

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



**“ASFALTO MODIFICADO CON MATERIAL RECICLADO DE
LLANTAS PARA SU APLICACIÓN EN PAVIMENTOS FLEXIBLES”**

TESIS

PRESENTADO POR:

Carrizales Apaza, José Javier

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO CIVIL

PUNO - PERÚ

2015

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

TITULO:

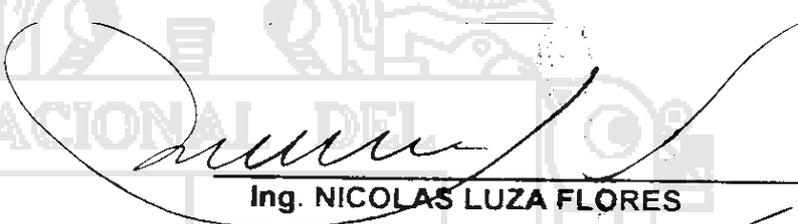
**“ASFALTO MODIFICADO CON MATERIAL RECICLADO DE LLANTAS PARA SU
APLICACIÓN EN PAVIMENTOS FLEXIBLES”**

**TESIS PRESENTADO POR:
CARRIZALES APAZA, JOSÉ JAVIER**

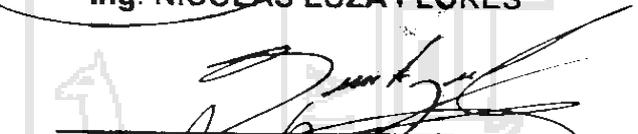
**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO CIVIL**

APROBADO POR:

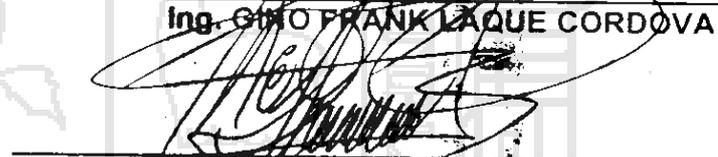
Presidente de jurado


Ing. NICOLAS LUZA FLORES

Primer Miembro


Ing. GINO FRANK LAQUE CORDOVA

Segundo Miembro


Ing. NESTOR ELOY GONZALES SUCASAIRE

Director de Tesis


Ing. WALTER HUGO OPA CONDORI

Asesor de Tesis


Ing. LUIS EMILIO RODRIGUEZ PALAO

PUNO - PERU

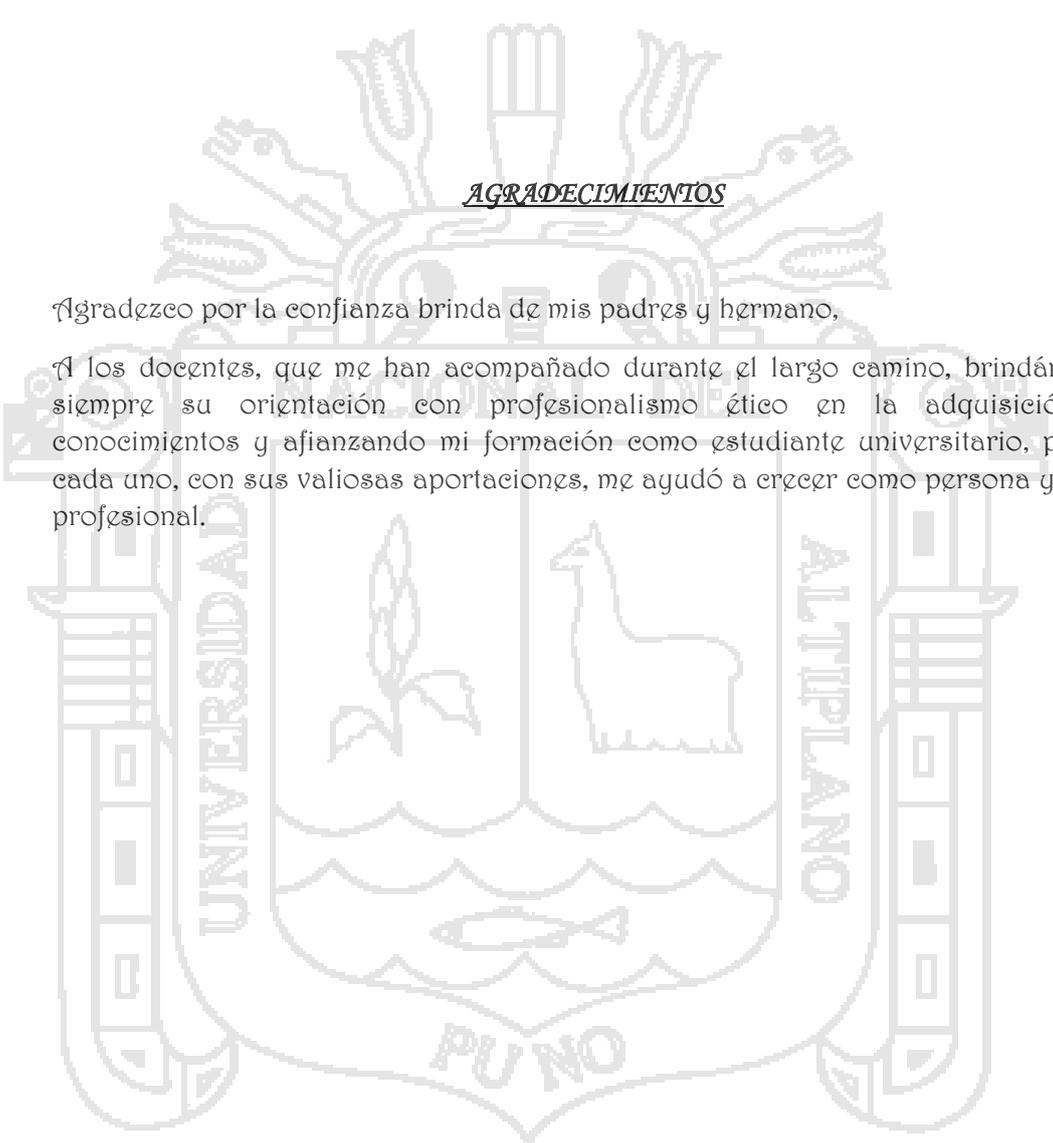
2015

Área: Transportes

Tema: Diseño de Pavimentos

**DEDICATORIA**

Dedico este trabajo principalmente a mis padres, ya que fueron las personas que guiaron y apoyaron mi camino hacia mi formación personal y profesional.



AGRADECIMIENTOS

Agradezco por la confianza brindada de mis padres y hermano,

A los docentes, que me han acompañado durante el largo camino, brindándome siempre su orientación con profesionalismo ético en la adquisición de conocimientos y afianzando mi formación como estudiante universitario, porque cada uno, con sus valiosas aportaciones, me ayudó a crecer como persona y como profesional.

ÍNDICE

CAPITULO I	14
GENERALIDADES	14
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA:	14
1.2. DISEÑO DE LA INVESTIGACION	15
1.2.1. ANTECEDENTES	15
1.2.2. DELIMITACIÓN TEMATICA	21
1.3. JUSTIFICACION	22
1.4. OBJETIVOS:	22
1.4.1. OBJETIVO GENERAL	22
1.4.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	23
1.5. HIPOTESIS Y VARIABLES DE ESTUDIO	23
1.5.1. HIPOTESIS GENERAL	23
1.5.2. HIPOTESIS ESPECIFICAS	23
1.6. SISTEMA DE VARIABLES	23
1.6.1 VARIABLE INDEPENDIENTES	23
1.6.2 VARIABLE DEPENDIENTE	24
1.6.3 INDICADORES	24
1.7. UNIDAD DE ANALISIS PARA LA INVESTIGACION	24
1.7.1 POBLACION	24
1.7.2 MUESTRA	24
1.8. TIPO DE MATERIAL EXPERIMENTAL PARA LA INVESTIGACION	26
1.9. METODOLOGIA Y PLAN DE DESARROLLO	26
1.11. LIMITACION TEMATICA.	28
CAPITULO II	29
MARCO TEORICO	29
2.1. INTRODUCCION	29
2.2. MEZCLAS ASFALTICAS	30
2.3. FUNCIONALIDAD DE LAS MEZCLAS ASFALTICAS	30
2.4. CLASIFICACION DE LAS MEZCLAS ASFALTICAS	33
2.5. COMPONENTES DE UNA MEZCLA ASFALTICA	35
2.5.1. ASFALTO	35
2.5.2. CAUCHO RECICLADO DE LLANTA (CRLI)	37
2.5.3. AGREGADOS PETREOS	45
2.6. DISEÑO DE MEZCLAS ASFALTICAS MEDIANTE EL METODO MARSHALL	56

2.6.1	PREPARACION PARA EFECTUAR LOS PROCEDIMIENTOS MARSHALL	
	56	
2.7.	ESPECIFICACIONES NORMATIVAS PARA LA METODOLOGIA.....	64
2.7.1	AGREGADOS MINERALES GRUESOS	64
2.7.2	AGREGADOS MINERALES FINOS.....	64
2.7.3	MEZCLA DE LOS AGREGADOS	66
2.7.4	. FILLER O POLVO MINERAL	67
2.7.5	MEZCLA DE AGREGADOS	67
CAPITULO III	.....	70
3.	DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	70
3.1	ENSAYOS DE CONTROL DE CALIDAD DE LOS AGREGADOS	71
3.1.1	AGREGADOS PETREOS.....	71
3.1.2	AGREGADOS UTILIZADOS PARA LA ELABORACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS	71
3.1.3	ANÁLISIS GRANULOMETRICO.....	72
3.1.6	EQUIVALENTE DE ARENA	80
	.....	81
	FUENTE: PROPIA.....	81
3.1.8	CEMENTO ASFALTICO	81
3.2	DISEÑO PARA MEZCLAS ASFALTICAS POR EL METODO MARSHALL (ASFALTO CONVENCIONAL).....	84
3.2.1	CALCULO DEL PESO UNITARIO DE LA MUESTRA COMPACTADA	84
3.2.2	PESO ESPECIFICO BULK DE LA COMBINACIÓN DE AGREGADOS ..	84
3.2.3	PESO EFECTIVO DE LOS AGREGADOS	85
3.2.4	PORCENTAJE DE ASFALTO ABSORBIDO.....	86
3.2.5	CONTENIDO DE ASFALTO EFECTIVO	87
3.2.6	PORCENTAJE VMA EN MEZCLA COMPACTADA	88
3.2.7	PORCENTAJE DE VACÍOS DE AIRE EN LA MEZCLA COMPACTADA..	89
3.2.8	VACÍOS LLENOS CON ASFALTO	90
3.2.9	CALCULO DEL CONTENIDO OPTIMO DE ASFALTO CONVENCIONAL	91
3.2.10	RESULTADOS FINAL	92
3.3	DISEÑO PARA MEZCLAS ASFALTICAS POR EL METODO MARSHALL (ASFALTO MODIFICADO)	94
3.3.1	CALCULO DEL PESO UNITARIO DE LA MUESTRA COMPACTADA	94
3.3.2	PESO ESPECIFICO BULK DE LA COMBINACIÓN DE AGREGADOS ..	95
3.3.3	PESO EFECTIVO DE LOS AGREGADOS	95
3.3.4	PORCENTAJE DE ASFALTO ABSORBIDO.....	97

3.3.5	CONTENIDO DE ASFALTO EFECTIVO	97
3.3.6	PORCENTAJE VMA EN MEZCLA COMPACTADA	98
3.3.7	PORCENTAJE DE VACÍOS DE AIRE EN LA MEZCLA COMPACTADA..	99
3.3.8	VACÍOS LLENOS CON ASFALTO	100
3.3.9	CALCULO DEL CONTENIDO OPTIMO DE ASFALTO MODIFICADO	101
3.3.10	GRAFICOS DE MARSHALL.....	102
	Para 3% de caucho.....	102
3.3.11	RESULTADOS FINAL	103
	Para 3% de caucho.....	103
CAPITULO IV		104
RESULTADOS Y DISCUSIONES.....		104
4.1.	CONTRASTACION DE HIPOTESIS.....	104
4.1.1.	CONTRASTACION DE HIPOTESIS GENERAL	104
CAPITULO V.....		114
5.	CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS.....	114
5.1.	CONCLUSIONES.....	114
5.1.1.	CONCLUSIONES RESPECTO A LA HIPOTESIS GENERAL	114
5.1.2.	CONCLUSIONES RESPECTO A LA HIPOTESIS ESPECÍFICA I.	114
5.1.3.	CONCLUSIONES RESPECTO A LA HIPOTESIS ESPECÍFICA II.	115
5.1.4.	CONCLUSIONES RESPECTO A LA HIPOTESIS ESPECÍFICA III.	115
5.1.5.	CONCLUSIONES RESPECTO A LA HIPOTESIS ESPECÍFICA IV.....	115
5.2.	SUGERENCIAS.....	116

