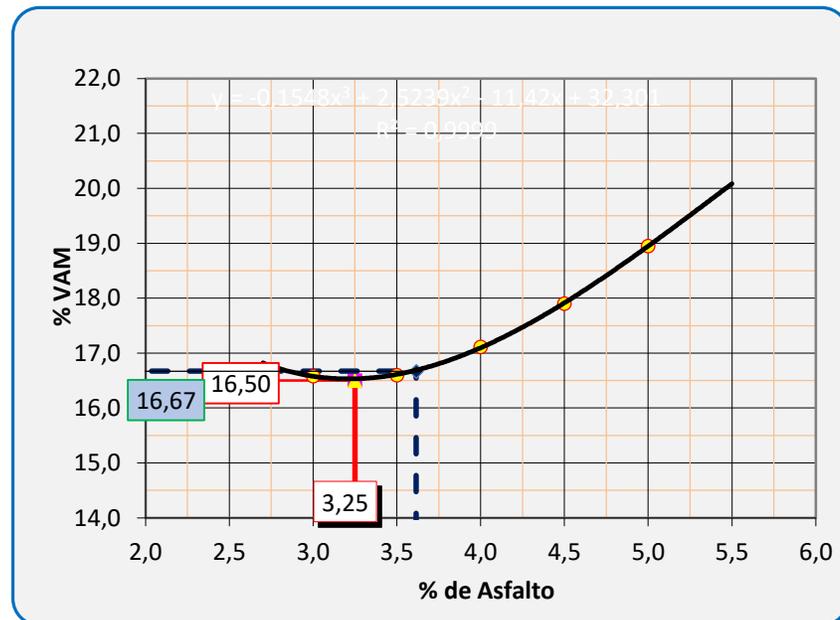
Fuente: Elaboración propia.

Figura 50. % de RBV vs % de asfalto – mezcla asfáltica con agregados ácidos.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 51. % de vacíos en el agregado mineral vs % de asfalto – mezcla asfáltica con agregados ácidos.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 43. Porcentaje de asfalto tentativos de la mezcla asfáltica con agregados ácidos, obtenidos de las curvas Marshall.

Valores				
Características	% De asfalto	Obtenidos de gráficos	Especificaciones técnicas	
Densidad	3,70	3,571	-	-
% Vacíos	3,53	4,0	3	5
% R.B.V.	3,69	78,5	75	82
% V.A.M	-	16,5	12	-
Estabilidad (Lb)	3,54	3020	> 1500 Lb. (75 Golpes)	
Fluencia 1/100"		13,0	8	18
Promedio (%)	3,62	Determinación del contenido óptimo de asfalto promedio de las gráficas (Densidad, Vv, RBV y estabilidad)		

Fuente: Elaboración propia.

4.2.3. Determinación del contenido óptimo de asfalto

Una vez determinado el porcentaje de asfalto de cada curva de la metodología Marshall se deberá optar como criterio aquellos valores que cumplan las especificaciones dadas en el punto 2.3.4.1. de la investigación (Tabla 13 – Figura 6).

Tabla 44. Porcentaje óptimo de asfalto de la mezcla asfáltica con agregados ácidos.

Valores obtenidos diseño Marshall				
Características	% De asfalto	Valores con él % óptimo	Especificaciones técnicas	
Densidad	3,62	3,570	-	-
% Vacíos	3,62	3,80	3	5
% R.B.V.	3,62	76,95	75	82
% V.A.M	3,62	16,67	12	-
Estabilidad (Lb)	3,62	3010	> 1500 Lb. (75 Golpes)	
Fluencia 1/100"	3,62	8,68	8	18
% Óptimo de asfalto propuesto			3,62	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 45. Porcentajes de materiales para el diseño de la mezcla asfáltica con agregados ácidos.

Observaciones:		
Mezcla bituminosa total	Grava 3/4"	48,19 %
	Arena chancada	48,19 %
	% Asf. óptimo	3,62 %
	Total	100,0%

Fuente: Elaboración propia.

Una vez determinado el contenido óptimo de cemento asfáltico se procede a realizar briquetas con la metodología Marshall especificada anteriormente para el tratamiento estadístico.

4.2.4. Diseño de briquetas con el contenido óptimo de cemento asfáltico

Tabla 46. Diseño de briquetas con el contenido óptimo de asfalto de la mezcla asfáltica con agregados ácidos.

Pesos Específicos (AASHTO T-100 , T-85)		% de Agregados		Cemento Asfáltico AASHTO M 20		Peso Específico Total AASHTO T-228		No.de Golpes/Capa												
Mat. Retenido Tamiz N° 4	4,099	45,8		85-100		1,001		75												
Mat. Pasa Tamiz N° 4	4,158	54,2																		
Peso Especifico Total	4,131	100																		
Peso Especifico Bulk de Mezclas Bituminosas Compactadas (AASHTO T-166)						Peso Esp. Max. de Mezclas Compact. (AASHTO T-209)				Estabilidad Marshall				Flujo						
N° Probeta	Altura de Probeta	% Asfalto		Peso Probeta			Vol.	Densidad Probeta		% de Vacios			LEC. DIAL.	Carga	Factor corrección	Carga Real Corregida	Carga Promedio	Lectura Dial	En 1/100 pulgadas	
		Base mezcla	Base Agregado	Seco	Sat. Sup. Seca	Sumergida en Agua	Probeta	Densidad Real	Densidad Promedio	Densidad Máxima Teórica	% de Vacios Mezcla Total	V.A.M. (Vacios Agregados Mineral)								R.B.V. (Relación Betumen Vacios)
		%	%	grs.	grs.	grs.	CC	Grs./cm³	Grs./cm³	Grs./cm³	%	%	%	Kg	Libras		Libras	Libras	Ptg	
1	6,02	3,62	3,8	1710,2	1711,1	1231,7	479,4	3,567	3,567	3,71	3,88	16,76	76,88	113	2787,7	1,096	3055,3	3055	88	8,8
2	6,32	3,62	3,8	1708,9	1709,3	1230,3	479,0	3,568	3,568	3,71	3,87	16,76	76,91	122	3009,7	1,008	3033,8	3034	84	8,4
3	6,25	3,62	3,8	1703,7	1704,6	1227,5	477,1	3,571	3,571	3,71	3,78	16,68	77,34	120	2960,3	1,027	3040,3	3040	86	8,6
4	5,99	3,62	3,8	1708,2	1708,9	1230,5	478,4	3,571	3,571	3,71	3,79	16,69	77,30	111	2738,3	1,106	3028,6	3029	89	8,9
5	6,37	3,62	3,8	1709,2	1710,7	1231,5	479,2	3,567	3,567	3,71	3,89	16,78	76,80	123	3034,3	0,995	3019,2	3019	83	8,3
6	6,15	3,62	3,8	1711,2	1712,0	1232,2	479,8	3,566	3,566	3,71	3,90	16,78	76,76	116	2861,7	1,056	3021,9	3022	89	8,9
7	6,05	3,62	3,8	1709,9	1710,4	1231,4	479,0	3,570	3,570	3,71	3,81	16,71	77,18	114	2812,3	1,087	3057,0	3057	88	8,8
8	6,14	3,62	3,8	1707,5	1708,2	1230,1	478,1	3,571	3,571	3,71	3,77	16,67	77,40	116	2861,7	1,059	3030,5	3030	88	8,8
9	6,85	3,62	3,8	1708,7	1709,2	1230,6	478,6	3,570	3,570	3,71	3,80	16,70	77,24	140	3453,7	0,886	3061,0	3061	78	7,8
10	5,85	3,62	3,8	1710,3	1711,0	1231,8	479,2	3,569	3,569	3,71	3,83	16,72	77,10	107	2639,6	1,149	3032,9	3033	90	9,0
11	6,47	3,62	3,8	1712,6	1712,9	1233,1	479,8	3,569	3,569	3,71	3,82	16,71	77,14	126	3108,4	0,970	3015,1	3015	86	8,6
12	6,58	3,62	3,8	1708,4	1709,2	1230,9	478,3	3,572	3,572	3,71	3,76	16,66	77,45	130	3207,0	0,947	3036,7	3037	82	8,2
13	6,42	3,62	3,8	1709,2	1710,6	1231,8	478,8	3,570	3,570	3,71	3,81	16,71	77,18	125	3083,7	0,983	3029,7	3030	84	8,4
14	6,08	3,62	3,8	1709,0	1709,8	1230,9	478,9	3,569	3,569	3,71	3,84	16,73	77,03	114	2812,3	1,078	3031,7	3032	88	8,8
15	6,06	3,62	3,8	1711,2	1711,7	1232,2	479,5	3,569	3,569	3,71	3,84	16,73	77,05	113	2787,7	1,084	3021,8	3022	87	8,7
OBSERVACIÓN:																				
Especificación		Mínimo				3		12		75						1500		8		
		Máximo				5		82										18		