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.	Composición y características de los diferentes tipos de llantas.	
	28	
Tabla 2.	Análisis químico de la llanta.	29
Tabla 3.	Requerimientos para los Agregados Gruesos	51
Tabla 4.	Requerimientos para los Agregados Finos	52
Tabla 5.	Requerimientos para Caras Fracturadas	52
Tabla 6.	Requerimientos del Equivalente de Arena	53
Tabla 7.	Granulometría de mezcla de agregados	53
Tabla 8.	Porcentaje retenido de filler	54
Tabla 9.	Requisitos para Mezcla de Concreto Bituminoso	55
Tabla 10.	Vacíos mínimos en el agregado mineral (VMA)	56
Tabla 11.	Piedra chancada de tamaño máximo 1/2"	60
Tabla 12.	Arena chancada de tamaño máximo 1/4"	61
Tabla 13.	Arena natural de tamaño máximo 3/8"	61
Tabla 14.	Cal hidratada	62
Tabla 15.	Caucho reciclado de llanta	62
Tabla 16.	Límite de consistencia	67
Tabla 17.	Equivalente de arena	68
Tabla 18.	Abrasión los ángeles	69
Tabla 19.	Especificaciones técnicas del cemento asfáltico pen 120-150	70
Tabla 20.	Peso unitario de la muestra compactada (asfalto convencional)	72
Tabla 21.	Peso efectivo promedio del agregado (asfalto convencional)	73
Tabla 22.	Peso efectivo de los agregado (asfalto convencional)	74
Tabla 23.	Porcentaje de asfalto absorbido (asfalto convencional)	75
Tabla 24.	Contenido de asfalto efectivo (asfalto convencional)	76
Tabla 25.	Vacíos en el agregado MINERAL (asfalto convencional)	77
Tabla 26.	Vacíos de aire en la mezcla compactada (asfalto convencional)	78
Tabla 27.	Vacíos llenos con asfalto (asfalto convencional)	79
Tabla 28.	Peso unitario de la muestra compactada (asfalto modificado)	82
Tabla 29.	Peso efectivo promedio del agregado (asfalto modificado)	83
Tabla 30.	Peso efectivo de los agregados (asfalto modificado)	84
Tabla 31.	Porcentaje de asfalto ABSORBIDO (asfalto modificado)	85
Tabla 32.	Contenido de asfalto efectivo (asfalto modificado)	86
Tabla 33.	Vacíos en el agregado mineral (asfalto modificado)	87
Tabla 34.	Vacíos de aire en la mezcla compactada (asfalto modificado)	88

Tabla 35. Vacíos llenos con asfalto (asfalto modificado)	89
Tabla 36. Comparación del DAM Y el DAC	94
Tabla 37. Estabilidad	95
Tabla 38. Fluencia	95
Tabla 39. Porcentaje de vacíos de aire	96
Tabla 40. Peso unitario	97
Tabla 41. Vacíos llenos de cemento asfáltico	97
Tabla 42. Estabilidad flujo kg/cm	98
Tabla 43. Porcentaje de estabilidad retenida	98
Tabla 44. Porcentaje de índice de compactabilidad	99

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01.	Grafico del Método del Cuadrado	41
FIGURA 02.	Grafico del Método del Triángulo	43

TITULO: ASFALTO MODIFICADO CON MATERIAL RECICLADO DE
LLANTAS PARA SU APLICACIÓN EN PAVIMENTOS FLEXIBLES

AUTOR: JOSÉ JAVIER CARRIZALES APAZA

RESUMEN

Este trabajo se enfocó en la elaboración de un nuevo diseño de una mezcla asfáltica modificado con Caucho Reciclado de Llantas (CRL), proponiendo un esquema de aprovechamiento de los residuos sólidos que representan las llantas usadas, con el fin de ofrecer una alternativa de solución a los problemas que afectan al asfalto y consecuentemente a las carpetas asfálticas. Entre los principales problemas que afectan al asfalto en el pavimento se encuentran: el envejecimiento, la deformación permanente, los fisuramientos. Por otra parte la contaminación causada por residuos sólidos en especial la generada por las llantas usadas de automotores es un aspecto al que no se le ha dado un manejo adecuado dentro de la problemática ambiental que actualmente afecta al país.

Con base a los resultados cabe mencionar que con esta investigación se obtuvieron: valores los cuales se encontraban por debajo de los establecidos por las normas peruanas, en algunos casos valores que sobrepasaban los límites establecidos por las normas. Llegando a la conclusión general que el caucho reciclado de llanta usado como material componente de la mezcla asfáltica en caliente para usarlos en pavimentos flexibles. No aporta mejoras en las características físico – mecánicas, de la mezcla asfáltica modificada con caucho reciclado de llanta planteada según diseño.

TITLE: ASPHALT MODIFIED RECYCLED TIRES FOR APPLICATION IN FLEXIBLE PAVEMENTS

AUTHORS: JOSE JAVIER CARRIZALES APAZA

ABSTRACT

This work focused on the development of a new design of a modified Recycled Tire Rubber (CRLR), proposing a scheme of utilization of solid waste that is used tires, in order to offer an alternative solution to asphalt the problems affecting the asphalt and consequently asphalt layers. Among the main problems affecting the asphalt pavement they are aging, creep, the fissuring. Moreover, pollution caused by solid waste generated especially motor used tires is an aspect that has not been given a proper management within the environmental problems currently affecting the country.

Based on the results it should be mentioned that this research were obtained: values which were below those established by Peruvian standards, in some cases values exceeded the limits set by the rules. Coming to the general conclusion that recycled tire rubber used as a material component of the hot mix asphalt for use in flexible pavements. It does not provide improvements in physical - mechanical characteristics of the asphalt modified with recycled tire rubber raised according to design.

INTRODUCCION

Se han venido implementando cada vez más nuevas ideas que permitan el desarrollo y mejoramiento de los pavimentos, de modo que el país pueda contar con una infraestructura vial acorde a sus necesidades. Es por esto que surgen los estudios de investigación sobre modificación de mezclas asfálticas, como una forma de mejorar las propiedades y dar solución a ciertos inconvenientes que actualmente se presentan.

El envejecimiento es un problema que afecta a todos los asfaltos, debido a cambios subsecuentes en sus propiedades físicas y químicas lo cual tiene un efecto negativo en su comportamiento y durabilidad durante su vida útil.

Otros tipos de daños desfavorables son la deformación permanente que se presenta en los pavimentos, debido a la falta de consistencia que aporta el asfalto a altas temperaturas produciendo ahuellamiento, también los fisuramientos por fatiga afectan al pavimento debido a las frecuentes cargas de trabajo impuestas sobre el asfalto en el pavimento.

Por otra parte la contaminación causada por residuos sólidos en especial la generada por las llantas usadas de automotores es un aspecto al que no se le ha dado un manejo adecuado dentro de la problemática ambiental que actualmente afecta al país.

Debido lo anteriormente expuesto nace necesidad de un medio ambiente menos contaminado y la búsqueda de mejores materias primas para la pavimentación de vías.

Este trabajo se enfoca en la experimentación y diseño de la mezcla asfalto-caucho y agregados con el fin de que el producto obtenido se pueda utilizar en la pavimentación de vías, logrando con esto dar una alternativa de solución a los problemas anteriormente mencionados que afectan a las carpetas asfálticas de las vías del país, al tiempo que se propone un esquema de solución en el manejo de los residuos sólidos que representan las llantas usadas, las cuales son un preocupante y creciente factor de contaminación.



CAPITULO I

GENERALIDADES

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA:

Debido a que se presentan casos en la infraestructura vial, en los cuales las características de las mezclas asfálticas obtenidas con ligantes convencionales, no son capaces de resistir la acción conjunta del tránsito y del clima, se hace necesario desarrollar mezclas bituminosas más resistentes, mejorando sus propiedades mecánicas, haciendo énfasis en la durabilidad, aguellamiento y fatiga.

El problema de la infraestructura vial en el país radica en desconocer el comportamiento dinámico de los pavimentos debido a problemas de diseño, especificaciones de las mezclas y errores constructivos. Esto se puede ver reflejado en numerosas calles y carreteras del país, donde se encuentra en gran cantidad de fallas tempranas. Las deficiencias en los pavimentos, también se deben a que las mezclas no poseen un buen comportamiento mecánico, debido a

que son sometidas a condiciones diferentes de trabajo, como flexión, compresión, tracción, cortante, etc.

Lo que se busca es mejorar la fluencia a altas temperaturas de los pavimentos sin hacer que los asfaltos sean demasiados viscoso a altas temperaturas de mezcla y de compactación o demasiado liviano o quebradizo a bajas temperaturas. Un material que cumple con todas esos requisitos es el caucho reciclado de llantas usadas de por los automóviles, el cual después de ser tratada y reducida de tamaño, se puede reincorporar al asfalto para de esta manera se pueda formar un asfalto modificado.

1.2. DISEÑO DE LA INVESTIGACION

1.2.1. ANTECEDENTES

Las vías que conectan a todo un país, son las que llevan el desarrollo a dichos lugares, el tiempo y confort de los viajes dependen del estado en que se encuentren dichas vías. Fruto de esta preocupación, y como parte del Proyecto de Transporte Urbano para Santa Fe de Bogotá (BIRF 4021-CO), el Instituto de Desarrollo Urbano, IDU, contrató a la Universidad de los Andes para adelantar el Estudio de las Mejoras Mecánicas de Mezclas Asfálticas con Desechos de Llantas mediante el contrato 366/01 como parte de un programa de investigación para mejorar el comportamiento de las mezclas bituminosas que se colocan en la ciudad de Bogotá.

Este proyecto debe su origen a un estudio realizado por el Distrito Capital sobre el aspecto ambiental de los desechos sólidos, donde el manejo de las llantas usadas generadas por el parque automotor de Santa Fe de Bogotá recibió especial

atención. Una de las conclusiones del estudio en mención es el despiece y trituración de llantas usadas y su incorporación en las mezclas asfálticas.

Actualmente existen dos procesos usados en la elaboración de concreto asfáltico en los que se incorpora desecho de llantas usadas, denominados como proceso húmedo y proceso seco. Estudios previos realizados con caucho natural y sintético en algunos países como Estados Unidos, España, Sudáfrica, entre otros, demostraron que el caucho sintético es el más apropiado para este uso particular. Este caucho es obtenido de forma económicamente viable empleando llantas de desechos que deben ser molidas hasta obtener tamaños de partícula apropiados. El caucho molido de esta forma recibe el nombre de grano de caucho reciclado (GCR).

Esta primera fase abarcó una búsqueda exhaustiva de información relacionada con métodos modernos para el diseño y construcción de vías haciendo uso de asfaltos modificados, considerando especialmente la alternativa de utilización de mezclas asfálticas mejoradas con caucho. Igualmente se recopiló información existente relacionada con nuevas tecnologías orientadas al proceso del caucho proveniente de llantas usadas y sus aplicaciones en las mezclas asfálticas. Mucha de esta información se obtuvo de asociaciones internacionales como Rubber Pavement Association, International Society for Asphalt Pavements, e información contenida en las memorias del Congreso Internacional Asphalt Rubber 2000 realizado en Vilamoura, Portugal, en noviembre del año 2000, entre otros documentos.

En el proceso de mejoramiento del cemento asfáltico se estudiaron las condiciones de incorporación por vía húmeda del GCR a dos cementos asfálticos nacionales. Mediante este proceso se pretendía modificar el ligante para fabricar posteriormente

mezclas asfálticas en caliente. Para el proceso de mejoramiento de las mezclas asfálticas por vía seca se estudió la incorporación del GCR como un agregado fino manteniendo los husos granulométricos convencionales. Estas mezclas asfálticas se analizaron bajo una perspectiva mecánica y volumétrica.

Este trabajo de investigación tiene como referencia a las siguientes tesis:

“Modificación de un Asfalto con caucho reciclado de llanta para su Aplicación en Pavimentos” de la Universidad industrial de Santander – Facultad de Ciencias Físicoquímicas, Bucaramanga, Colombia. Esta tesis está orientada a el uso de sustancias químicas, caucho y cemento asfáltico como únicos materiales para el uso de sellados.

Objetivo: elaboración de la mezcla asfáltica óptimo asfalto – caucho con el fin de que el producto obtenido se pueda usar como ligantes.

Dicha tesis llega a las siguientes conclusiones.

- Con la adición de CRLC al asfalto original Barrancabermeja se comprobó la mejora de algunas de sus propiedades como la recuperación elástica por torsión, la cual se logró aumentar en un 100 y 300 % para el AMCA y AMC respectivamente, lo que indica una alta resistencia a la deformación en estos asfaltos.
- El acondicionamiento del CRLC por parte el agente compatibilizante tipo I permitió en el AMCA un incremento de hasta 2 veces el contenido de caucho reciclado de llantas con respecto al AMC, sin embargo, la utilización de este aditivo no mejoró significativamente la interacción asfalto-CRLC, como se corrobora en los resultados de estabilidad al almacenamiento y la ductilidad.

- Con base a la experimentación realizada en este trabajo a nivel de laboratorio, y teniendo en cuenta el porcentaje de caucho presente en las llantas así como la cantidad de este usado en el AMC y AMCA, se obtuvo una relación de aprovechamiento de 285 kilogramos de llantas desechadas por cada tonelada de asfalto modificado producido, lo que propone una alternativa de carácter ambiental para el manejo de estos residuos sólidos.

“Comportamiento de mezclas asfálticas en caliente PEN 120 – 150 modificado con polímero tipo III (PS)” de la EPIC, UNA – Puno. Esta tesis usa el método Marshall en su diseño de mezcla asfáltica. Dicha tesis tiene los siguientes objetivos.

- Su objetivo general es de: analizar el comportamiento de mezclas asfálticas en caliente PEN 120 – 150 modificados con polímero tipo III (PS).
- Ensayar la estabilidad de la mezcla asfáltica PEN 120 – 150 modificados con polímero tipo III (PS), para determinar si su durabilidad en el tiempo es mayor, bajo condiciones normales de uso.
- Analizar la fluidez de la mezcla asfáltica PEN 120 – 150 para determinar si es menor a la del diseño de mezclas asfálticas PEN 120 – 150 modificados con polímero tipo III (PS).
- Determinar cómo se mejoran las fallas del asfalto como ahuellamiento, fisuramiento por fatiga o por efecto térmico usando polímero tipo III (PS).
- Evaluar los costos, tiempo de construcción, operación y mantenimiento de un pavimento modificado con polímero tipo III (PS) respecto de un pavimento convencional.

Dicha tesis llega a las siguientes conclusiones.

- Su conclusión general es de: las mezclas asfálticas modificadas con polímero tipo III (PS) presenta mejoras características físico mecánicas con valores superiores a las mezclas convencionales.
- Los asfaltos modificados superan en 10% a los asfaltos convencionales.
- La relación estabilidad flujo de las mezclas modificadas son mayores en un 5% que las mezclas convencionales.
- El ensayo de Cántabro de mezclas modificadas aumenta en 1.5 veces respecto a la convencional, esto significa mejor adherencia de las partículas. El ensayo de tracción indirecta de los asfaltos modificados son superiores en un 40% respecto a las convencionales, esto nos indica que los primeros tienen mayor esfuerzo a la tracción evitando de esta manera el ahuellamiento.
- Las diferencias económicas en costo/beneficio realizado a las mezclas asfálticas para un metro cuadrado en los 15 años de edad. Al emplear mezclas modificadas se ahorra un 34% con respecto a las convencionales.

“**Asfalto Ahulado**” del instituto tecnológico de la construcción, A.C. – México.

Esta tesis está más orientada al uso de sustancias químicas, caucho y cemento asfáltico como únicos materiales para el uso de riego de sello. Dicha tesis presenta los siguientes objetivos.

- Analizar el nuevo desarrollo de los asfaltos modificados con hule molido, su aspecto técnico, impacto ambiental, normatividad, perspectivas y ventajas de su uso en las carreteras de México.

Dicha tesis llega a las siguientes conclusiones.

- Con base a la investigación realizada podemos concluir que si se logra promover la utilización de las carpetas de asfalto ahulado; tendremos una mejor red carretera y reduciremos el problema ambiental que causan las llantas.
- El asfalto ahulado es un material de pavimentación único con propiedades ingenieriles superiores, especialmente en la prevención de reflexión de grietas y en el envejecimiento del pavimento. La capa de asfalto ahulado actúa como sellador, previniendo la pérdida y la reacción de los componentes más volátiles. Esta acción sellante conserva la viscosidad del pavimento y mantiene la flexibilidad de la superficie tratada.
- En general, con el uso del asfalto ahulado en la conservación y construcción de pavimentos flexibles se logra una mayor vida útil, un alto nivel de servicio y un mínimo costo de mantenimiento debido a sus características, lo cual se traduce en las siguientes ventajas:
- Se reduce notablemente la oxidación y el envejecimiento de las carpetas asfálticas debido a los antioxidantes y al negro de humo que contiene el hule molido de llanta con el que se modifica el asfalto normal.
- Las mezclas asfálticas elaboradas con asfalto ahulado son más flexibles que las mezclas convencionales.
- Las mezclas elaboradas con asfalto ahulado mejoran considerablemente la

- susceptibilidad a las temperaturas bajas y altas con respecto a un asfalto normal.
- Los ingredientes antioxidantes, altisonantes, negro de humo, así como la cohesión que se logra por la reacción entre el asfalto y el hule, aunados al efecto Joule-Thompson, son los principales factores que prolongan la vida de los pavimentos con asfalto ahulado, al mismo tiempo que proporcionan confort.
 - El aprovechamiento de un recurso no degradable que se encuentra en nuestro ambiente causando contaminación y problemas, es razonable y necesario, toda vez que su utilización se encuentra sustentada por los resultados y la experiencia.
 - Un camino bien construido, será más económico al pasar los años y esto permitirá a la vez que con ese ahorro se construyan más vías de comunicación que tanto beneficio proporciona al país.

1.2.2. DELIMITACIÓN TEMÁTICA

La presente investigación está orientada a obtener y evaluar la mejor proporción de caucho reciclado de llanta en mezclas asfálticas en caliente para solucionar los problemas que se ven en las carpetas asfálticas productos del tráfico, clima y materiales de las vías de la región Puno.

Ya que se está trabajando con la calidad de los agregados, de la cantera se dé Cabanillas (Santo Tomas) y el cemento asfáltico que se utilizara es PEN 120 – 150, se tomó dicho asfalto por las recordaciones para zonas de altura mayor a

3000 msnm y también de acuerdo a la temperatura media anual según la EG-2000 que hace la selección de dicho cemento asfáltico.

1.3. JUSTIFICACION

Las justificaciones se basan en las ventajas que ofrecería este nuevo tipo de asfalto modificado con caucho reciclado de llanta.

- La disminución de la contaminación causada por residuos sólidos en especial la generada por las llantas usadas de automotores es un aspecto al que no se le ha dado un manejo adecuado dentro de la problemática ambiental que actualmente afecta al país.
- Experimentando y adecuando nuevas tecnologías en la parte vial, para nuestra zona.
- Elevada resistencia al deslizamiento bajo lluvia.
- Elevada resistencia al deslizamiento a altas velocidades.
- Mejora de la visibilidad con el pavimento húmedo.
- Adecuado comportamiento mecánico.
- Disminuye el ruido.
- Pavimentos de rodadura cómoda.

1.4. OBJETIVOS:

1.4.1. OBJETIVO GENERAL

Análisis de la mezcla asfáltica modificada con material reciclado de llanta para su aplicación en pavimentos flexibles.

1.4.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.

- Obtener el diseño de mezcla asfáltica teniendo como componente el caucho reciclado de llantas.
- Comparación de mezcla asfáltica tradicional con el asfalto modificado con caucho de llanta recicladas.

1.5. HIPOTESIS Y VARIABLES DE ESTUDIO

1.5.1. HIPOTESIS GENERAL

Al diseñar mezcla asfáltica modificada con material reciclado de llanta. Mejora del comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica en caliente modificado, a partir de la incorporación del caucho reciclado de llantas.

1.5.2. HIPOTESIS ESPECIFICAS

- El caucho reciclado de llanta, tiene un mejor comportamiento en la mezcla asfáltica, haciendo mejor su comportamiento mecánico.
- Mejora la flexibilidad y la elasticidad a cambios de temperatura
- Mejora el comportamiento a la fatiga.
- Promover el reciclaje y reduce la contaminación ambiental.

1.6. SISTEMA DE VARIABLES

1.6.1 VARIABLE INDEPENDIENTES

Modificación de la mezcla asfáltica con caucho reciclado de llantas.

1.6.2 VARIABLE DEPENDIENTE

Propiedades mecánicas de la Mezcla asfáltica.

1.6.3 INDICADORES

- Propiedades mecánicas de la Mezcla asfáltica.
- Porcentaje de caucho reciclado de llantas.
- Estabilidad y fluencia.

1.7. UNIDAD DE ANALISIS PARA LA INVESTIGACION

1.7.1. POBLACION

La población es la totalidad del fenómeno a estudiar, donde las unidades de la población poseen una característica común, la que se estudia y da origen a los datos de esta investigación. Entonces, una población es el conjunto de todas las cosas que concuerdan con una serie determinada de especificaciones técnicas.

La población de muestra son dos: la mezcla asfáltica convencional y la otra es la mezcla asfáltica modificada con caucho reciclado de llanta, donde los agregados provienen de la cuenca del río Cabanillas ubicado en las provincias de San Román y Lampa, en el departamento de Puno.

1.7.2. MUESTRA

La muestra, es un subgrupo de la población, donde reúne todas las características y propiedades de una población y que es representativa; de la cual se obtienen conclusiones semejantes y de relevancia en relación al problema inicial planteado. Los procedimientos adecuados del muestreo permitirán la

correlación de los respectivos datos con propiedades de la muestra como indican los valores obtenidos en anexos. Tenemos como referencia las normas ASTM D – 75, AASHTO T2 Y MTC E 201 – 2000.

Las muestras de agregados son de la cuenca del río Cabanillas (Juliaca), para su posterior trituración en la planta asfáltica de Juliaca, el cemento asfáltico convencional es de procedencia de la refinería La Pampilla (Lima); estas muestras nos sirven como elementos de análisis que se recogieron durante el desarrollo de la presente investigación y sobre la base de los cuales se realizaron los diseños de mezclas asfálticas convencionales y modificadas con caucho.

La muestra está representada por el número de especímenes preparados para realizar los ensayos de laboratorio conforme al diseño cuasi – experimental planteados “los grupos intactos: conjuntos de sujetos (muestras), donde no se asignan de manera aleatoria. Sino que se emparejan antes del experimento o ya están dados por normas y/o criterios”, es así que se practicó un muestreo referencial conforme al diseño de la investigación y de acuerdo a las especificaciones de los ensayos y normas dado que estas pruebas ya fueron verificadas mediante pruebas.

A. MUESTRAS DE CONTROL, MEZCLAS ASFALTICAS CONVENCIONALES EN CALIENTE (DAC)

- Se tuvo que realizar 15 testigos para el diseño de mezcla asfáltica por el método Marshall

B. MUESTRAS DE CONTROL, MEZCLAS ASFALTICAS MODIFICADOS COM CAUCHO RECICLADO DE LLANTA (AMCROLL)

- Se tuvo que realizar 60 testigos para el diseño de mezcla asfáltica modificado por el método Marshall

1.8. TIPO DE MATERIAL EXPERIMENTAL PARA LA INVESTIGACION

La unidad experimental para este es el testigo o probeta que son los objetos a los cuales se han aplicado los experimentos y tratamientos, es en el que se han realizado las mediciones y evaluaciones de la variable de la investigación.

Las probetas, han sido preparadas a través de una combinación de agregados minerales, de acuerdo a las proporciones que se especifican en los diseños antecedentes, con cemento asfáltico PEN 120 – 150, conforme al diseño experimental planeado que se describe en adelante.

1.9. METODOLOGIA Y PLAN DE DESARROLLO

➤ TIPO DE INVESTIGACION

El tipo de investigación que se adopta es correlacional – exploratorio.

Hernández, Fernández, y Baptista (2006) afirman que la investigación correlacional asocia variables mediante un patrón predecible para un grupo o población y los estudios exploratorios se realizan cuando el objetivo es examinar un tema o problema de investigación poco estudiados.

➤ METODO DE INVESTIGACION

El método de investigación es cuantitativo.

Según Hernández, Fernández, y Baptista (2006) el enfoque cuantitativo usa la recolección de datos para probar la hipótesis con base en la medición numérica

y el análisis estadístico para establecer patrones de comportamiento y probar teorías.