N° Probeta	Altura de Probeta	% Asfalto		Peso Probeta			Vol.	Densidad Probeta			% de Vacíos			Estabilidad Marshall					Flujo	
		Base mezcla	Base Agregado	Seco	Sat. Sup. Seca	Sumergida en Agua	Probeta	Densidad Real	Densidad Promedio	Densidad Máxima Teórica	% de Vacíos Mezcla Total	V.A.M. (Vacíos Agregados Mineral)	R.L.V. (Relación Betumen Vacíos)	LEC. DIAL	Carga	Factor corrección	Carga Real Corregida	Carga Promedio	Lectura Dial	En 1/100 pulgadas
		%	%	grs.	grs.	grs.	CC	Grs./cm ³	Grs./cm ³	Grs./cm ³	%	%	%	Kg	Libras		Libras	Libras	Pig	
16	6,43	3,62	3,8	1710,1	1710,8	1231,6	479,2	3,569	3,569	3,71	3,84	16,73	77,04	125	3083,7	0,980	3022,0	3022	84	8,4
17	6,34	3,62	3,8	1711,3	1712,5	1232,8	479,7	3,567	3,567	3,71	3,87	16,76	76,88	122	3009,7	1,003	3018,7	3019	85	8,5
18	6,29	3,62	3,8	1709,6	1710,5	1231,5	479,0	3,569	3,569	3,71	3,83	16,72	77,10	120	2960,3	1,016	3007,7	3008	87	8,7
19	6,33	3,62	3,8	1712,5	1713,1	1233,4	479,7	3,570	3,570	3,71	3,81	16,70	77,21	122	3009,7	1,005	3024,7	3025	86	8,6
20	6,34	3,62	3,8	1709,3	1710,0	1231,5	478,5	3,572	3,572	3,71	3,75	16,65	77,50	122	3009,7	1,003	3018,7	3019	86	8,6
21	6,09	3,62	3,8	1710,2	1711,1	1232,1	479,0	3,570	3,570	3,71	3,80	16,69	77,26	114	2812,3	1,074	3020,4	3020	88	8,8
22	6,09	3,62	3,8	1710,8	1711,3	1231,6	479,7	3,566	3,566	3,71	3,90	16,78	76,75	114	2812,3	1,074	3020,4	3020	89	8,9
23	6,21	3,62	3,8	1709,7	1710,4	1231,5	478,9	3,570	3,570	3,71	3,80	16,70	77,22	118	2911,0	1,037	3018,7	3019	86	8,6
24	6,45	3,62	3,8	1708,9	1709,6	1230,7	478,9	3,568	3,568	3,71	3,85	16,74	77,01	127	3133,0	0,975	3054,7	3055	83	8,3
25	6,36	3,62	3,8	1710,6	1711,4	1231,8	479,6	3,567	3,567	3,71	3,89	16,78	76,79	123	3034,3	0,998	3026,8	3027	86	8,6
26	6,11	3,62	3,8	1709,6	1710,3	1231,7	478,6	3,572	3,572	3,71	3,75	16,65	77,49	114	2812,3	1,068	3003,6	3004	87	8,7
27	6,08	3,62	3,8	1709,8	1710,6	1231,6	479,0	3,570	3,570	3,71	3,82	16,71	77,15	113	2787,7	1,078	3005,1	3005	88	8,8
28	6,22	3,62	3,8	1710,4	1711,0	1231,9	479,1	3,570	3,570	3,71	3,80	16,70	77,22	118	2911,0	1,035	3012,9	3013	87	8,7
29	6,32	3,62	3,8	1710,0	1710,9	1231,7	479,2	3,568	3,568	3,71	3,85	16,74	77,01	121	2985,0	1,008	3008,9	3009	86	8,6
30	6,35	3,62	3,8	1711,6	1712,7	1233,0	479,7	3,568	3,568	3,71	3,86	16,75	76,97	123	3034,3	1,000	3034,3	3034	85	8,5
OBSERVACIÓN:																				
Especificación		Mínimo									3	12	75				1500		8	
		Máximo									5			82						18

Fuente: Elaboración propia.

4.2.5. Ensayo de Desprendimiento por fricción (N-CMT-4-04, materiales pétreos para mezclas asfálticas)

Una vez determinado el contenido óptimo de la mezcla asfáltica con agregados ácidos, se realiza el mismo procedimiento desarrollado en el punto 4.1.8.

Figura 52. Ensayo de desprendimiento por fricción en mezclas asfálticas con agregados ácidos.



Fuente: Elaboración propia.

Los criterios de adherencia que adopta este método son:

< 10% adherencia normal.

10% - 25% regular adherencia.

> 25% baja adherencia.

Tabla 47. Desprendimiento por fricción y evaluación de la adherencia de la mezcla asfáltica con agregados ácidos.

Mezcla asfáltica con agregados ácidos – Cerro rico de Potosí				
Contenido óptimo de asfalto más 0,5 % de la masa del material pétreo				
Peso agregado pétreo= 1688,8 gr.			Peso asfalto= 69,7 gr.	
N°	∑Pfr (%)	N	PFR (%)	Adherencia
1	202	52	3,88	Normal
2	195	46	4,24	Normal
3	166	43	3,86	Normal
4	189	47	4,02	Normal
5	162	39	4,15	Normal
6	174	45	3,87	Normal
7	193	51	3,78	Normal
8	172	48	3,58	Normal
9	157	38	4,13	Normal
10	152	40	3,80	Normal
Contenido óptimo de asfalto 3,62%				
Peso agregado pétreo= 1688,8 gr.			Peso asfalto= 61,3 gr.	
N°	∑Pfr (%)	N	PFR (%)	Adherencia
1	576	59	9,8	Normal
2	632	61	10,4	Regular
3	625	63	9,9	Normal
4	644	54	11,9	Regular
5	692	68	10,2	Regular
6	586	62	9,5	Normal
7	581	59	9,8	Normal
8	490	51	9,6	Normal
9	587	60	9,8	Normal
10	512	52	9,8	Normal
Contenido óptimo de asfalto menos 0,5 % de la masa del material pétreo				
Peso agregado pétreo= 1688,8 gr.			Peso asfalto= 52,8 gr.	
N°	∑Pfr (%)	N	PFR (%)	Adherencia
1	792	61	13,0	Regular
2	756	59	12,8	Regular
3	695	52	13,4	Regular
4	703	53	13,3	Regular
5	766	58	13,2	Regular
6	802	62	12,9	Regular
7	826	60	13,8	Regular
8	724	54	13,4	Regular
9	748	55	13,6	Regular
10	685	50	13,7	Regular

Fuente: Elaboración propia.

4.2.6. Cubrimiento de los agregados ácidos con materiales asfálticos en presencia del agua (Stripping) AASHTO T-182 – 84 (2002) / NLT 166 -92 / I.N.V. E – 737 – 07

Se realiza el mismo procedimiento descrito en el punto 4.1.9. Este ensayo debe ser considerado como un ensayo subjetivo de tipo apreciativo de "apto - no apto", en relación con este nivel del 95% de adherencia, ya que la precisión a niveles más bajos no es satisfactoria.

Tabla 48. Adherencia en inmersión estática y evaluación de la adherencia de la mezcla asfáltica con agregados ácidos método AASHTO T-182.

Mezcla asfáltica con agregados ácidos – Cerro rico de Potosí			
N°	Adherencia evaluada en laboratorio	Mínimo establecido por norma	Observación
1	92%	95,0%	No apto
2	97%	95,0%	Apto
3	90%	95,0%	No apto
4	95%	95,0%	Apto
5	97%	95,0%	Apto
6	97%	95,0%	Apto
7	95%	95,0%	Apto
8	96%	95,0%	Apto
9	96%	95,0%	Apto
10	97%	95,0%	Apto
11	94%	95,0%	No apto
12	95%	95,0%	Apto
13	96%	95,0%	Apto
14	94%	95,0%	No apto
15	96%	95,0%	Apto

Fuente: Elaboración propia.

4.2.7. Resumen de los resultados obtenidos y tratamiento estadístico básico en el programa Statgraphics.¹³

Tabla 49. Resumen de los resultados del diseño de mezcla asfáltica con agregados ácidos.

Mezcla asfáltica con agregados ácidos – Cerro Rico de Potosí						Desprendimiento por fricción (%) norma N-CMT-4-04			Adherencia inmersión estática (%) AASHTO T-182
Densidad (gr/cm ³)	Estabilidad (Lb)	Flujo (1/100")	% vacíos	% VAM	% RBV	+0,5% asfalto	% optimo	-0,5% asfalto	
-	1500 Lb	8-18	3-5	12	75-82	< 10% adherencia normal			< 95% de adherencia=Material no apto
3,570	3010	8,68	3,80	16,67	76,95	10% - 25% regular adherencia			> 95% de adherencia=Material apto
						> 25% baja adherencia			
3,564	3055	8,8	3,88	16,76	76,88	3,88	9,8	13	92,00
3,565	3034	8,4	3,87	16,76	76,91	4,24	10,4	12,8	97,00
3,576	3040	8,6	3,78	16,68	77,34	3,86	9,9	13,4	90,00
3,582	3029	8,9	3,79	16,69	77,30	4,02	11,9	13,3	95,00
3,567	3019	8,3	3,89	16,78	76,80	4,15	10,2	13,2	97,00
3,564	3022	8,9	3,90	16,78	76,76	3,87	9,5	12,9	97,00
3,570	3057	8,8	3,81	16,71	77,18	3,78	9,8	13,8	95,00
3,571	3030	8,8	3,77	16,67	77,40	3,58	9,6	13,4	96,00
3,561	3061	7,8	3,80	16,70	77,24	4,13	9,8	13,6	96,00
3,569	3033	9,0	3,83	16,72	77,10	3,8	9,8	13,7	97,00
3,562	3015	8,6	3,82	16,71	77,14	-	-	-	94,00

¹³ Para ver el procedimiento del tratamiento estadístico en el programa STATGRAPHICS ir a ANEXO E y G.

3,572	3037	8,2	3,76	16,66	77,45	-	-	-	95,00	
3,570	3030	8,4	3,81	16,71	77,18	-	-	-	96,00	
3,563	3032	8,8	3,84	16,73	77,03	-	-	-	94,00	
3,563	3022	8,7	3,84	16,73	77,05	-	-	-	96,00	
3,569	3022	8,4	3,84	16,73	77,04	-	-	-	-	
3,567	3019	8,5	3,87	16,76	76,88	-	-	-	-	
3,565	3008	8,7	3,83	16,72	77,10	-	-	-	-	
3,560	3025	8,6	3,81	16,70	77,21	-	-	-	-	
3,572	3019	8,6	3,75	16,65	77,50	-	-	-	-	
3,570	3020	8,8	3,80	16,69	77,26	-	-	-	-	
3,566	3020	8,9	3,90	16,78	76,75	-	-	-	-	
3,570	3019	8,6	3,80	16,70	77,22	-	-	-	-	
3,568	3055	8,3	3,85	16,74	77,01	-	-	-	-	
3,567	3027	8,6	3,89	16,78	76,79	-	-	-	-	
3,572	3004	8,7	3,75	16,65	77,49	-	-	-	-	
3,570	3005	8,8	3,82	16,71	77,15	-	-	-	-	
3,570	3013	8,7	3,80	16,70	77,22	-	-	-	-	
3,560	3009	8,6	3,85	16,74	77,01	-	-	-	-	
3,566	3034	8,5	3,86	16,75	76,97	-	-	-	-	
Recuento	30	30	30	30	30	30	10	10	10	15
Promedio	3,5677	3027,17	8,61	3,827	16,7197	77,112	3,931	10,07	13,31	95,1333
Mediana	3,5675	3023,5	8,6	3,825	16,715	77,12	3,875	9,8	13,35	96
Moda	3,57	3019	8,6	3,8	-	-	-	9,8	13,4	-

Media geométrica	3,5677	3027,13	8,60638	3,82676	16,7196	77,1117	3,92634	10,0501	13,3061	95,1134
Varianza	2,29069E-05	225,661	0,063	0,00189069	0,0014654	0,045589	0,04061	0,482333	0,114333	3,98095
Desviación estándar	0,00478611	15,022	0,250998	0,0434821	0,0382806	0,213516	0,201519	0,694502	0,338132	1,99523
Coefficiente de variación	0,13%	0,50%	2,92%	1,14%	0,23%	0,28%	5,13%	6,90%	2,54%	2,10%
Error estándar	0,000873821	2,74263	0,0458258	0,0079387	0,00698904	0,0389825	0,063726	0,219621	0,106927	0,515167
Mínimo	3,56	3004	7,8	3,75	16,65	76,75	3,58	9,5	12,8	90
Máximo	3,582	3061	9	3,9	16,78	77,5	4,24	11,9	13,8	97
Rango	0,022	57	1,2	0,15	0,13	0,75	0,66	2,4	1	7
Dispersión (D)	0,022	57,48	1,2	0,16	0,14	0,75	0,66	2,4	1	7
Valor de dispersión (T)	0,006	0,02	0,14	0,04	0,01	0,01	0,17	0,24	0,08	0,07
Error absoluto total	0,008	14,81	0,25	0,04	0,04	0,21	0,19	0,66	0,32	1,93
Error relativo %	0,231	0,49	2,87	1,14	0,23	0,27	4,88	6,57	2,41	2,03

Fuente: Elaboración propia.

4.2.8. Análisis de la hipótesis y ajuste de datos por variable¹⁴

Tabla 50. Resumen de los resultados del tratamiento estadístico inferencial del diseño de mezcla asfáltica con agregados ácidos.

Mezcla asfáltica con agregados ácidos – Cerro rico de Potosí						
Variable analizada	Numero de datos analizados	Chi-Cuadrado calculado χ_c^2	Valor tabular del Chi-Cuadrado χ_t^2 $\alpha = 0,05 = 95\%$ de probabilidad	Hipótesis	Ajuste de datos	Análisis de datos
Estabilidad (Lb)	30	10,92	21	Ho: Hipótesis nula	Bueno	Datos homogéneos, se acepta la hipótesis
Fluencia (1/100")	30	4,5	21	Ho: Hipótesis nula	Bueno	Datos homogéneos, se acepta la hipótesis
% De vacíos	30	12,92	21	Ho: Hipótesis nula	Bueno	Datos homogéneos, se acepta la hipótesis
% De VAM	30	15,92	21	Ho: Hipótesis nula	Bueno	Datos homogéneos, se acepta la hipótesis
% De RBV	30	12	21	Ho: Hipótesis nula	Bueno	Datos homogéneos, se acepta la hipótesis
Desprendimiento por fricción – Norma N-CMT-4-04						
+0,5% Asfalto	10	1,33	5,99	Ho: Hipótesis nula	Bueno	Datos homogéneos, se acepta la hipótesis
% Óptimo	10	8,67	5,99	Ha: Hipótesis alternativa	Malo	Datos no homogéneos, se rechaza la hipótesis
-0,5% Asfalto	10	0	5,99	Ho: Hipótesis nula	Bueno	Datos homogéneos, se acepta la hipótesis
Adherencia en inmersión estática - Norma AASHTO T-182						
Adherencia	15	6,42	11,1	Ho: Hipótesis nula	Bueno	Datos homogéneos, se acepta la hipótesis

Fuente: Elaboración propia.

¹⁴ Para ver el procedimiento del tratamiento estadístico inferencial con los parámetros de la prueba de Chi-cuadrado (χ^2) ir a ANEXO E.

4.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

4.3.1. Tratamiento de datos y determinación de errores

Con el fin de alcanzar cierta validez estadística en los resultados de las medidas, es muy conveniente repetir varias veces la determinación del valor de la magnitud problema. Los resultados de las medidas individuales pueden presentarse poco o muy dispersas y, en función de esta dispersión será conveniente aumentar o no el número de mediciones de la magnitud, dependiendo del tipo de variable analizada se calcularon los errores absolutos y relativos de cada uno de ellos, el promedio del error relativo hallado de cada una de las mediciones no deberá ser mayor al 5%, puesto que al comenzar la investigación se tomó un valor de probabilidad del 95% de confiabilidad para la determinación de los ensayos y variables a seguir. En la mezcla asfáltica elaborada con agregados alcalinos del fenómeno de Stripping, precisamente del ensayo de desprendimiento por fricción +0,5% de asfalto norma N-CMT-4-04 se obtuvo un error relativo de 11,67% y en el mismo procedimiento con el contenido óptimo de asfalto se obtuvo un error relativo de 12,76% en los valores de medición visual presentándose los denominados errores sistemáticos siendo estos constantes a lo largo de todo el proceso de medida y, por tanto, afecta a todas las medidas de un modo definido y es el mismo para todas ellas. Estos errores tienen siempre un signo determinado y las causas probables pueden ser:

- Errores instrumentales (de aparatos); por ejemplo, el error de calibrado de los instrumentos.
- Error personal: Este es, en general, difícil de determinar y es debido a las limitaciones de carácter personal. Como, por ejemplo, los errores de paralaje, o los problemas de tipo visual.
- Errores de método de medida, que corresponden a una elección inadecuada del método de medida; lo que incluye tres posibilidades distintas: la inadecuación del aparato de medida, del observador o del método de medida propiamente dicho.

La mezcla asfáltica con agregados ácidos solo presento una variable con un error superior al 5%, presentándose en la misma variable del ensayo de desprendimiento por fricción utilizando el contenido óptimo de asfalto, dicho error relativo fue de 6,57%. Estos errores tienen un punto en común el error personal ya que el ensayo determina mediciones visuales por parte del operador. Las variables con menor porcentaje de error fueron sujetas a mediciones con equipos calibrados lo que llevo a que estos errores sean menores del máximo establecido. El error general establecido de toda la investigación fue de 2,77%, determinado después del análisis de errores de cada variable medida y/o calculada, lo que indica que los resultados del trabajo se encuentran alrededor del 97,23% de confiabilidad siendo mayor a la confiabilidad tomada al inicio de la investigación.

4.3.2. Estadística descriptiva e inferencial

En los puntos 4.1.9. – 4.1.10 – 4.2.6. – 4.2.7. se mostraron los resultados obtenidos del diseño de mezcla asfáltica variando el tipo de agregado pétreo, se realizó la estadística descriptiva a través del programa Statgraphics y la estadística inferencial del ajuste de datos mediante la prueba de Chi-cuadrado para establecer parámetros de comportamientos, medidas de dispersión, moda, varianza y otro.

El ajuste de datos que presentaron las variables de la mezcla asfáltica con agregados alcalinos presentaron en su mayoría datos homogéneos con ajuste de datos bueno, es decir, los resultados de las variables se ajustaron a la distribución normal con un nivel de significación del 95% de probabilidad.

Las variables como fluencia (1/100”), porcentaje de vacíos, porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VAM), relación del porcentaje Bitumen-vacíos (RBV), obtuvieron un ajuste de datos malo en comparación con la distribución normal, siendo estos datos no homogéneos, es decir, existieron en estos saltos de frecuencias, discrepancias entre estas frecuencias tomando el estadístico valores grandes y, en consecuencia, se rechazaron la hipótesis nula (concordancia entre frecuencias, frecuencia observada = frecuencia esperada) de estas variables. Este ajuste de datos malos es producto de la

mala lecturación que se realizó al momento del pesado de las briquetas, lo cual ocasiono que se obtengan densidades dispersas por ende porcentajes de vacíos dispersos, y la mala lecturación directa que se realizó del flujo de cada briketa elaborada; si bien cumplen con la norma establecida, se alejan de los valores óptimos calculados mediante el método Marshall.

Por lo contrario, el ajuste de datos que presentaron las variables de la mezcla asfáltica con agregados ácidos presentaron casi en su totalidad datos homogéneos con ajuste de datos bueno cumpliendo la hipótesis nula establecida por el método. La única variable que no cumplió con la distribución normal fue del ensayo de desprendimiento por fricción utilizando el porcentaje óptimo de asfalto en la mezcla, debido a la mala apreciación de los porcentajes de desprendimiento de cada agregado-asfalto.

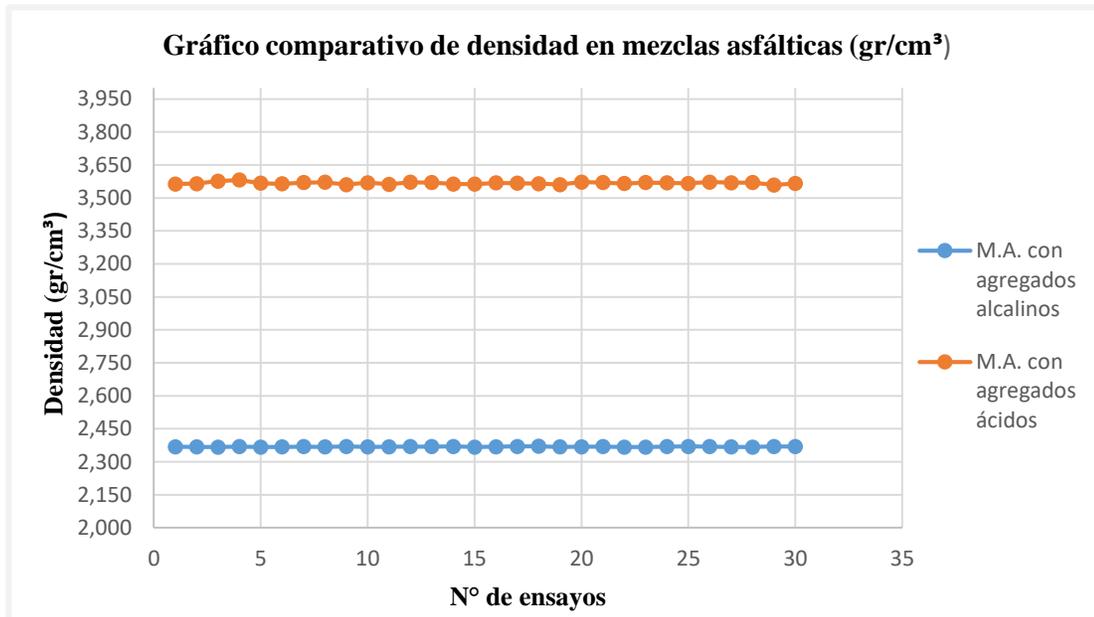
4.4. COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON AGREGADOS ALCALINOS Y ÁCIDOS

En los puntos 4.1. y 4.2. se desarrolló el procedimiento para determinar las propiedades que presenta cada mezcla con distinto agregado, a continuación, se mostrara a través de gráficas de comparación los resultados obtenidos en los dos tipos de mezclas asfálticas diseñadas.