➤ **DISEÑO DE INVESTIGACION**

El diseño de investigación es experimental, ya que busca verificar los resultados del comportamiento que tendrá la mezcla asfáltica con el caucho reciclado de llantas en su composición.

➤ **MATERIALES Y METODOLOGIA**

El material que se necesitara como base de la presente investigación es el caucho reciclado de llanta (CRLL), agregados, cemento asfáltico y cal hidratada.

La investigación se divide en tres etapas:

La primera etapa corresponde a la realización de las siguientes actividades:

- Revisión bibliográfica sobre los estudios relacionados al tema de estudios. También se llevara la recopilación de información respecto a teorías de asfaltos con caucho.
- Revisión bibliográfica sobre el material a ser estudiado

La segunda etapa que engloba los ensayos de caracterización.

- La ejecución del ensayo Marshall como se indica en 2.6.1.

La tercera etapa corresponde a la ejecución del informe final tesis y análisis de los datos obtenidos.

1.10. MATRIZ DE CONSISTENCIA

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPOTESIS	OPERACIONALIZACION		METODOLOGIA
PROBLEMA GENERAL:	OBJETIVOS GENERAL:	HIPOTESIS GENERAL:	VARIABLES	INDICADORES	
¿Cómo influye en el comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica en caliente, teniendo como componente material reciclado de llantas	Análisis de la mezcla asfáltica modificada con material reciclado de llanta para su aplicación en pavimentos flexibles.	Al diseñar mezcla asfáltica modificada con material reciclado de llanta. Mejora del comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica en caliente modificado, a partir de la incorporación del caucho reciclado de llantas.	-Modificación de la mezcla asfáltica con caucho reciclado de llanta. -Las propiedades mecánicas que ofrece este nuevo tipo de mezcla asfáltica modificado con caucho de neumáticos.	-% de caucho, % de cemento asfáltico, % cal hidratada y % de agregados. -Adherencia, estabilidad y flujo del ensayo Marshall.	-TIPO DE INVESTIGACION: Correlacional - Exploratorio
PROBLEMAS ESPECIFICOS:	OBJETIVOS ESPECIFICOS:	HIPOTESIS ESPECIFICAS:			
¿Diseñar una mezcla asfáltica modificada teniendo como componente el caucho reciclado de llantas?	Obtener el diseño de mezcla asfáltica teniendo como componente el caucho reciclado de llantas	El caucho reciclado de llanta, tiene un mejor comportamiento en la mezcla asfáltica, haciendo mejor su comportamiento mecánico.	-Modificación de la mezcla asfáltica con caucho reciclado de llanta. -Las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica modificada.	- % de caucho, % de cemento asfáltico, % cal hidratada y % de agregados. - Adherencia, estabilidad y flujo del ensayo Marshall.	
¿Cuáles las diferencias de una mezcla asfáltica convencional con el asfalto modificado con caucho de llanta recicladas?	Comparación de mezcla asfáltica tradicional con el asfalto modificado con caucho de llanta recicladas	-Mejora el comportamiento a la fatiga. -Reduce la contaminación ambiental. -Mejora la flexibilidad y la elasticidad a cambios de temperaturas.	-Modificación de la mezcla asfáltica con caucho reciclado de llanta. -Las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica modificada.	- % de caucho, % de cemento asfáltico, % cal hidratada y % de agregados. - Adherencia, estabilidad y flujo del ensayo Marshall.	

1.11. LIMITACION TEMATICA.

Las limitaciones que se presentaron en el presente trabajo de investigación fue la falta de documentación experimental, más aun por el componente que modificaría la mezcla asfáltica convencional y no contar en algunos casos con equipos para el diseño de mezclas asfálticas.

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.1. INTRODUCCION

Este capítulo es muy importante para el desarrollo de la investigación y tener un mejor entendimiento de nuestros estudios aportando a prevenir errores que podrían cometerse. Así como también como orientar como se llevara a cabo el estudio ampliando firmemente el horizonte de nuestro estudio y guía de nuestra investigación para centrarnos fundamentalmente en el problema planteado.

Por muchos años, investigadores y desarrolladores han experimentado con la modificación del asfalto agregando asbestos, fillers especiales, fibras vegetales, minerales y cauchos, con el fin de mejorar sus características mecánicas, es decir, su resistencia a las deformaciones por factores climatológicos y del tránsito (peso vehicular), ello dio origen a nuevos asfaltos que genéricamente fueron denominados "Asfaltos Modificados"

La modificación de asfalto es una técnica utilizada para el aprovechamiento efectivo de asfaltos en la pavimentación de vías. Los objetivos que se persiguen con la modificación de los asfaltos, es contar con ligantes más viscosos a temperaturas elevadas para reducir las deformaciones permanentes

(aguellamiento) de las mezclas que componen las capas de rodamiento, aumentando la rigidez.

Por otro lado disminuir el fisuramiento por efecto térmico a bajas temperaturas y por fatiga, aumentando su elasticidad. Finalmente contar con un ligante de mejores características adhesivas.

2.2. MEZCLAS ASFALTICAS¹

Las mezclas asfálticas se emplean en la construcción de firmes, ya sea en capas de rodadura o en capas inferiores y su función es proporcionar una superficie de rodamiento cómoda, segura y económica a los usuarios de las vías de comunicación, facilitando la circulación de los vehículos, aparte de transmitir suficientemente las cargas debidas del tráfico a la explanada para que sean soportadas por ésta.

Se tienen que considerar dos aspectos fundamentales en el diseño y proyecto de un firme:

- La Función Resistente, que determina los materiales y los espesores de las capas que habremos de emplear en su construcción.
- La Finalidad, que determina las condiciones de textura y acabado que se deben exigir a las capas superiores del firme, para que resulten seguras y confortables. A estas capas superiores de le denomina pavimento.

2.3. FUNCIONALIDAD DE LAS MEZCLAS ASFALTICAS

¹ MEZCLAS ASFALTICAS –ALEJANDRO PADILLA GUTIERREZ (2004)

Las mezclas asfálticas como ya hemos visto anteriormente sirven para soportar directamente las acciones de los neumáticos y transmitir las cargas a las capas inferiores, proporcionando unas condiciones adecuadas de rodadura, cuando se emplean en capas superficiales; y como material con resistencia simplemente estructural o mecánica en las demás capas de los firmes.

Como material simplemente estructural se pueden caracterizar de varias formas. La evaluación de parte de sus propiedades por la cohesión y el rozamiento interno es comúnmente utilizada; o por un módulo de rigidez longitudinal y un módulo transversal, o incluso por un valor de estabilidad y de deformación. Como en otros materiales hay que considerar también, la resistencia a la rotura, las leyes de fatiga y las deformaciones plásticas.

El comportamiento de la mezcla depende de circunstancias externas a ellas mismas, tales como son el tiempo de aplicación de la carga y de la temperatura. Por esta causa su caracterización y propiedades tienen que estar vinculadas a estos factores, temperatura y duración de la carga, lo que implica la necesidad del conocimiento de la reología del material.

Las cualidades funcionales del firme residen fundamentalmente en su superficie. De su acabado y de los materiales que se hayan empleado en su construcción dependen aspectos tan interesantes y preocupantes para los usuarios como:

1. La adherencia del neumático al firme.
2. Las proyecciones de agua en tiempo de lluvia.
3. El desgaste de los neumáticos.
4. El ruido en el exterior y en el interior del vehículo.
5. La comodidad y estabilidad en marcha.
6. Las cargas dinámicas del tráfico.

7. La resistencia a la rodadura (consumo de carburante).
8. El envejecimiento de los vehículos.
9. Las propiedades ópticas.

Estos aspectos funcionales del firme están principalmente asociados con la textura y la regularidad superficial del pavimento.

Actualmente la reología de las mezclas está bien estudiada tanto desde el punto de vista experimental como del teórico, con una consecuencia práctica inmediata: la mejor adaptación de las fórmulas de trabajo y de los materiales a las condiciones reales de cada pavimento. Por ejemplo, son fácilmente asequibles estos ajustes, según la región climática o las condiciones de velocidad de los vehículos, en los métodos de diseño de pavimentos.

Como resumen, se puede decir que en una mezcla asfáltica, en general, hay que optimizar las propiedades siguientes:

- Estabilidad.
- Durabilidad.
- Resistencia a la fatiga.

Si la mezcla se usa como capa de rodadura hay que añadir las propiedades siguientes:

- Resistencia al deslizamiento.
- Regularidad.
- Permeabilidad adecuada.
- Sonoridad.
- Color, entre otras.

2.4. CLASIFICACION DE LAS MEZCLAS ASFALTICAS

Existen varios parámetros de clasificación para establecer las diferencias entre las distintas mezclas y las clasificaciones pueden ser diversas:

A. POR FRACCIONES DE AGREGADO PÉTREO EMPLEADO.

- Masilla asfáltica: Polvo mineral más ligante.
- Mortero asfáltico: Agregado fino más masilla.
- Concreto asfáltico: Agregado grueso más mortero.
- Macadam asfáltico: Agregado grueso más ligante asfáltico.

B. POR LA TEMPERATURA DE PUESTA EN OBRA.

- Mezclas asfálticas en Caliente: Se fabrican con asfaltos a unas temperaturas elevadas, en el rango de los 150 grados centígrados, según la viscosidad del ligante, se calientan también los agregados, para que el asfalto no se enfríe al entrar en contacto con ellos. La puesta en obra se realiza a temperaturas muy superiores a la ambiente, pues en caso contrario, estos materiales no pueden extenderse y menos aún compactarse adecuadamente.
- Mezclas asfálticas en Frío: El ligante suele ser una emulsión asfáltica (debido a que se sigue utilizando en algunos lugares los asfaltos fluidificados), y la puesta en obra se realiza a temperatura ambiente.

C. POR LA PROPORCIÓN DE VACÍOS EN LA MEZCLA ASFÁLTICA.

Este parámetro suele ser imprescindible para que no se produzcan deformaciones plásticas como consecuencia del paso de las cargas y de las variaciones térmicas.

- Mezclas Cerradas o Densas: La proporción de vacíos no supera el 6 %.
- Mezclas Semi-cerradas o Semi-densas: La proporción de vacíos está entre el 6 % y el 10 %.
- Mezclas Abiertas: La proporción de vacíos supera el 12 %.
- Mezclas Porosas o Drenantes: La proporción de vacíos es superior al 20 %.

D. POR EL TAMAÑO MÁXIMO DEL AGREGADO PÉTREO.

- Mezclas Gruesas: Donde el tamaño máximo del agregado pétreo excede los 10 mm.
- Mezclas Finas: También llamadas micro aglomerado, pueden denominarse también morteros asfálticos, pues se trata de mezclas formadas básicamente por un árido fino incluyendo el polvo mineral y un ligante asfáltico. El tamaño máximo del agregado pétreo determina el espesor mínimo con el que ha de extenderse una mezcla que vendría a ser del doble al triple del tamaño máximo.

E. POR LA ESTRUCTURA DEL AGREGADO PÉTREO.

- Mezclas con Esqueleto mineral: Poseen un esqueleto mineral resistente, su componente de resistencia debida al rozamiento interno de los agregados es notable. Ejemplo, las mezclas abiertas y los que genéricamente se denominan concretos asfálticos, aunque también una parte de la resistencia de estos últimos, se debe a la masilla.
- Mezclas sin Esqueleto mineral: No poseen un esqueleto mineral resistente, la resistencia es debida exclusivamente a la cohesión de la masilla. Ejemplo, los diferentes tipos de masillas asfálticas.

F. POR LA GRANULOMETRÍA.

- Mezclas Continuas: Una cantidad muy distribuida de diferentes tamaños de agregado pétreo en el huso granulométrico.

Mezclas Discontinuas: Una cantidad muy limitada de tamaños de agregado pétreo en el huso granulométrico.

2.5. COMPONENTES DE UNA MEZCLA ASFALTICA²

2.5.1. ASFALTO

- **Propiedades físicas.** El asfalto es un material aglomerante, resistente, muy adhesivo, altamente impermeable y duradero; capaz de resistir altos esfuerzos instantáneos y fluir bajo acción de calor o cargas permanentes. Componente natural de la mayor parte de los petróleos, en los que existe en disolución y que se obtiene como residuo de la destilación al vacío del crudo pesado. Es una sustancia plástica que da flexibilidad controlable a la mezclas de áridos con las que se le combina usualmente. Su color varía entre el café oscuro y el negro; de consistencia sólida, semisólida o líquida, dependiendo de la temperatura a la que se exponga o por la acción de disolventes de volatilidad variable o por emulsificación.
- **Composición química.** Es de mucha utilidad un amplio conocimiento de la constitución y composición química de los asfaltos, para el control de sus propiedades físicas y así obtener un mejor funcionamiento en la pavimentación. Al igual que el petróleo crudo, el

² CARRETERAS, CALLES Y AEROPISTAS – RAUL CALLEJO RODAS (2004)

asfalto, es una mezcla de numerosos hidrocarburos parafínicos, aromáticos y compuestos heterocíclicos.