4.4.1. Densidad

La densidad es una característica muy importante debido a que es esencial tener una alta densidad en el pavimento terminado para obtener un rendimiento duradero en el mismo, pero no siempre significa que tener una alta densidad garantice que el pavimento logre soportar todas las cargas del tráfico y las acciones del intemperismo. La densidad obtenida en el laboratorio se convierte la densidad patrón, y es usada como referencia para determinar si la densidad del pavimento terminado es, o no, adecuada.

Figura 53. Comparación de la densidad en mezclas asfálticas con agregados alcalinos y ácidos.



Fuente: Elaboración propia.

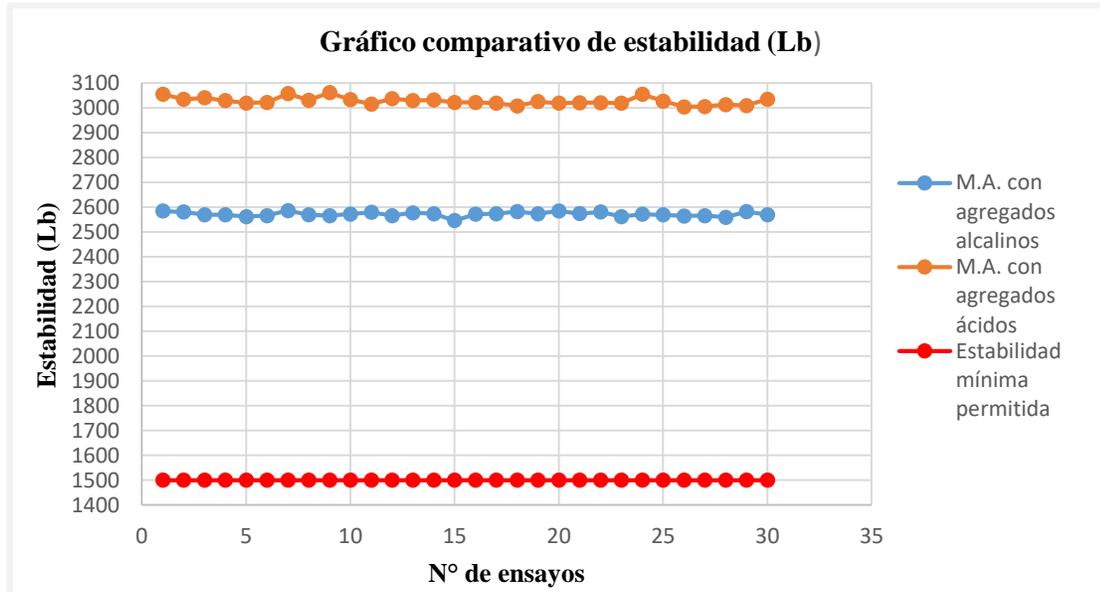
- La densidad de la mezcla asfáltica con agregados alcalinos es menor a la densidad que posee la mezcla con agregados ácidos, esto puede explicarse debido a que los agregados ácidos de la ciudad de Potosí son minerales clasificados como no ferromagnesianos que su singular característica de este material es poseer una densidad mayor a 3,0 gr/cm³, al compactarlas como mezcla asfáltica esta densidad aumenta disminuyendo así los espacios vacíos en la misma, pero esto no garantiza que la capa de rodadura puesta con esta mezcla asfáltica ofrezca durabilidad al paquete estructural debido a que los agregados ácidos tienen un valor alto de “Desgaste de los ángulos” cumpliendo al límite en la gradación C según las especificaciones técnicas utilizadas.

4.4.2. Estabilidad

La estabilidad de un asfalto es definida como la capacidad de resistir desplazamientos y deformación bajo las cargas del tránsito. Un pavimento estable es capaz de mantener su forma y lisura bajo cargas repetidas, un pavimento inestable desarrolla

ahuellamientos (canales), ondulaciones (corrugación) y otras señas que indican cambios en la mezcla.

Figura 54. Comparación de la estabilidad en mezclas asfálticas con agregados alcalinos y ácidos.



Fuente: Elaboración propia.

Los requisitos de estabilidad sólo pueden establecerse después de un análisis completo del tránsito, debido a que las especificaciones de estabilidad para un pavimento dependen del tránsito esperado. Las especificaciones de estabilidad deben ser lo suficiente altas para acomodar adecuadamente el tránsito esperado, pero no más altas de lo que exijan las condiciones de tránsito.

- La estabilidad de las dos mezclas asfálticas diseñadas con distintos agregados está por encima de la estabilidad mínima permitida según las especificaciones indicadas en el Capítulo 2, pero existe una cierta diferencia notoria entre la estabilidad de una mezcla y la estabilidad de otra, la estabilidad indica la resistencia de una mezcla a la deformación, existe una tendencia a pensar en muchos proyectos que, si un valor de la estabilidad es bueno, entonces un valor más alto será mucho mejor. Pero los estudios muestran que mientras más alta

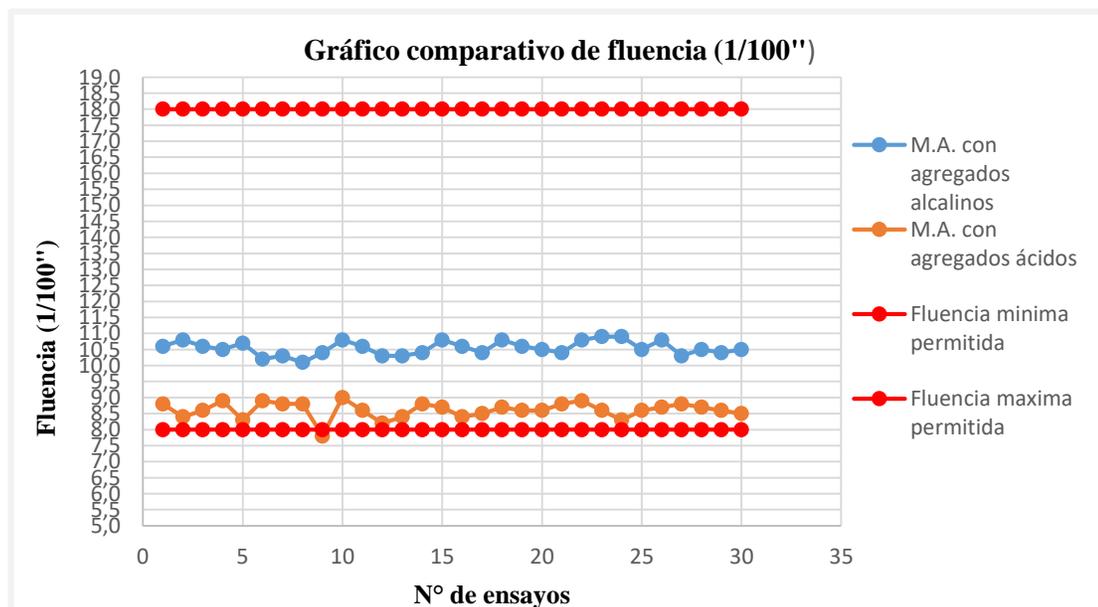
sea la estabilidad de una mezcla ésta se vuelve más rígida y menos durable que lo deseado

- La mezcla asfáltica con agregados alcalinos presenta una estabilidad promedio de 2571,43 Lb, mientras que la diseñada con agregados ácidos presenta una estabilidad promedio de 3027,17 Lb, lo que puede explicarse debido a la alta densidad que posee esta mezcla asfáltica a comparación de la otra, o en términos generales, entre más angular sea la forma de las partículas de agregados y más áspera su textura superficial, más alta será la estabilidad de la mezcla, esto se verifica con los resultados del ensayo de caras fracturadas, obteniendo el agregado ácido un porcentaje de 99%.¹⁵

4.4.3. Fluencia

La fluencia Marshall, medida en centésimas de pulgada representa la deformación de la briqueta. La deformación está indicada por la disminución en el diámetro vertical de la briqueta.

Figura 55. Comparación del flujo en mezclas asfálticas con agregados alcalinos y ácidos.



Fuente: Elaboración propia.

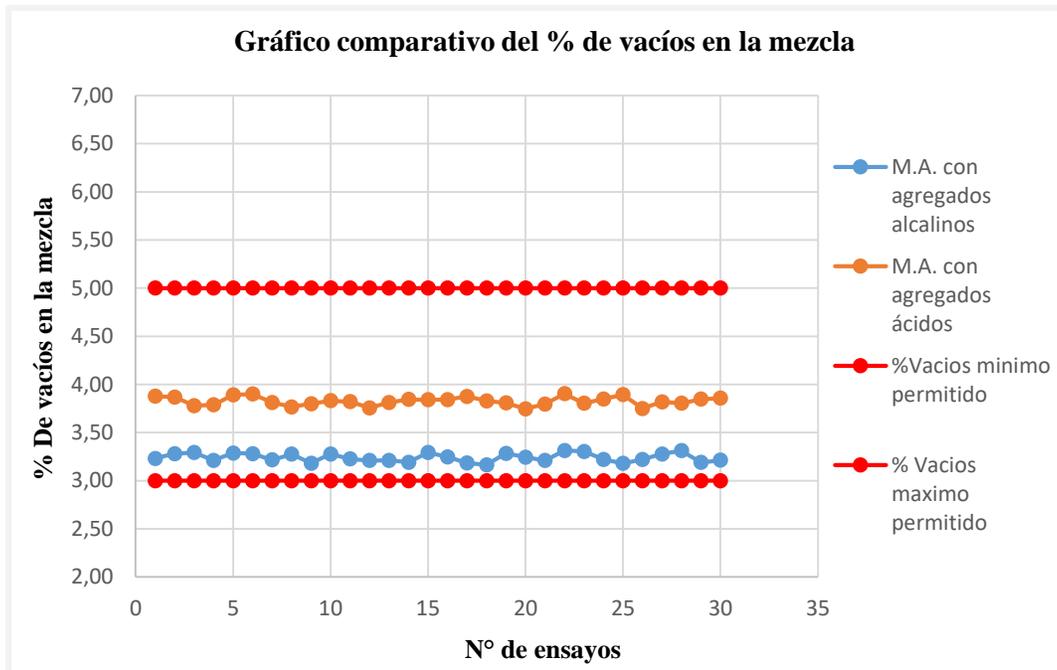
¹⁵ Para ver los resultados del ensayo de porcentaje de caras fracturas I.N.V. E-227-07 ir a ANEXO B.

- Los valores de fluencia que presenta la mezcla asfáltica con agregados alcalinos se encuentra dentro del rango permitido según las especificaciones descritas en el Capítulo 2.
- El flujo de la mezcla con agregados ácidos presenta un quiebre en el valor de flujo con 7,8 (1/100”) no cumpliendo con la fluencia mínima permitida según norma, esto puede explicarse a muchos factores como la mala lecturación por parte del operador, la mala calibración del medidor de fluencia u otro.
- Lo recomendado por estudios, cuando se presenta un intervalo de rango como el de flujo es que los valores se encuentren dentro del medio del rango establecido, en el caso del flujo promedio de las briquetas elaboradas con agregados alcalinos obtienen un valor de 10,54. El flujo de la mezcla con agregado ácidos presenta un valor de 8,61 (1/100”), es decir presenta valores bajos de flujo como consecuencia estos valores bajos de flujo Marshall son consideradas demasiado frágiles y rígidas para un pavimento en servicio. Por lo contrario, aquellos que tienen valores altos de fluencia son consideradas demasiado plásticas y tiene tendencia a deformarse bajo las cargas del tránsito.

4.4.4. Porcentaje de vacíos en la mezcla

Los vacíos son las pequeñas bolsas de aire que se encuentran entre las partículas de agregado revestidas de asfalto. Según estudios desarrollados es necesario que todas las mezclas densamente graduadas contengan cierto porcentaje de vacíos para permitir alguna compactación adicional bajo el tráfico al cual serán sometidos, y se pueda proporcionar espacios donde el asfalto pueda fluir durante su compactación adicional.

Figura 56. Comparación del porcentaje de vacíos de la mezcla asfáltica con agregados alcalinos y ácidos.



Fuente: Elaboración propia.

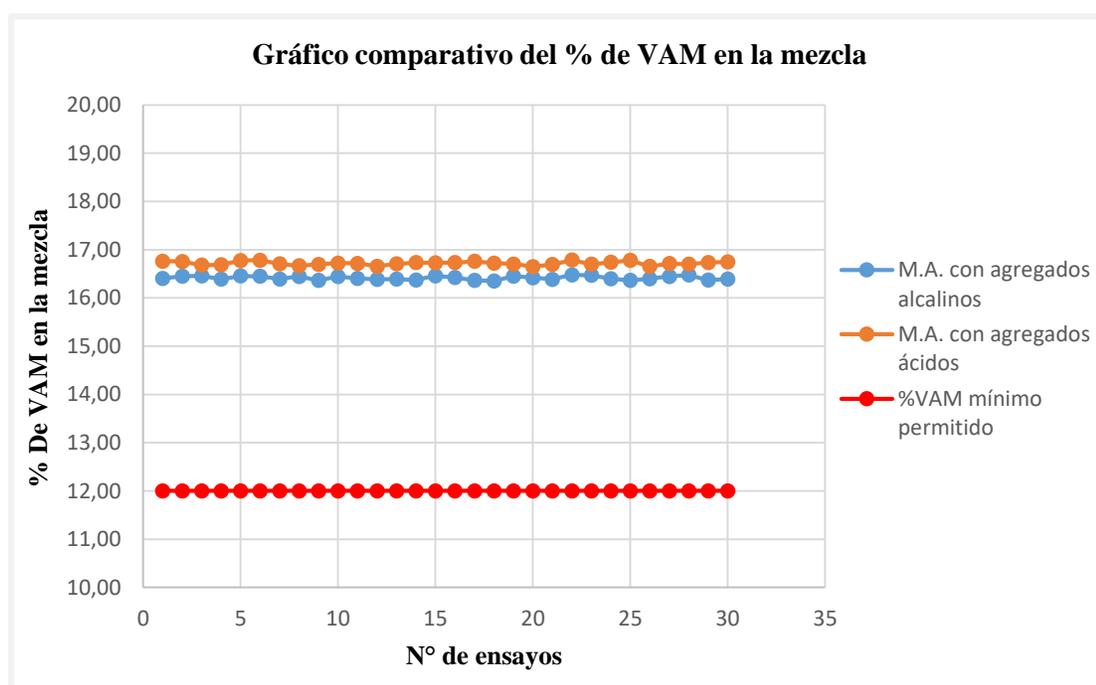
La durabilidad de un pavimento asfáltico es función del contenido de vacíos, la razón de esto es que entre menor sea la cantidad de vacíos, menor va a ser la permeabilidad de la mezcla. Un contenido demasiado alto de vacíos proporciona pasajes, a través de la mezcla, por los cuales puede entrar el agua y el aire, y causar deterioro. Por otro lado, un contenido demasiado bajo de vacíos puede producir exudación de asfalto; una condición en donde el exceso de asfalto es exprimido fuera de la mezcla hacia la superficie.

- Los valores de porcentaje de vacíos de ambas mezclas se encuentran dentro del rango de especificaciones máximas y mínimas permitidas (3% - 5%), existiendo un mayor contenido de vacíos en la mezcla asfáltica con agregados ácidos con un valor promedio de 3,8% y la mezcla asfáltica con agregados alcalinos con valor promedio de 3,24%, demostrando que la primera mezcla asfáltica mencionada presente 0,56% mayor de permeabilidad y más espacio para compactarse adicionalmente a comparación de la segunda mezcla.

4.4.5. Porcentaje de vacíos en el agregado mineral

Los vacíos en el agregado mineral (VAM) son los espacios de aire que existen entre las partículas de agregado en una mezcla compactada de pavimentación, incluyendo los espacios que están llenos de asfalto. El VAM representa el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto (todo el asfalto menos la porción que se pierde en el agregado) y el volumen de vacíos necesario en la mezcla. Cuando mayor sea el VAM más espacio habrá disponible para las películas de asfalto.

Figura 57. Comparación del porcentaje de vacíos en el agregado mineral VAM de la mezcla asfáltica con agregados alcalinos y ácidos.



Fuente: Elaboración propia.

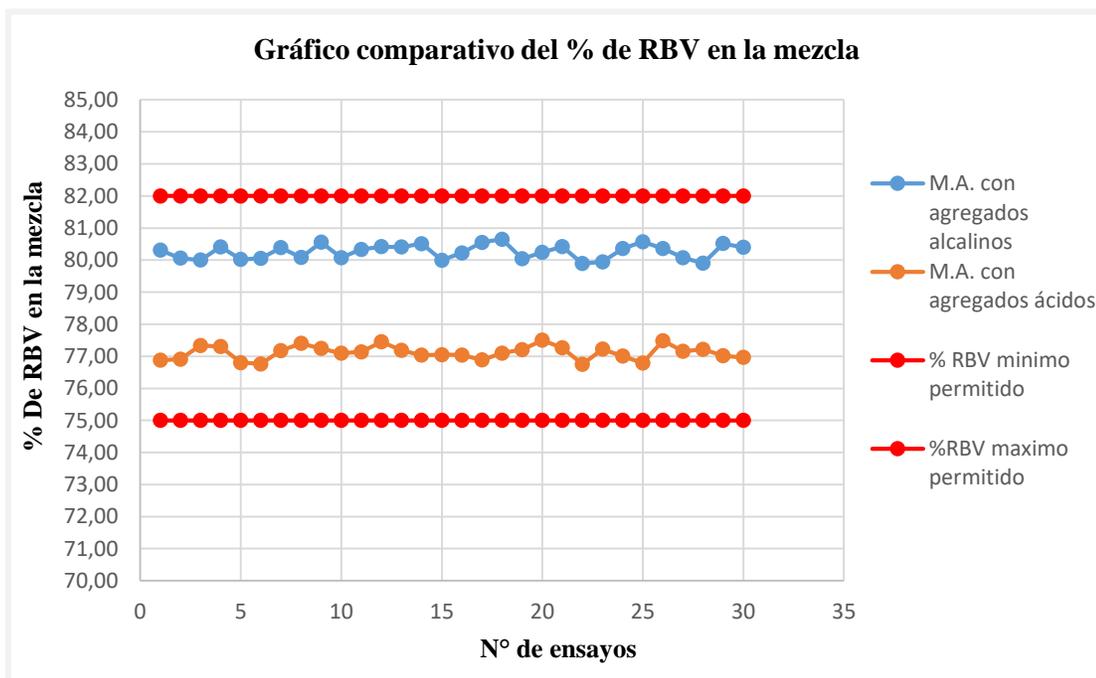
- El porcentaje de vacíos en el agregado mineral que poseen ambas mezclas se encuentran por encima del porcentaje mínimo establecido por norma en función de su tamaño máximo del agregado grueso y del porcentaje de vacíos en la mezcla. Estos valores se basan de que cuanto más gruesa sea la película de asfalto que cubre las partículas de agregado, más durables será la mezcla, es

decir mientras más bajo el porcentaje de vacíos menor la película de asfalto que cubre dichas partículas de agregado, en la figura 55 se muestra que la mezcla con agregados ácidos presenta mayor porcentaje de vacíos en el agregado mineral superando en un 0,3% de vacíos.

4.4.6. Relación bitumen vacíos RBV

El porcentaje de los vacíos en el agregado mineral que son llenados por el asfalto, RBV, no incluyendo el asfalto absorbido.

Figura 58. Comparación del porcentaje de relación bitumen - vacíos RBV de la mezcla asfáltica con agregados alcalinos y ácidos.



Fuente: Elaboración propia.

- El porcentaje de vacíos llenos de asfalto o lo que es la relación bitumen vacíos de las mezclas asfálticas elaboradas cumplen con las especificaciones mínimas y máximas, existiendo un menor porcentaje de vacíos llenos de asfalto en la mezcla con agregados ácidos con un % promedio de 3,15% menos de vacíos a comparación de la mezcla asfáltica con agregados alcalinos.

4.4.7. Trabajabilidad de la mezcla

La trabajabilidad está descrita por la facilidad con que una mezcla de pavimentación puede ser colocada y compactada. Las mezclas que poseen buena trabajabilidad son fáciles de colocar y compactar; aquellas con mala trabajabilidad son difíciles de colocar y compactar. La trabajabilidad puede ser mejorada modificando los parámetros de la mezcla, el tipo de agregado, y/o la granulometría.