La mayoría de los hidrocarburos livianos se eliminan durante el proceso de refinación, quedando los más pesados y de moléculas complejas. Al eliminar los hidrocarburos más ligeros de un crudo, los más pesados no pueden mantenerse en disolución y se van uniendo por absorción a las partículas coloidales ya existentes, aumentando su volumen dependiendo de la destilación que se les dé.

Las moléculas más livianas constituyen el medio dispersante o fase continua. Los hidrocarburos constituyentes del asfalto forman una solución coloidal en la que un grupo de moléculas de hidrocarburos pesados (asfáltenos) se encuentran dispersas en un medio aceitoso más ligero (maltenos) compuesto por hidrocarburos saturados, resinas y aromáticos, sin que exista una separación entre estas dos fases sino una transición.

2.5.1.1. CLASIFICACIÓN DEL ASFALTO PARA PAVIMENTACIÓN.

Este tipo de asfalto se puede dividir de la siguiente manera³:

- A. **Cemento asfáltico.** Es el más ampliamente conocido y utilizado; presenta la típica apariencia de material visco-elástico rígido a bajas temperaturas y fluido a altas, por su denominación en ingles se conoce

³ ROBERTS, Freddy L; KANDHAL, Printhri S. y DUNNING, Robert L. Investigation and evaluation of ground tire rubber in hot mix. 1989

como A.C. (Asphalt Cement) y se obtiene a partir de la refinación del crudo, en la corriente de fondos de las etapas de destilación.

- B. **Asfaltos líquidos.** También denominados asfaltos rebajados o “Cut Backs” están compuestos de una base asfáltica (cemento asfáltico) y un fluidificante volátil, donde el solvente es agregado con el fin de disminuir la viscosidad del asfalto para poderlo mezclar y trabajar con los agregados.
- C. **Emulsiones asfálticas.** Son un sistema heterogéneo de dos fases inmiscibles, como son el asfalto y el agua, a la que se le incorpora un activador de superficie, tenso activo o emulsificante de base jabonosa, el cual mantiene en dispersión el sistema de fase continua (agua) y discontinua (diminutos glóbulos de asfalto). Las emulsiones asfálticas deben ser afines a la polaridad negativa o positiva, tomando el nombre de emulsiones aniónicas o catiónicas respectivamente.

2.5.2. CAUCHO RECICLADO DE LLANTA (CRLL)

Es la industria de las llantas la que emplea más polibutadieno (caucho sintético); sólo el 23% de la producción mundial se utiliza en otros productos. En las llantas, especialmente en la banda de rodadura, el polibutadieno tiene un lugar importante, ya que provee alta resistencia al desgaste y menos resistencia a la rodada que cualquier otro elastómero.

Su principal inconveniente se presenta cuando el piso está mojado. Para eliminar este obstáculo, se suele mezclar el polibutadieno con SBR (Hule butadieno-estireno) o con hule natural en cantidades variables dependiendo de la aplicación.

Así por ejemplo, las llantas de los automóviles de pasajeros se fabrican con una mezcla de butadieno con SBR, mientras que las llantas de los camiones por lo general están constituidas por mezclas de polibutadieno con hule natural.⁴

El CRLL es obtenido de las llantas en desuso de los automotores, las cuales de otra manera, no tendrían un destino diferente al de los sitios dispuestos como rellenos municipales o simplemente basureros a cielo abierto, cumpliendo un importante y peligroso papel en la creciente contaminación ambiental que nos afecta actualmente.

Existen industrias especializadas en el reciclaje de caucho, como por ejemplo aquellas que fabrican pavimentos anti-caídas de caucho reciclado. Estas empresas de reciclaje separan los elementos que componen el neumático: el caucho vulcanizado, el acero y las fibras.

Los céspedes artificiales, los pavimentos deportivos, las pistas de atletismo y el aislamiento acústico, son algunos usos que se han dado al **caucho reciclado**⁵

Esto se debe a que aproximadamente el 70% de las llantas son incineradas como combustible en hornos de producción panelera y de cemento entre otros, afectando el medio ambiente y la salud pública a causa de las emisiones de contaminantes carcinogénicos y muta génicos como lo son los compuestos orgánicos volátiles (COV's) y los hidrocarburos aromáticos polinucleares (HAP's), además de otros elementos que causan afecciones al sistema respiratorio y circulatorio.

⁴Ciencia. 2002. "hule sintético" http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/39/html/sec_17.html

⁵Inspiration.org.2010. "reciclado de caucho" <https://www.inspiration.org/cambio-climatico/reciclaje/material-reciclado/caucho>

Por otra parte, si se opta por almacenar las llantas viejas, aparte de la contaminación visual que estas generan, también se observan múltiples inconvenientes como la proliferación de roedores o insectos; dentro de los que se encuentra el mosquito transmisor del dengue y la encefalitis, cuya tasa de reproducción se ha estimado que es 4.000 veces mayor en el agua estancada de una llanta que en la naturaleza misma.

A. **Composición química de las llantas.** La llanta está compuesta principalmente de tres productos: caucho (natural y sintético), un encordado de acero y fibra textil. A su vez, el caucho usado en la fabricación de neumáticos está compuesto por un grupo de polímeros (compuestos químicos de elevado peso molecular) entre los que se cuentan el polisopreno sintético, el polibutadieno y el más común que es el estireno-butadieno, todos basados en hidrocarburos. Ver tabla1

Tabla 1. Composición y características de los diferentes tipos de llantas

MATERIAL	LLANTAS, AUTOMÓVILES Y CAMIONETAS	LLANTAS CAMIONES Y MICROBUSUS
Caucho natural	14%	27%
Caucho sintético	27%	14%
Negro de humo	28%	28%
acero	14 - 15%	14 - 15%
Fibra textil, suavizantes, óxidos, antioxidantes, etc.	16 - 17%	16 - 17%
peso promedio	8,6 kg	45.4 kg
Volumen	0.06 m3	0.36 m3

Fuente: Rubber Manufacturers Association⁶

⁶ Invias. 2012. "especificaciones"

http://www.invias.gov.co/info/manuales/Normas/especificaciones_construccion/especificaciones/Art400.htm

Se agregan además, otros materiales al caucho para mejorar sus propiedades, tales como: suavizantes, que mejoran el manejo del caucho antes de la vulcanización; óxido de Zinc y de Magnesio, comúnmente denominados activadores, que son mezclados para reducir el tiempo de vulcanización de varias a horas a pocos minutos; antioxidantes, para dar mayor vida al caucho sin que se degrade por la acción del oxígeno y el ozono; y finalmente negro de humo, especie de humo negro obtenido por combustión incompleta de gases naturales, que entrega mayor resistencia a la abrasión y a la tensión.

Aunque suelen variar según el tipo de neumáticos y el país de fabricación, los diferentes elementos químicos que componen un neumático se muestran en la tabla 2 junto a sus porcentajes respectivos. En el proceso de vulcanizado, en la fabricación de la llanta, la goma virgen es mezclada con otros productos (cauchos sintéticos, azufre y óxidos) y llevada a temperaturas que provocan cambios en su estructura química interna y en sus propiedades.

Estos cambios son, irreversibles. Posteriormente, la goma del neumático, al estar sometida a ambientes agresivos como el roce con el pavimento, se desgasta y degrada. El roce constante con el aire causa a su vez la oxidación del material, todo lo cual impide que la goma granulada recuperada a partir de neumáticos usados alcance los niveles de calidad de la goma virgen original. Este es el principal motivo por el cual no es posible reciclar neumáticos para utilizarlos como materia prima.

Tabla 2. Análisis químico de la llanta

ELEMENTO	COMPOSICIÓN
Carbono (C)	70%
Hidrogeno (H)	7%
Azufre (S)	1.3%
Cloro (Cl)	0.2 - 0.6 %
Hierro (Fe)	15%
Oxido de Zinc (ZnO)	2%
Dioxido de Silicio (SiO ₂)	5%
Cromo (Cr)	97 ppm
Niquel (Ni)	77 ppm
Plomo (Pb)	60 - 760 ppm
Cadmio	5 - 10 ppm
Talio	0.2 - 0.3 ppm

Fuente: *Combustibles alternativos, Holderbank 1997*⁷

B. Influencia del CRLL en el asfalto modificado. El caucho de llanta se ha convertido en un elemento útil y económico en la elaboración de mezclas asfálticas gracias al creciente aumento de llantas desechadas en áreas metropolitanas. Algunas ventajas y desventajas del uso del CRLL en las mezclas asfálticas se presentan a continuación.⁸

- El caucho molido al ser vulcanizado para resistir calor y sobrecalentamiento elimina los problemas encontrados con el polímero virgen.
- No presenta solubilidad, a diferencia del caucho natural este no cambia dentro del cemento asfáltico al ser sobrecalentado.
- Al ser mezclado con el cemento asfáltico a altas temperaturas atrae

⁷ Invias.2012. "especificaciones"

http://www.invias.gov.co/info/manuales/Normas/especificaciones_construccion/especificaciones/Art400.htm

⁸ ALCALDIA MAYOR DE BOGOTA DC. INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO y UNIVERSIDAD DE LOS ANDES. Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas. Bogotá. 2002.

componentes livianos de este último hasta producir una partícula hinchada que se enlaza dentro de la matriz del ligante, generando un manto asfalto- caucho más resistente al fisuramiento.

Finalmente el CRLC posee valiosos componentes que pueden contribuir al buen desempeño del asfalto. Algunos de estos son:

- Negro de humo: este componente se destaca por su acción específica contra el desgaste de las llantas al contacto con la superficie, permitiendo quintuplicar la duración de la llanta. Considerando como un antioxidante, este componente reduce el desgaste de la llanta al incrementar la durabilidad del caucho. En la mezcla asfáltica ha demostrado aumentar las propiedades de refuerzo del ligante y ayudar a disminuir el envejecimiento.
- Antioxidantes: compuestos que retardan el deterioro del caucho natural causado por la oxidación. Algunas de las sustancias usadas son los estabilizadores del caucho sintético, principalmente de los polímeros de butadieno, en el momento de la preparación; el CRLC contiene más del 20% de este compuesto.
- Aminas: Son adicionadas durante el proceso de vulcanizado y están estrechamente relacionadas con los de anti adherencia. Las aminas aromáticas evitan el endurecimiento progresivo del caucho, el aumento de su fragilidad y la pérdida de la elasticidad.
- Aceites aromáticos: Estos son similares a los agentes rejuvenecedores los cuales prolongan la vida del asfalto-caucho.

- c. **Proceso de obtención del CRLL.** Existen varias maneras de producir el CRLL, cada proceso debe evaluarse según los costos, distribuciones de tamaño de partícula y morfología dependiendo del producto final que se quiera obtener. Estos procesos requieren una cantidad suficiente de llantas en desuso y deben garantizar que el CRLL esté libre de aceros, fibras y otros materiales que afecten negativamente la calidad del producto
- **Obtención por reencauche de llantas.** Es el proceso más común y más simple para producir CRLL. Los neumáticos a reencauchar (por lo general de camiones y autobuses) son sometidos a un proceso de preparación en el que son raspados por cuchillas, produciéndose de esta manera pequeños trozos de caucho. Las partículas resultantes son de varios tamaños y formas, aunque en general se puede decir que son redondas con diámetros entre 0.3 y 2.5 cm. En este proceso la presencia de metal o fibra en los pequeños trozos de producto final es casi nula; lo que es muy bueno, sin embargo, el volumen y continuidad del producto total obtenido es limitado debido al bajo porcentaje que se recupera por llanta y al número de llantas reencauchadas.
 - **Obtención por molienda ambiental.** Se lleva a cabo en molinos abiertos como los molinos de martillo, los cuales operan a temperatura ambiente y en donde la reducción de las partículas es cumplida por acciones de rasgado, desgarre o aplastamiento. En este proceso después de pasar por una serie de molinos abiertos, el material es llevado por una cinta transportadora hacia un separador magnético, en

donde se le retira cualquier alambre u otras partículas de acero. También se debe contar con un sistema para eliminar tejidos y fibras presentes en la llanta, así como piedras o demás materiales inertes. La obtención de CRLL por molienda ambiental es bastante eficaz siendo el método más antiguo utilizado para producir material grueso de caucho y normalmente el menos costoso para producir CRLL en tamaños superiores a la malla 40. Un molino comúnmente utilizado es el conocido como 'cracker', el cual consiste en dos rodillos con estrías superficiales los cuales giran a diferentes proporciones de velocidad logrando una acción de molido con un alto grado de eficacia.