Tabla 51. Comparación de la trabajabilidad en función a la compactación de la mezcla con agregados alcalinos y ácidos.

Trabajabilidad				
		Apreciación	Mezcla asfáltica con agregados alcalinos	Mezcla asfáltica con agregados ácidos
Compactación	Buena		Presenta una buena compactación debido a que los agregados que componen la mezcla tienen una densidad media que los hace fáciles de manipular al momento del pesado por gradación al elaborar las briquetas, la combinación del agregados y asfalto no despiden olores que perjudiquen al momento de elaborar las mezclas.	-
	Regular		-	-
	Mala		-	La compactación de la mezcla con los agregados ácidos fue difícil de realizar debido a que la mezcla se desplaza bajo la compactadora y permanece tierna o blanda, producto de que los agregados poseen un valor alto de desgaste siendo un poco frágiles a la abrasión, provocando que al compactar estos se descompongan en menores tamaños, la combinación de la mezcla asfalto y agregado combinados a una temperatura mayor a 130°C desprendía olores parecidos a la pólvora, estos olores perjudicaban el ambiente de trabajo, no son fáciles de manipular debido a la alta densidad de los agregados era muy difícil su transporte a las áreas de trabajo.

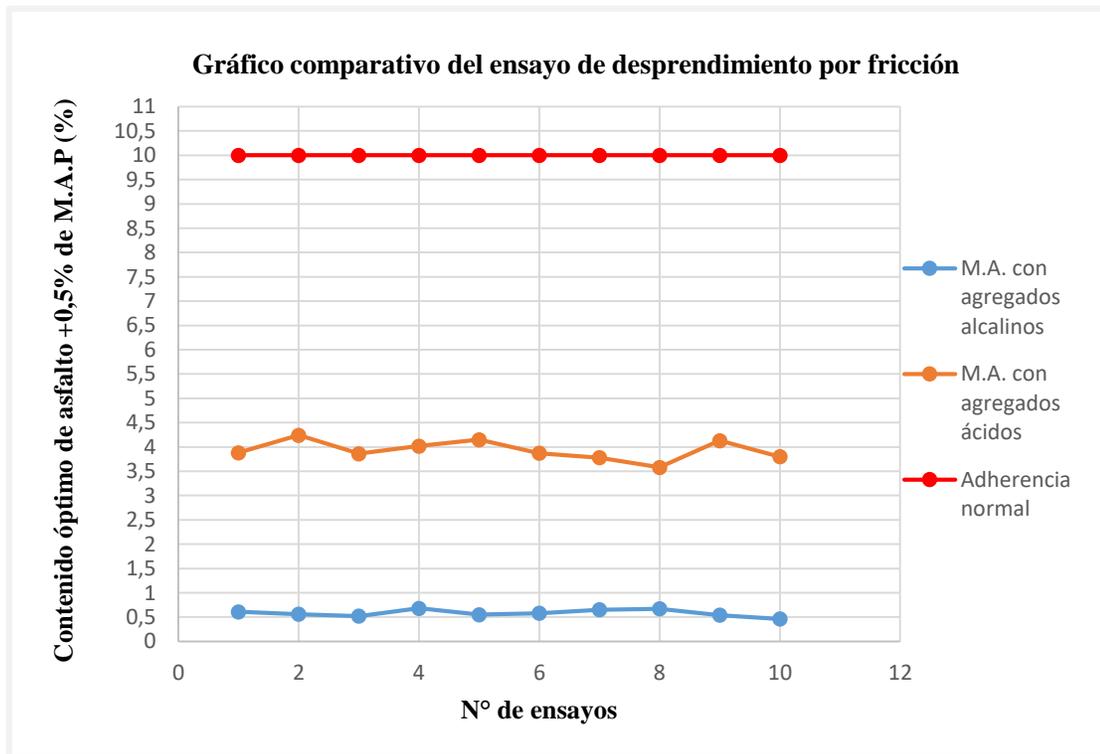
Fuente: Elaboración propia.

4.4.8. Comparación del fenómeno de Stripping en las mezclas desarrollados con distinto porcentaje de asfalto norma N-CMT-4-04

El fenómeno de Stripping tiene como efecto la separación del ligante asfáltico de los agregados pétreos debido a la pérdida de adherencia y cohesión de la interface asfalto-agregado.

4.4.8.1. Ensayo de desprendimiento por fricción - contenido óptimo de asfalto +0,5% de la masa del agregado pétreo

Figura 59. Comparación del ensayo de desprendimiento por fricción con el contenido óptimo de asfalto + 0,5% de la masa del agregado pétreo en mezclas asfálticas con agregados alcalinos y ácidos.



Fuente: Elaboración propia.

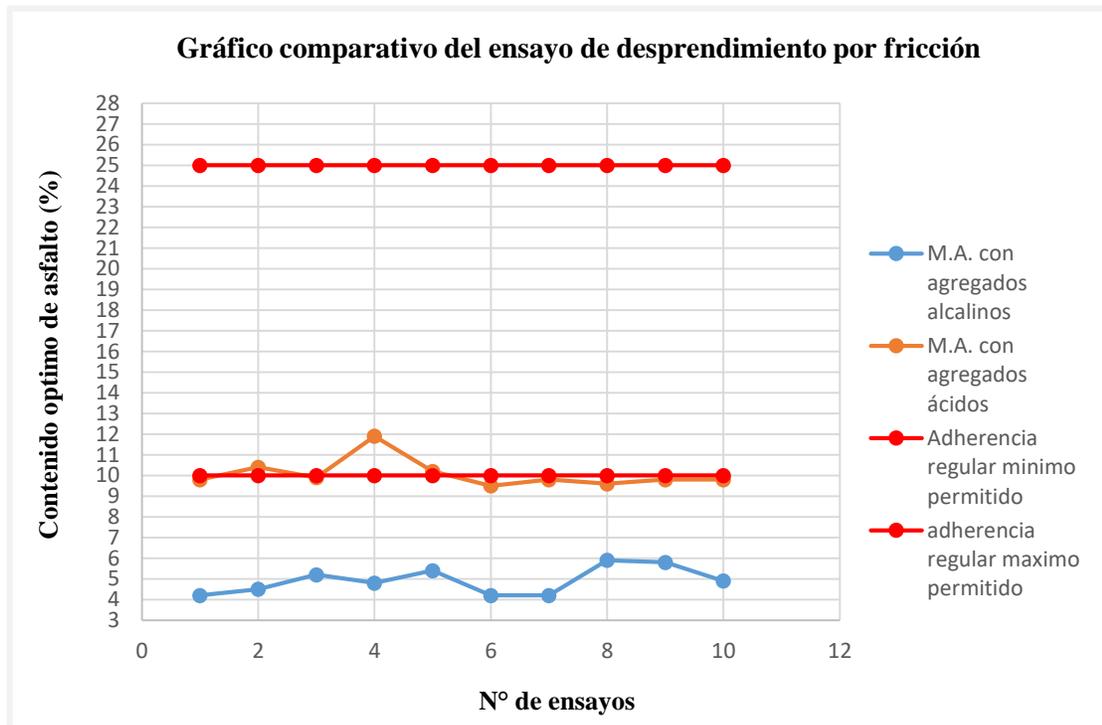
- Elaboradas las mezclas asfálticas con 0,5% más de asfalto y sometidas a saturación se pudo observar que ambas mezclas asfálticas se encuentran dentro

de la adherencia normal por debajo del 10% permitido según especificaciones del ensayo.

4.4.8.2. Ensayo de desprendimiento por fricción - contenido óptimo de asfalto

- Las mezclas con el contenido óptimo de cemento asfáltico presentan ciertas diferencias existiendo una adherencia regular en algunas mezclas elaboradas con agregados ácidos, esto implica que existió un leve desprendimiento de agregado pétreo y asfalto debido a la mala compactación de la mezcla o a la falla adhesiva, debida a la ruptura de la unión entre el agregado y el ligante asfáltico ocasionando el desprendimiento de los agregados pétreos debido a la naturaleza del agregado.

Figura 60. Comparación del ensayo de desprendimiento por fricción con el contenido óptimo de asfalto en mezclas asfálticas con agregados alcalinos y ácidos.

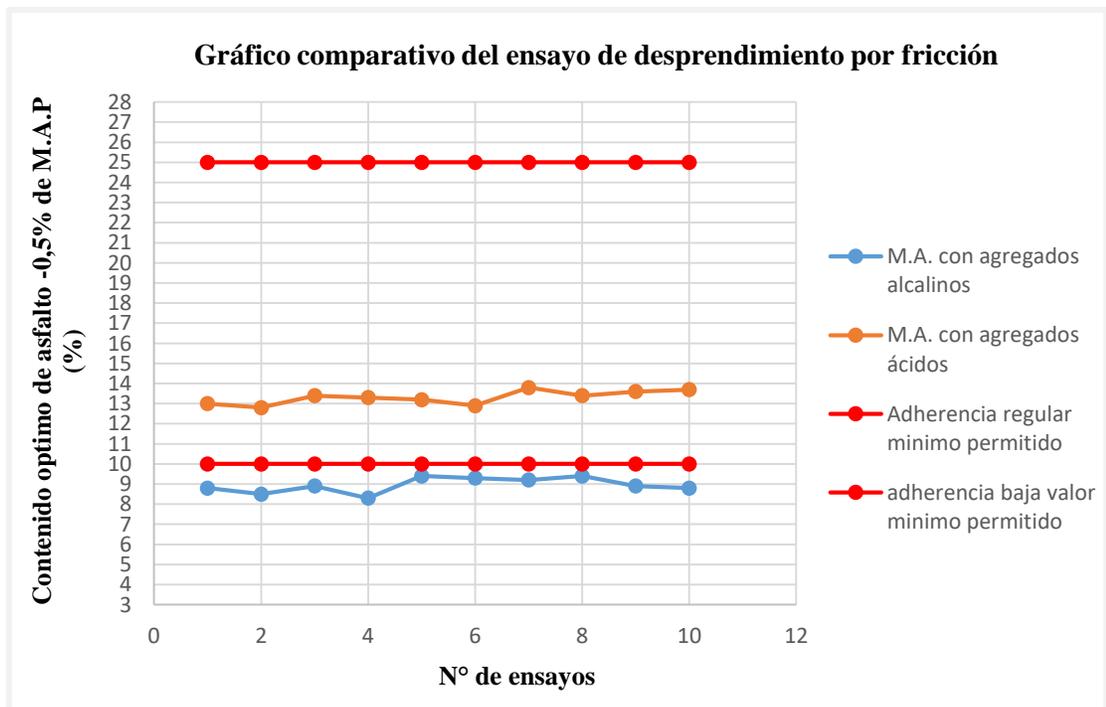


Fuente: Elaboración propia.

4.4.8.3. Ensayo de desprendimiento por fricción - contenido óptimo de asfalto - 0,5% de la masa del agregado pétreo

- A medida que se disminuye el cemento asfáltico se refleja que ciertas propiedades disminuyen y otras desaparecen el desprendimiento de la película de asfalto, con el agregado dejan un pavimento desgastado y desintegrado, disminuyendo su durabilidad, La afinidad con el asfalto es una propiedad física de los agregados pétreos que dependen de su composición mineralógica que afecta significativamente el comportamiento de la unión asfalto-agregado, ya que, a mayor absorción de asfalto, mayor será la dificultad a separar el ligante asfáltico y el agregado pétreo.

Figura 61. Comparación del ensayo de desprendimiento por fricción con el contenido óptimo de asfalto + 0,5% de la masa del agregado pétreo en mezclas asfálticas con agregados alcalinos y ácidos.

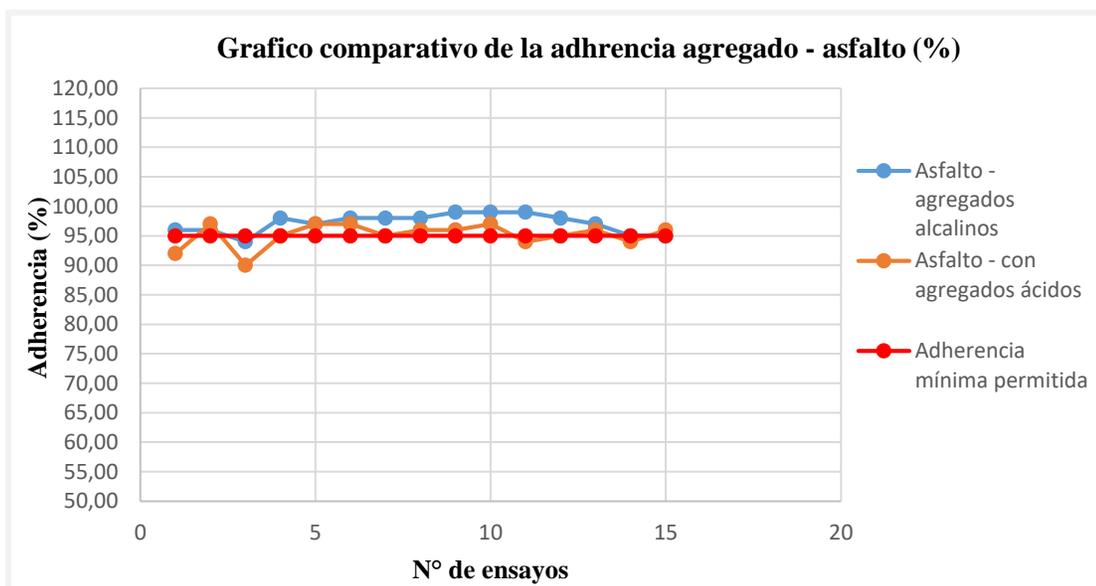


Fuente: Elaboración propia.

- La mezcla asfáltica con agregados ácidos presenta un mayor desprendimiento de agregado – asfalto, a comparación de la mezcla asfáltica con agregados alcalinos, se encuentra dentro de la adherencia regular como establece el rango del ensayo.

4.4.9. Comparación de la adherencia agregado-asfalto en inmersión estática norma AASHTO T-182.

Figura 62. Comparación de la adherencia agregado-asfalto en inmersión estática AASHTO T-182.



Fuente: Elaboración propia.

- La metodología AASHTO T-182 establece que la adherencia mínima de un agregado en relación al asfalto deberá ser del 95%, una vez realizados las muestras con cada tipo de agregado alcalino y ácido se pudo determinar que el agregado alcalino presenta buena adherencia siendo un material apto para construcciones afines con el asfalto, por lo contrario el agregado ácido presentó algunos desprendimientos de asfalto, en su mayoría cumpliendo al mínimo con lo establecido por norma, debido a la composición mineralógica que tiene que al ser ácido presenta mayor afinidad por el agua que por el asfalto.

4.5. PRESUPUESTO¹⁶

Se realizará la evaluación económica de los costos expresado en precios unitarios de los materiales, mano de obra y equipos necesarios para la construcción de una carpeta de rodadura.

Datos:

La Norma Boliviana de Carreteras ABC, establece que el ancho de carril de una carretera es de 7 m. 3,5 m. por lado. El espesor de la carpeta de rodadura varía según el volumen de tráfico, la norma SCT establece los siguientes espesores de acuerdo al volumen de tráfico pesado.

Tabla 52. Categorías de tráfico pesado.

Categoría de tráfico pesado	T00	T0	T1	T2	T31	T32	T41	T42
Vehículos pesados/día	≥ 4000	< 4000	< 2000	< 800	< 200	< 100	< 50	< 25
		≥ 2000	≥ 800	≥ 200	≥ 100	≥ 50	≥ 25	

Fuente: Norma SCT.

Tabla 53. Espesor de capas de mezcla bituminosa en caliente de acuerdo al tráfico pesado (cm).

Tipo de capa	Tipo de mezcla	Categoría de tráfico		
		T00 a T1	T2 y T31	T32 y T40 (T41 y T42)
Rodadura	PA	4		
	M	3	2-3	
	F			
	D y S		6-5	5
Intermedia	D y S	5-10		
Base	S y G	7-15		
	MAM	7-13		

Fuente: Norma SCT.

¹⁶ Para ver las planillas de Precios Unitarios de las mezclas asfálticas con agregados alcalinos y ácidos ir a anexo H.

Dónde:

PA= Mezclas bituminosas drenantes.

M y F= Mezclas bituminosas discontinuas en caliente.

D, S y G= Mezclas bituminosas en caliente.

MAM= Mezclas bituminosas de alto módulo.

Se escoge un tráfico T32 con un volumen diario de vehículos pesados mayor a 50 Veh/d, y el diseño de las mezclas asfálticas fueron realizadas en caliente, obteniendo según las tablas un espesor de 5 cm.

Se realizará el análisis de costo para 1 kilómetro de longitud de camino, 0,05 m. de espesor de rodadura y 7 metros de ancho de carretera.

Longitud= 1000 m.

Ancho= 7 m.

Espesor= 0,05 m.

Volumen:

$$V = L * A * E$$

$$V = 1000 \text{ m} * 7 \text{ m} * 0,05 \text{ m}$$

$$V = 350 \text{ m}^3$$

Determinación del precio en un kilómetro de rodadura en camino pavimentado.

Tabla 54. Comparación de costos en mezclas asfálticas con agregados alcalinos y ácidos.

Descripción	Mezcla asfáltica con agregados alcalinos	Mezcla asfáltica con agregados ácidos
Costo de la construcción de capa de rodadura Precio Unitario (Bs/m ³)	2072,86	32583,49
Volumen de la capa de rodadura por 1 km de longitud (m ³)	350	350
Costo de la construcción de capa de rodadura por 1 Km de longitud (Bs)	725500,5	11404221,7

Fuente: Elaboración propia.

4.5.1. Análisis comparativo del costo entre mezclas asfálticas con agregados alcalinos y ácidos

El análisis de precios unitarios de la construcción de la carpeta de rodadura con agregados alcalinos se obtuvo un precio unitario de 2027,86 Bs/m³.

De igual manera la mezcla elaborada con agregados ácidos obtuvo un precio de 32583,49 bs/m³.

Realizando una comparación de costos entre las dos mezclas asfálticas hay una diferencia de 30555,63 Bs/m³, existiendo un alto costo en la mezcla asfáltica con agregados ácidos debido al alto costo del mineral siendo este 7,43 Bs/kg, la cantidad que entra en una carpeta asfáltica multiplicado por el precio unitario se eleva en demasía a comparación de los agregados alcalinos que se encuentran en la ciudad de Tarija.

4.6. APLICACIÓN Y RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE ENSAYOS REALIZADOS

Luego de realizar los ensayos correspondientes se analizará la aplicación de cada tipo de agregado en mezclas asfálticas, a continuación, se muestra una tabla resumen de los resultados obtenidos:

Tabla 55. Resumen y comparación de los valores obtenidos en ensayos realizados.

Valores obtenidos diseño Marshall				
Características	Mezcla asfáltica con agregados alcalinos	Mezcla asfáltica con agregados ácidos	Especificaciones técnicas	
Densidad gr/cm ³	2,37	3,57	-	-
% Vacíos	3,2	3,8	3	5
% R.B.V.	80,54	76,95	75	82
% V.A.M	16,32	16,67	12	-
Estabilidad (Lb)	2572	3010	> 1500 Lb. (75 Golpes)	
Fluencia 1/100"	10,42	8,68	8	18
% Óptimo de asfalto propuesto	5,57	3,62		
Desprendimiento por fricción - Norma N-CMT-4-04				
+0,5% Asfalto	0,58	3,93	< 10% adherencia normal 10% - 25% regular adherencia > 25% baja adherencia	
% Óptimo	4,87	10,05		
-0,5% Asfalto	8,94	13,31		
Adherencia en inmersión estática - Norma AASHTO T-182				
Adherencia	97,12	95,11	< 95% de adherencia=Material no apto > 95% de adherencia=Material apto	

Fuente: Elaboración propia.

La mezcla asfáltica con agregados alcalinos presenta buenas propiedades en el óptimo de asfalto, un bajo porcentaje de vacíos debido a la compactación, el desprendimiento por fricción ocasionado por el fenómeno de Stripping (acción del agua en mezclas asfálticas) no presento valores altos de la ruptura agregados-asfalto presentando una adherencia normal por debajo del 10% establecido por norma, en el método de inmersión estática cubrimiento de los agregados con materiales asfálticos en presencia del agua (Stripping) presento una adherencia por encima del 95% siendo un agregados apto para mezclas asfálticas.