- **Obtención por molienda criogénica.** En este proceso grandes trozos de llanta se llevan hasta temperaturas criogénicas por el uso de nitrógeno líquido (LN_2). Esto causa que el caucho se ponga muy quebradizo y sea fracturado fácilmente en un molino de martillo. La superficie resultante es muy limpia, lisa y con bordes rectos, con lo que se obtiene una menor área superficial de partícula si se le compara con la obtenida en la molienda ambiental.

Además de las operaciones de enfriamiento y molienda también es necesario un sistema de separación de fibra; en general se puede decir que el costo de capital de inversión respecto al proceso ambiente es menor, porque se necesitan menos molinos y equipos relacionados con el manejo del caucho, sin embargo, los costos de operación y en especial debido al costo del nitrógeno líquido, hace que los productos

criogénicos sean más costoso que el CRLL producido en proceso ambiente, sobre todo para tamaños de partículas más finos que la malla 40 (425 u.m).

- **Obtención por molienda húmeda.** En este proceso el caucho después de una reducción inicial entre malla 10 y 20, es pasado junto con un líquido a un molino de bolas produciéndose de esta manera unas partículas muy uniformes con gran área superficial. En este sistema es indispensable un equipo adicional de secado para controlar el contenido de humedad, el cual no se requería para los dos procesos anteriores; con esta tecnología se puede obtener CRLL uniforme y de buena calidad.

2.5.3. AGREGADOS PETREOS⁹

Son materiales granulares sólidos inertes que se emplean en los firmes de las carreteras con o sin adición de elementos activos y con granulometrías adecuadas; se utilizan para la fabricación de productos artificiales resistentes, mediante su mezcla con materiales aglomerantes de activación hidráulica (cementos, cales, etc.) o con ligantes asfálticos.

2.5.3.1 TIPOS DE AGREGADOS PÉTREOS.

El tipo de agregado pétreo se puede determinar, de acuerdo a la procedencia y a la técnica empleada para su aprovechamiento, se pueden clasificar en los siguientes tipos:

⁹ MEZCLAS ASFALTICAS – ALEJANDRO PADILLA RODRIGUEZ (2004)

- **Agregados Naturales.** Son aquellos que se utilizan solamente después de una modificación de su distribución de tamaño para adaptarse a las exigencias según su disposición final.
- **Agregados de Trituración.** Son aquellos que se obtienen de la trituración de diferentes rocas de cantera o de las granulometrías de rechazo de los agregados naturales. Se incluyen todos los materiales de cantera cuyas propiedades físicas sean adecuadas.
- **Agregados Artificiales.** Son los subproductos de procesos industriales, como ciertas escorias o materiales procedentes de demoliciones, utilizables y reciclables.

2.5.3.2 PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS PÉTREOS.

Las propiedades de los agregados se pueden conceptualizar bajo dos puntos de vista: uno como elementos aislados o individuales y otro como conjunto.

- A. **Propiedades individuales.** Los agregados como elementos aislados tienen propiedades físicas macroscópicas: dimensión, forma, redondez, densidad, propiedades de superficie, porosidad, permeabilidad, dureza superficial, módulo elástico, conductividad térmica, dilatación, etc. Asimismo presentan unas propiedades químicas macroscópicas: solubilidad, alterabilidad, hinchamiento, etc.
- B. **Propiedades de conjunto.** Las propiedades de conjunto de los agregados pétreos son sus características como un todo. La distribución de la redondez o desgaste de los agregados es una propiedad de gran interés, por cuanto va influir sobre el rozamiento entre los elementos del agregado.

2.5.3.3 CONSIDERACIONES ACERCA DEL EMPLEO DE LOS AGREGADOS PÉTREOS.

Cuando se pretende hacer uso de los agregados pétreos para la construcción de pavimentos se deben considerar algunos aspectos fundamentales para su buen desempeño a la hora de formar parte en alguna de las capas del firme y principalmente en la elaboración de las mezclas asfálticas.

- A. **Naturaleza e identificación:** Evaluación de la naturaleza petrográfica de los agregados, grado de alteración de los componentes minerales, porosidad y propiedades químicas.
- B. **Propiedades geométricas:** Principal y básicamente la forma y angulosidad de las partículas; con relación al conjunto del esqueleto mineral se estudia la distribución granulométrica.
- C. **Propiedades mecánicas:** Engloban los parámetros básicos de resistencia al desgaste y al pulimento.
- D. **Ausencia de impurezas:** Es fundamental que los agregados a emplear en la construcción de pavimentos estén libres de impurezas capaces de afectar el buen comportamiento de las capas. El empleo de agregados sucios en la construcción de un pavimento, puede ser una causa suficiente para provocar su degradación.
- E. **Inalterabilidad:** Es imprescindible la evaluación de las posibles degradaciones que puedan sufrir los agregados pétreos que se van a utilizar en una obra; así, los materiales evolutivos han de ser empleados con

especiales precauciones para evitar comportamientos anómalos que puedan afectar la vida útil de las capas.

- F. **Adhesividad**: Los agregados pétreos han de ser afines con los ligantes asfálticos que vayan a ser empleados en la construcción del pavimento, y en caso de problemas de afinidad, será necesario el uso de activantes, para garantizar el buen comportamiento de las mezclas asfálticas.

Clasificación del agregado pétreo de acuerdo a su tamaño.

2.5.3.4 AGREGADO GRUESO

Según el Sistema de Clasificación de Suelos SUCS, se define como agregado grueso, a la parte del agregado pétreo total que queda retenido en el tamiz #4.

Características y propiedades deseables de los agregados gruesos para su utilización en las mezclas asfálticas.

- A. **Granulometría**. La granulometría es la característica física principal y fundamental de todo conjunto de partículas porque influye de forma muy importante en la resistencia mecánica del conjunto (esqueleto mineral). Normalmente se utilizan granulometrías sensiblemente continuas, a fin de conseguir la máxima compacidad del conjunto, aunque también se emplean granulometrías discontinuas en el caso de algunas mezclas asfálticas. Para encajar una granulometría dentro de algún Huso normalizado se parte de fracciones uniformes que se mezclan en las proporciones adecuadas. Los análisis granulométricos se realizan por tamizado; el procedimiento es análogo al que se emplea para suelos.

El tamaño máximo de los agregados viene normalmente limitado por consideraciones relativas al espesor de la capa extendida, trabajabilidad, segregación, etc. Por otra parte la influencia de las partículas finas obliga normalmente a limitar su porcentaje y su plasticidad. En las mezclas asfálticas tiene una especial importancia la fracción de tamaño inferior a la malla 200, llamada como se ha indicado, polvo mineral o fíller, pues algunas características relevantes de la mezcla dependen del mástico formado por la unión del polvo mineral y del ligante asfáltico.

B. Rozamiento interno. La resistencia a la deformación o capacidad de soporte de una capa de firme depende esencialmente del rozamiento interno del esqueleto mineral y, en su caso, de la cohesión que proporciona el eventual ligante o conglomerante. El rozamiento interno aumenta con partículas angulosas y de textura superficial áspera como por ejemplo los agregados triturados. También influye de forma importante la granulometría del agregado y el porcentaje de huecos del material compactado. A mayores densidades corresponden generalmente mayores resistencias mecánicas, por lo que la compactación es un factor de primer orden.

La cohesión debe confiarse exclusivamente al ligante asfáltico o conglomerante. La cohesión entre las partículas suele ser despreciable, y cuando existe se debe únicamente a la plasticidad de la fracción fina, y en general es más nociva que útil. Sólo interesa una cierta plasticidad de los finos y muy reducida de todas formas, cuando se trata de capas granulares no revestidas en caminos de baja intensidad de tráfico.

C. Angulosidad del agregado grueso. La angulosidad del agregado grueso beneficia al esqueleto mineral debido al rozamiento interno que se genera entre las partículas, esto contribuye a que las partículas gruesas permanezcan en su lugar cuando el pavimento entre en funcionamiento y no se produzcan desplazamientos. El empleo de agregados triturados trae consigo el aumento de la angulosidad de las partículas. La mayoría de las normativas establecen un mínimo de angulosidad del agregado grueso, dependiendo de las condiciones de tráfico al que va a estar expuesto el pavimento.

D. Forma del agregado grueso. Las exigencias de forma para el agregado grueso varían ligeramente, con un mismo tráfico, para las mezclas asfálticas. Lo ideal es que las partículas presenten formas cuboides, evitando o restringiendo las formas planas, alargadas y en forma de lajas, ya que como lo hemos dicho antes, este tipo de forma es muy susceptible a quebrarse bajo condiciones de carga de tráfico, lo que modifica las granulometrías y las propiedades iniciales de las mezclas.

E. Resistencia a la fragmentación. Los agregados pétreos deben de cumplir con un cierto mínimo de resistencia a la fragmentación o al desgaste, lo que da una orientación del comportamiento que tendrá dicho agregado dentro de la mezcla asfáltica al entrar en servicio el pavimento.

F. Adhesividad del agregado grueso. El agregado grueso tiene un comportamiento específico respecto a la adhesividad y a la resistencia al desplazamiento. Se preconiza la comprobación de la adhesividad agregado.

2.5.3.5 AGREGADO FINO

Según el Sistema de Clasificación de Suelos SUCS, se define como agregado fino, a la parte del agregado pétreo total que pasa el tamiz #4 y queda retenido en el tamiz #200.

Características y propiedades deseables de los Agregados Finos para su utilización en las mezclas asfálticas.

A. Procedencia del agregado fino. El agregado fino deberá proceder de la trituración de piedra de cantera o grava natural en su totalidad, o en parte de yacimientos naturales. Existen limitaciones en la proporción de agregado fino no triturado a emplear en las mezclas. Regularmente se emplea arena natural en la elaboración de mezclas asfálticas que van a ser empleadas en pavimentos con una baja intensidad de tráfico y a bajos niveles de cargas, se deberá señalar la proporción máxima de arena natural no triturada, a emplear en la mezcla, la cual regularmente no será superior al 10% de la masa total del agregado combinado y sin que supere el porcentaje de agregado fino triturado empleado en la mezcla, la limitación de la cantidad de arena rodada o no triturada que puede incorporarse a la mezcla, se hace por temor a una disminución de la rigidez final de ésta. Hay autores y administraciones que consideran que una proporción del orden del 10% puede mejorar al tiempo la manejabilidad, la compacidad e incluso la estabilidad de la mezcla.

B. Limpieza del agregado fino. El agregado fino deberá estar exento de terrones de arcilla, materia vegetal, marga y otras materias extrañas, para evitar que se presenten comportamientos extraños del material dentro de la

mezcla, tales como reacciones químicas, pérdida de estabilidad de la mezcla, abundamientos, entre otros.

C. Resistencia a la fragmentación del agregado fino. El material que se triture para obtener agregado fino deberá cumplir las condiciones exigidas al agregado grueso sobre el coeficiente de desgaste Los Ángeles. Se recomienda usar agregado fino de otra naturaleza, que mejore alguna característica, especialmente la adhesividad, pero en cualquier caso procederá de agregado grueso con coeficiente de desgaste de Los Ángeles inferior a 25 para capas de rodadura e intermedias y a 30 para capas de base.

D. Adhesividad del agregado fino. Respecto a los fenómenos de adhesividad agregado fino – ligante, hay que tener en cuenta que las acciones químicas o químico – físicas en las partículas de menor tamaño son más complejas. Su mayor superficie específica, tiene facilidad para acumular humedad y gran heterogeneidad de su naturaleza determinan una mayor sensibilidad a toda clase de transformaciones químicas, fenómenos polares y de adhesividad, absorción, etc.

2.5.3.6 POLVO MINERAL (FILLER)

Según el Sistema de Clasificación de Suelos SUCS, se define como polvo mineral, a la parte del agregado pétreo total que pasa el tamiz #200. El filler o polvo mineral de aportación es un producto comercial de naturaleza pulverulenta (cemento normalmente o cenizas volantes de central térmica) o un polvo en general calizo, especialmente preparado para utilizarlo en mastico para mezclas asfálticas.

Cuando se trata de un producto comercial, se garantiza perfectamente su control y se conocen sus propiedades tanto físicas como químicas y su futuro comportamiento en la mezcla.

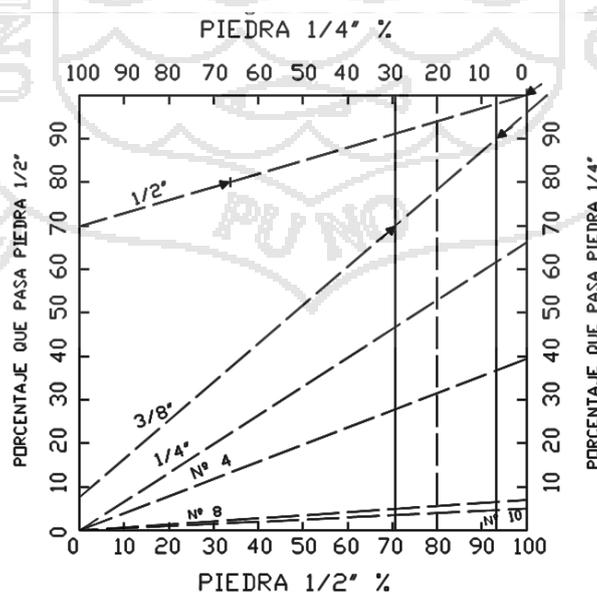
2.5.3.7 MEZCLA DE AGREGADOS

Uno de los problemas más frecuentes es mezclar los agregados para lograr uno de mejor calidad que cumpla con los requisitos de una determinada especificación.

a) Mezcla de dos agregados.

O también llamado método gráfico del cuadrado, trata de un cuadrado en el cual se pone porcentaje de 100 unidades por lado opuestos para dos suelos (lado horizontal), los porcentajes que pasan las mallas de los materiales 1 y 2 aisladamente (escala vertical). muestra las curvas granulométricas de dos suelos 1 y 2, que se desea mezclar para lograr un tercero que este dentro del uso granulométrico de las especificaciones.

FIGURA 01 Grafico del Método del Cuadrado



El procedimiento consiste en marcar en cada escala vertical los porcentajes que pasan correspondientes a cada tipo de malla en ambos suelos, los que luego se unen representando así los suelos 1 y 2 en cada malla. Luego se procede a marcar sobre estas líneas, los límites del uso granulométrico que representan los porcentajes que pasan por cada una de las mallas contenidos en el uso, de tal manera que la porción comprendida entre la menor separación de todas estas marcas, representa todas las posibles combinaciones de los suelos 1 y 2, que cumple con las especificaciones.

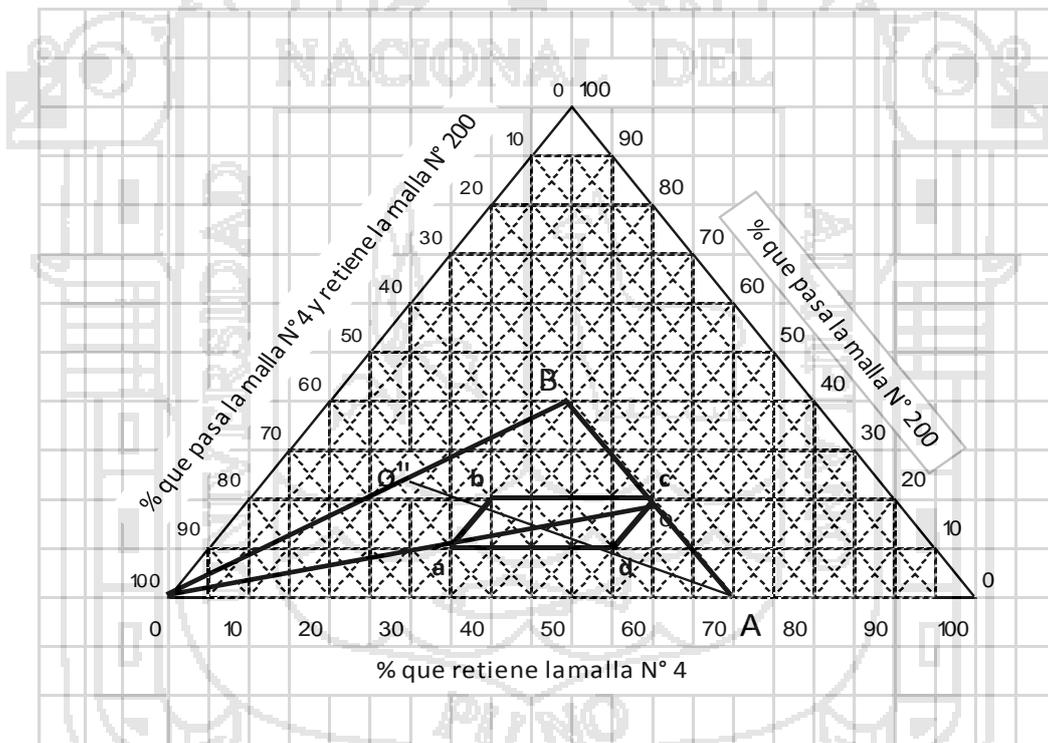
b) Mezcla de tres agregados.

Se utiliza el método del triángulo tomando la misma referencia anterior. Se tiene tres suelos A, B y C que se desea mezclar para obtener un cuarto que cumpla las especificaciones. El procedimiento consiste en construir un triángulo equilátero de 100 unidades por lado, correspondiente a los porcentajes que retiene la malla número 4, y los que pasan la malla número 4 y retenidos en la malla número 200, y los que pasan la malla 200. Dentro de este triángulo se ubican los puntos A, B y C correspondientes a cada tipo de suelo que interviene en la mezcla y lo mismo se hace con los límites del uso granulométrico, obteniéndose así un paralelogramo (abcd) cualquier punto dentro del triángulo ABC, representa una mezcla de los tres suelos, pero además si ese punto cae dentro del paralelogramo abcd, cumplirá además la especificación dada. Siendo el punto de mezcla óptima el que se localiza en el centro de gravedad del paralelogramo (punto o), se consigue la proporción de la mezcla de los tres suelos de la siguiente manera:

Se une el punto C con el punto o y se prolonga la línea hasta "o" sobre la línea que une a los suelos A y B. La relación $oo'/o'C$ dará la proporción con la que interviene

el suelo C en la mezcla. Del mismo modo, la relación B_0'/AB multiplica por el completo de la proporción con la que interviene C, dará la proporción con que interviene A. finalmente, el complemento de las dos anteriores será la proporción con la que interviene B en la mezcla. Esas proporciones multiplicadas por los correspondientes porcentajes de cada suelo que pasan las respectivas mallas, permitirá obtener la curva granulométrica de la mezcla.

FIGURA 02 Grafico del Método del Triangulo



2.6. DISEÑO DE MEZCLAS ASFALTICAS MEDIANTE EL METODO MARSHALL¹⁰

El concepto del método Marshall para diseño de mezclas de pavimentos fue formulado por Bruce Marshall, ingeniero de asfaltos del departamento de autopistas del estado de Mississippi. Este método es aplicable solo a mezclas asfálticas en caliente para pavimentación que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1") o menor. A continuación se presenta una descripción general de los procedimientos seguidos en el Diseño Marshall de Mezclas. El procedimiento completo y detallado que se debe ser seguido se encuentra en la norma AASHTO T 245 (o ASTM D1559)

2.6.1. PREPARACION PARA EFECTUAR LOS PROCEDIMIENTOS MARSHALL

Existen diferentes agregados y asfaltos que presentan diferentes características. Estas características tienen un impacto directo sobre la naturaleza misma del pavimento. El primer paso en el método de diseño, entonces, es determinar las cualidades (estabilidad, durabilidad, trabajabilidad, resistencia al deslizamiento, etc.) que debe tener la mezcla de pavimentación y seleccionar un tipo de agregado y un tipo compatible de asfalto que puedan combinarse para producir esas cualidades. Una vez hecho esto, se puede empezar con la preparación de los ensayos.

¹⁰ PAVIMENTOS FLEXIBLES – UNI – ING.NESTOR HUAMAN GUERRERO (2004)

2.6.1.1. SELECCION DE LAS MUESTRAS DE MATERIAL

La primera preparación para los ensayos consta de reunir muestras del asfalto y del agregado que va a ser usados en la mezcla de pavimentación. Es importante que las muestras de asfalto tengan características idénticas a las el asfalto que va a ser usado en la mezcla final. Lo mismo debe ocurrir con las muestras de agregado. La razón es simple: los datos extraídos de los procedimientos de diseño de mezclas determinar la fórmula o “receta” para la mezcla de pavimentación. La receta será exacta solamente si los ingredientes ensayados en el laboratorio tienen características idénticas a los ingredientes usados en el producto final.

Una amplia variedad de problemas graves, que van desde una mala trabajabilidad de la mezcla hasta una falla prematura del pavimento, son el resultado histórico de variaciones ocurridas entre los materiales ensayados en el laboratorio y los materiales usados en la realidad.

2.6.1.2. PREPARACIÓN DEL AGREGADO

La relación viscosidad-temperatura del cemento asfáltico que va a ser usado debe ser ya conocida para establecer las temperaturas de mezclado y compactación en el laboratorio. En consecuencia, los procedimientos preliminares se enfocan hacia el agregado, con el propósito de identificar exactamente sus características. Estos procedimientos incluyen secar el agregado, determinar su peso específico, y efectuar un análisis granulométrico.

- Secando el Agregado: El Método Marshall requiere que los agregados ensayados estén libres de humedad, tan práctico como sea posible. Esto evita que la humedad afecte los resultados de los ensayos.

Una muestra de cada agregado a ser ensayado se coloca en una bandeja, por separado, y se calienta en un horno a una temperatura de 110° C. Hasta que el peso de la muestra permanezca constante.

- Análisis granulométrico: El análisis granulométrico es un procedimiento para identificar las proporciones de partículas de tamaño diferente en las muestras del agregado. Esta información es importante porque las especificaciones de la mezcla deben estipular las proporciones necesarias de partículas de agregado de tamaño diferente, para producir una mezcla en caliente final con las características deseadas.
- Determinación del Peso Específico: El peso específico de una sustancia es la proporción peso - volumen de una unidad de esa sustancia comparada con la proporción peso - volumen de una unidad igual de agua. El peso específico de una muestra de agregado es determinado al comparar el peso de un volumen dado de agregado con el peso de un volumen igual de agua, a la misma temperatura. El peso específico del agregado se expresa en múltiplos del peso específico del agua (la cual siempre tiene un valor de 1).

2.6.1.3. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS (PROBETAS) DE ENSAYO

Las probetas de ensayo de las posibles mezclas de pavimentación son preparadas haciendo que cada una contenga una ligera cantidad diferente de asfalto, las

probetas son preparadas para un peso de 1200 gr. El margen de contenidos de asfalto usado en las briquetas de ensayo está determinado con base en experiencia previa con los agregados de la mezcla. Este margen le da al laboratorio un punto de partida para determinar el contenido exacto de asfalto en la mezcla final. La proporción de agregado en las mezclas está formulada por los resultados del análisis granulométrico.

Las muestras son preparadas de la siguiente manera:

- A. El asfalto y el agregado se calientan completamente hasta que todas las partículas del agregado estén revestidas. Esto simula los procesos de calentamiento y mezclado que ocurren en la planta.
- B. El porcentaje de asfalto se determina haciendo tres muestras de cada proporción de asfalto, las proporciones de asfalto deben de aumentar en 0.5% de cada porcentaje diferente. Las mezclas asfálticas calientes se colocan en los moldes pre-calentados Marshall como preparación para la compactación, en donde se usa el martillo Marshall de compactación, el cual también es calentado para que no enfríe la superficie de la mezcla al golpearla.
- C. Las briquetas son compactadas mediante golpes del martillo Marshall de compactación. El número de golpes del martillo (75) depende de la cantidad de tránsito para la cual está siendo diseñada. Ambas caras de cada biqueta reciben el mismo número de golpes. Después de completar la compactación las probetas son enfriadas y extraídas de los moldes.

2.6.1.4. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO MARSHALL

Existen tres procedimientos de ensayo en el método del ensayo Marshall. Estos son: determinación del peso específico total, medición de la estabilidad Marshall, y análisis de la densidad y el contenido de vacíos de las probetas.