Por lo contrario, el diseño de mezclas asfálticas con agregados ácidos para el método Marshall presentó un valor de flujo muy cerca de la especificación, lo que indica una fricción interna posiblemente baja, esto puede deberse al porcentaje de asfalto de diseño, el cual es relativamente bajo, el valor de estabilidad de la mezcla asfáltica con este tipo de agregado es muy alto, lo que la hace susceptible al agrietamiento por fatiga. Esto también se puede observar en la prueba de desprendimiento por fricción y de adherencia, ya que presenta una susceptibilidad al agua casi nula, dejando ver que es una mezcla muy cerrada y el agregado no presenta en su mayoría características hidrofílicas.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

La investigación desarrollada fue realizada con el deseo de generar un poco más de conocimiento acerca de algunas propiedades que presenten las mezclas asfálticas cambiando el tipo de agregado grueso y fino según la naturaleza que estos presenten, a continuación, se detallan las conclusiones de la investigación.

- Se logró cumplir con el objetivo general planteado, realizando una clasificación, de la composición mineralógica mediante el análisis de PH, en alcalinidad y acidez de los agregados pétreos grueso y fino de las canteras de extracción más conocidas de la ciudad de Tarija y uno de la ciudad de Potosí, debido a que en el Cerro Rico de Potosí se encuentran agregados de composición mineralógica del tipo ácido, ello permitió que se diseñen y elaboren briquetas de mezclas asfálticas con agregados alcalinos y ácidos, para así elaborar cuadros de comparación de las propiedades estos poseen, individualmente y en conjunto, verificar el fenómeno de Stripping en las mezclas asfálticas y en agregados alcalinos y ácidos.
- La hipótesis elaborada al inicio de la investigación; luego de realizar los ensayos correspondientes a cada mezcla con agregado ácido y alcalino, realizar el análisis estadístico inferencial y la comparación correspondiente de las propiedades que presentaron las mezclas asfálticas; tiene como resultado un valor verdadero cumpliendo el objetivo general y específicos, con el 95% de confiabilidad utilizada, el análisis del error relativo y absoluto del trabajo no fue superior al 5% como máximo establecido por la confiabilidad dando un valor igual al 2,77%, dichos resultados pueden verse en el Capítulo IV.
- Cumpliendo los objetivos específicos los agregados seleccionados en acidez y alcalinidad, fueron sometidos a ensayos de caracterización para evaluar las

propiedades físicas y mecánicas que estos poseen, de los cuales el agregado ácido de la ciudad de Potosí (extraído del Cerro Rico y comercializado por empresas mineras) cumplió al límite en la gradación C con el ensayo más decisivo que es el ensayo de desgaste de los ángeles AASHTO T-96 obteniendo un valor de 40,25% siendo lo máximo un permisible de 40%, según las especificaciones utilizadas. Esto puede explicarse debido a la forma cristalina que posee el material debido a que influye de manera importante en la direccionalidad de ciertas propiedades físicas y mecánicas de las rocas, siendo estas más débiles si los minerales son laminados, tabulares o alargados, independientemente de la composición química como tal. El agregado ácido del cerro rico de la ciudad de Potosí presenta una textura fanerítica holocristalina, es decir, poseen cristales bien desarrollados y más del 90% en volumen de la roca está compuesta por cristales. La baja resistencia a la abrasión de los agregados ácidos puede ser una característica común, debido a la cristalización que poseen.

- Una de las características que presentó la mezcla asfáltica con agregados ácidos fue la alta densidad de la briqueta, llegando a un máximo de $3,582 \text{ gr/cm}^3$, esto llevó en consecuencia a aumentar los valores de estabilidad de la mezcla, la mezcla asfáltica con agregados alcalinos presentó una densidad máxima de $2,37 \text{ gr/cm}^3$, siendo una densidad normal en este tipo de mezclas.

Tabla 56. Comparación de las propiedades en mezclas asfálticas con agregados alcalinos y ácidos- método Marshall.

Valores obtenidos diseño Marshall				
Características	Mezcla asfáltica con agregados alcalinos	Mezcla asfáltica con agregados ácidos	Especificaciones técnicas	
Densidad gr/cm^3	2,37	3,57	-	-
% Vacíos	3,2	3,8	3	5
% R.B.V.	80,54	76,95	75	82
% V.A.M	16,32	16,67	12	-
Estabilidad (Lb)	2572	3010	> 1500 Lb. (75 Golpes)	
Fluencia 1/100"	10,42	8,68	8	18
% Óptimo de asfalto propuesto	5,57	3,62		

Fuente: Elaboración propia.

- Las mezclas asfálticas con agregados ácidos presentaron valores de estabilidad muy altos de los normal con un mínimo de 3004 Lb a diferencia de la mezcla con agregados alcalinos de la comunidad de Charaja, con un valor mínimo de 2546 Lb; como consecuencia, estos valores altos producen estabilidades extremadamente altas las cuales se obtienen a costa de durabilidad de las mezclas asfálticas.

Las mezclas que tienen valores bajos de fluencia y por ende valores muy altos de estabilidad Marshall; como los resultados que presentó la mezcla asfáltica con agregados ácidos son consideradas demasiado frágiles y rígidas para un pavimento en servicio.

- Los porcentajes de vacíos que presentó la mezcla asfáltica con agregados ácidos fue mayor a comparación de la mezcla asfáltica con agregados alcalinos, presentando por ende mayor permeabilidad para el ingreso de agua y/o aire. Esto puede deducirse debido a que el cemento asfáltico no cubrió en su totalidad a los agregados ácidos debido a la naturaleza mineralógica que posee.

Como consecuencia los valores de vacíos llenos de asfalto son más bajos a comparación de los porcentajes de RBV que presentó la mezcla alcalina.

- Se logró cumplir con el objetivo específico de la verificación del fenómeno de Stripping en las mezclas con distintos agregados, analizando la separación del agregado pétreo del ligante asfáltico debido a la presencia de agua en la mezcla asfáltica, verificando con dos tipos de ensayos la adherencia del agregado-asfalto y la acción del agua en el conjunto. Concluyendo que la adherencia no se puede ser determinada con ensayos mecánicos directos ya que su mecanismo radica en los fenómenos de adsorción en la interface agregado-bitumen y este estudio de la adherencia solo puede hacerse mediante el análisis mecánico indirecto; en la mayoría de los casos son determinados de manera visual, muchos estudios se realizan por separado por un lado agregados gruesos y por otro los agregados finos pero pocos estudios toman en cuentan la interacción que existe entre ambos en la mezcla asfáltica. La adherencia regular que presentó la mezcla con agregados ácidos puede ser producto de la existencia de

una película de agua absorbida o de impurezas en la interface agregado – asfalto, enfriamiento rápido del ligante y un mojado defectuoso de la superficie del agregado. Se esperó que la mezcla asfáltica presente una adherencia mala por ende sea hidrofílica (mas afinidad con el agua y no así con el asfalto) basando en resultados de otros estudios, pero este agregado ácido analizado combinado con el asfalto no tuvo estas características, teniendo una afinidad regular con el agua. Como investigadora, se puede concluir que la mezcla con agregados alcalinos presenta una afinidad con el asfalto buena, y la mezcla asfáltica con agregados ácidos presentó un comportamiento regular no sobrepasando el 25% de la adherencia mala, por ende, se concluye que estos dos agregados presentan comportamientos hidrofóbicos teniendo mayor afinidad con el asfalto que con el agua.

- El método de la adherencia en inmersión estática establecido por el método AASHTO T-182, determinó el porcentaje de cubrimiento que existe entre asfalto y agregado dando como resultado que el agregado alcalino presenta mayor porcentaje de adherencia de las 15 muestras realizadas solo uno resultó con baja adherencia, el agregado ácido presento un 20% en relación al número de muestras realizadas de mala afinidad con el asfalto, presentando de manera global características hidrofóbicas, es decir, no presenta afinidad por el agua, siendo ambos tipos de agregados aptos para la aplicación de mezclas asfálticas.
- En términos generales, se concluye afirmando que la mezcla asfáltica que presenta mejores propiedades en cuanto a trabajabilidad, estabilidad, fluencia, porcentaje de vacíos y adherencia con el asfalto por ende mejor funcionalidad con el ligante, es la mezcla elaborada con agregados alcalinos de la comunidad de San José de Charaja, además un factor importante que es analizado a la hora del diseño de mezclas asfálticas en proyectos camineros, el cual es lo económico, señala que los agregados alcalinos son más accesibles en comercio, en su precio productivo, presentando un precio unitario 16 veces menor que la mezclas asfáltica con agregados ácidos.

Se establece que, no en todos los proyectos, las mezclas que presenten mayores resultados, o el que sobrepase en demasía las especificaciones técnicas, es la mejor opción o es sinónimo de mayor calidad, todo lo extremo a un término medio es malo a cuesta de durabilidad, de costo en materiales y sobretodo funcionalidad al momento de aplicarlos en obra.

5.2. RECOMENDACIONES

- Todo proyecto de trabajo, diseño y construcción de obras civiles requiere un estudio previo de análisis de los materiales que componen esa obra, es importante que se analicen todos los agregados no solo físicamente sino químicamente, se ha verificado con valores que la composición mineralógica de los agregados incide en las propiedades y rendimientos de las mezclas asfálticas que presentan una vez puestos en obra. Aunque sea moroso y talvez resulte de poca relevancia este análisis, es recomendable de hacer para evitar problemas a futuro en las carpetas de rodadura.
- Para obtener resultados verídicos de los ensayos, se recomienda calibrar los equipos antes de proceder a utilizarlos, tener una balanza o una prensa Marshall mal calibrada, conlleva a problemas severos en los resultados, datos dispersos y un análisis de los resultados fallidos.
- La selección de los agregados para posteriores análisis de PH u otro, puede verse influenciado en un mal muestreo de los mismos, se recomienda realizar un cuarteo de los materiales para realizar un análisis más completo que abarque los agregados característicos de la zona.
- El presente trabajo utilizó agregados de la ciudad de Tarija y uno de la ciudad de Potosí (Cerro Rico), vale recomendar que los resultados obtenidos en la investigación solo son aplicados para el cemento asfáltico PROBISA C.A.P. 85-100, para ser usado con otro tipo de asfalto se deberán hacer los ensayos de caracterización y su posterior análisis siguiendo la metodología del mismo.

- Es recomendable realizar un tratamiento estadístico para ver el número de ensayos a realizar antes de iniciar con la investigación, porque uno o dos ensayos, dependiendo del mismo, no reflejan el comportamiento de los materiales, es bueno tener un porcentaje de confiabilidad para determinar el porcentaje de error del trabajo que avalen dichos resultados.