A. DETERMINACIÓN DEL PESO ESPECIFICO TOTAL

El peso específico total de cada probeta se determina tan pronto como las probetas recién compactadas se hayan enfriado a la temperatura ambiente. Esta medición de peso específico es esencial para un análisis preciso de densidad-vacíos. El peso específico total se determina usando el procedimiento descrito en la norma AASHTO T 166. 73

B. ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUENCIA

El ensayo de estabilidad está dirigido a medir la resistencia a la deformación de la mezcla. La fluencia mide la deformación, bajo carga que ocurre en la mezcla.

El procedimiento de los ensayos es el siguiente:

- Las probetas son calentadas en el baño de agua a 60° C (140° F). Esta temperatura representa, normalmente, la temperatura más caliente que un pavimento en servicio va a experimentar (Baño María).

- La probeta es removida del baño, secada, y colocada rápidamente en el aparato Marshall. El aparato consiste de un dispositivo que aplica a una carga sobre la probeta y de unos medidores de carga y deformación (fluencia).

- La carga del ensayo es aplicada a la probeta a una velocidad constante de 51 mm (2 pulgadas) por minuto hasta que la muestra falle. La falla está definida como la carga máxima que la briqueta puede resistir.
- La carga de falla se registra como el valor de estabilidad Marshall y la lectura del medidor de fluencia se registra como la fluencia.

- VALOR DE ESTABILIDAD MARSHALL

El valor de estabilidad Marshall es una medida de la carga bajo la cual una probeta cede o falla totalmente. Durante un ensayo, cuando la carga es aplicada lentamente, los cabezales superior e inferior del aparato se acercan, y la carga sobre la briqueta aumenta al igual que la lectura en el indicador del cuadrante. Luego se suspende la carga una vez se obtiene la carga máxima. La carga máxima indicada por el medidor es el valor de Estabilidad Marshall.

Debido a que la estabilidad Marshall indica la resistencia de una mezcla a la deformación existe una tendencia a pensar que si un valor de estabilidad es bueno, entonces un valor más alto será mucho mejor.

Para muchos materiales de ingeniería, la resistencia del material es, frecuentemente, una medida de su calidad; sin embargo, este no es necesariamente el caso de las mezclas asfálticas en caliente. Las estabilidades extremadamente altas se obtienen a costa de durabilidad.

- VALOR DE FLUENCIA MARSHALL

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.

Las mezclas que tienen valores bajos de fluencia y valores muy altos de estabilidad Marshall son consideradas demasiado frágiles y rígidas para un pavimento en servicio. Aquellas que tienen valores altos de fluencia son consideradas demasiado plásticas y tiene tendencia a deformarse bajo las cargas del tránsito.

C. ANALISIS DE DENSIDAD Y VACIOS

Una vez que se completan los ensayos de estabilidad y fluencia, se procede a efectuar un análisis de densidad y vacíos para cada serie de Probetas de prueba. El propósito del análisis es el de determinar el porcentaje de vacíos en la mezcla compactada.

Los vacíos son las pequeñas bolsas de aire que se encuentran entre las partículas de agregado revestidas de asfalto. El porcentaje de vacíos se calcula a partir del peso específico total de cada probeta compactada y del peso específico teórico de la mezcla de pavimentación (sin vacíos). Este último puede ser calculado a partir de los pesos específicos del asfalto y el agregado de la mezcla, con un margen apropiado para tener en cuenta la cantidad de asfalto absorbido por el agregado, o directamente mediante un ensayo normalizado (AASHTO T 2091) efectuado sobre la muestra de mezcla sin compactar. El peso específico total de las probetas compactadas se determina pesando las probetas en aire y en agua.

Análisis de Peso Unitario El peso unitario promedio para cada muestra se determina multiplicando el peso específico total de la mezcla por 1000 Kg/m³ (62.4 lb/ft³).

- Análisis de VMA: Los vacíos en el agregado mineral (VMA) está definidos por el espacio intergranular de vacíos que se encuentra entre las partículas de agregado de la mezcla de pavimentación compactada, incluyendo los vacíos de aire y el contenido efectivo de asfalto, y se expresan como un porcentaje del volumen total de la mezcla. El VMA es calculado con base en el peso específico total del agregado y se expresa como un porcentaje del volumen total de la mezcla compactada. Por lo tanto, el VMA puede ser calculado al restar el volumen de agregado (determinado mediante el peso específico total del agregado) del volumen total de la mezcla compactada.
- Análisis de VLLA: Los vacíos llenos de asfalto, son el porcentaje de vacíos inter granulares entre las partículas de agregado (VMA) que se encuentran llenos de asfalto. El VMA abarca asfalto y aire, y por lo tanto, el VLLA se calcula al restar los vacíos de aire de VMA, y luego dividiendo por el VMA, y expresando el valor final como un porcentaje.

D. ANALISIS DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO MARSHALL

Los técnicos del laboratorio trazan los resultados del ensayo Marshall en gráficos. Para poder entender las características particulares de cada probeta usada en la serie.

Mediante el estudio de las gráficas ellos pueden determinar cuál probeta. De la serie cumple mejor los criterios establecidos para el pavimento terminado. Las proporciones de asfalto y agregado en esta probeta se convierten en las

proporciones usadas en la mezcla final. Los resultados de los ensayos se trazan en gráficos, están son tendencias en las relaciones entre el contenido de asfalto y las propiedades de la mezcla.

2.7. ESPECIFICACIONES NORMATIVAS PARA LA METODOLOGIA.

2.7.1. AGREGADOS MINERALES GRUESOS

Los agregados gruesos, deben cumplir con los siguientes requerimientos:

Tabla N° 03

Tabla N° 410-1

Requerimientos para los Agregados Gruesos

Ensayos	Norma	Requerimiento	
		Altitud (m.s.n.m.)	
		< 3000	> 3000
Durabilidad (al Sulfato de Sodio)	MTC E 209	12% máx.	10% máx.
Durabilidad (al Sulfato de Magnesio)		18 máx.	15% máx.
Abrasión Los Ángeles	MTC E 207	40% máx.	35% máx.
Índice de Durabilidad	MTC E 214	35% min.	35% min.
Partículas chatas y alargadas	MTC E 221	10% máx.	10% máx.
Caras fracturadas	MTC E 210	Según Tabla 410-4	
Sales Solubles Totales	MTC E 219	0.5% máx.	0.5% máx.
Absorción	MTC E 206	1.00%	Según Diseño
Adherencia	MTC E 519	+95	

FUENTE: Manual de Carreteras-Ensayo de Materiales para Carreteras - MTC.

2.7.2. AGREGADOS MINERALES FINOS

Los agregados finos, deben cumplir con los siguientes requerimientos:

Tabla N° 04

Tabla N° 410-3

Requerimientos para los Agregados Finos

Ensayos	Norma	Requerimiento	
		Altitud (m.s.n.m.)	
		< 3000	> 3000
Equivalente de Arena	MTC E 209	Según Tabla 410-5	
Angularidad del agregado fino	MTC E 222	Según Tabla 410-6	
Adhesividad (Riedel Weber)	MTC E 220	4% min.	6% min.
Índice de Plasticidad (malla N°40)	MTC E 111	NP	NP
Índice de Durabilidad	MTC E 214	35 min.	35 min.
Índice de Plasticidad (malla N°200)	MTC E 111	Max 4	NP
Sales Solubles Totales	MTC E 219	0.5% máx.	0.5% máx.
Absorción	MTC E 205	0.50%	Según Diseño

FUENTE: Manual de Carreteras-Ensayo de Materiales para Carreteras - MTC.

Tabla N° 05

Tabla N° 410-4

Requerimientos para Caras Fracturadas

Tráfico en Ejes Equivalentes (millones)	Espesor de Capa	
	< 100 mm	> 100 mm
≤ 3	65/40	50/30
> 3 - 30	85/50	60/40
> 30	100/80	90/70

Nota: La notación "85/80" indica que el 85% del agregado grueso tiene una cara fracturada y que el 80% tiene dos caras fracturadas.

FUENTE: Manual de Carreteras-Ensayo de Materiales para Carreteras - MTC.

Tabla N° 06

Tabla N° 410-5

Requerimientos del Equivalente de Arena

Tráfico en Ejes Equivalentes (millones)	Porcentaje de Equivalente Arena (mínimo)
≤ 3	45
> 3 - 30	50
> 30	55

FUENTE: Manual de Carreteras-Ensayo de Materiales para Carreteras - MTC.

2.7.3. MEZCLA DE LOS AGREGADOS

La gradación de la mezcla asfáltica normal (MAC) deberá responder a alguno de los siguientes husos granulométricos.

Tabla N° 07

Granulometría de mezcla de agregados.

Tamiz	Porcentaje que pasa		
	MAC -1	MAC-2	MAC-3
25,0 mm (1")	100	-	-
19,0 mm (3/4")	80 - 100	100	-
12,5 mm (1/2")	67- 85	80 - 100	-
9,5 mm (3/8")	60 - 77	70 - 88	100
4,75 mm (N° 4)	43 - 54	51 - 68	65 - 87
2,00 mm (N° 10)	29 - 45	38 - 52	43 - 61
425 mm (N° 40)	14 - 25	17- 28	16 - 29
180 mm (N° 80)	8 -17	8 -17	9 -19
75 mm (N° 200)	04 - 8	04 - 8	05 - 10

FUENTE: Manual de Carreteras-Ensayo de Materiales para Carreteras - MTC.

2.7.4. FILLER O POLVO MINERAL

El filler o relleno de origen mineral, que sea necesario emplear como relleno de vacíos, espesante del asfalto o como mejorador de adherencia al par agregado-asfalto, podrá ser de preferencia cal hidratada, no plástica que deberá cumplir la norma AASHTO M-303.

Tabla N° 08

Porcentaje retenido de filler

Malla	% Retenido(en peso)
Residuo máximo en la malla de 600 μm (N° 30)	3%
Residuo máximo en la malla de 75 μm (N° 200)	20%

FUENTE: Manual de Carreteras-Ensayo de Materiales para Carreteras - MTC.

2.7.5. MEZCLA DE AGREGADOS

Las características de calidad de la mezcla asfáltica, deberán estar de acuerdo con las exigencias para mezclas de concreto bituminoso, de acuerdo al diseño del proyecto y lo indicado por el Supervisor.

Tabla N° 09

Tabla N° 410-9

Requisitos para Mezcla de Concreto Bituminoso

Parámetro de Diseño	Clase de Mezcla		
	A	B	C
Marshall (MTC E 504)	8 kN (815 Kg)	5,34 kN (544 Kg)	4,45 kN (453 Kg)
1.Estabilidad (min)	8 - 14	8 - 16	8 - 2
2.Flujo 0.25 mm	3 - 5	03 - 5	03 - 5
3.Porcentaje de vacíos con aire (1) (MTC E 505)		Ver Tabla 410-10	
4.Vacíos en el agregado mineral (Ver Tabla 410-10)	75	50	50
5.Compactación, núm. de golpes en cada capa de testigo			
c. Inmersión - Compresión (MTC E 518)	2,1	2,1	1,4
1.Resistencia a la compresión Mpa min.	70	70	70
2.Resistencia retenida % (min)			
d. Resistencia Conservada en la Prueba de Tracción indirecta (min) (MTC E 521)	70	70	70
e. Relación Polvo - Asfalto	0,6 - 1,3	0,6 - 1,3	0,6 - 1,3
f. Relación Est./flujo (2)		1700 - 2500	

- (1) A la fecha (1999) se tienen tramos efectuados en el Perú que tienen el rango 2% a 4% (es deseable que tienda al menor) 2% con resultados satisfactorios en climas fríos por encima de 3 000 m.s.n.m. que se recomienda en estos casos.
- (2) Para zonas de clima frío es deseable que la relación Est./flujo sea de la menor magnitud posible tendiéndose hacia el límite inferior.

FUENTE: Manual de Carreteras-Ensayo de Materiales para Carreteras - MTC.

El Índice de Compactibilidad mínimo será 5.

El Índice de Compactibilidad se define como:
$$\frac{1}{\text{GEB } 50 \text{ Y GEB } 5}$$

Siendo GB50 y GEB5, las gravedades específicas bulk de las briquetas a 50 y 5 golpes.

Tabla N° 10

Tabla 410-10

Vacíos mínimos en el agregado mineral (VMA)

Tamiz	Vacíos mínimos en agregado mineral %	
	Marshall	Superpave
2,36 mm. (N° 8)	21	-
4,75 mm. (N° 4)	18	-
9,5 mm. (3/8")	16	15
12,5 mm. (1/2")	15	14
19 mm. (3/4")	14	13
25 mm. (1")	13	12
7,5 mm. (1 1/2")	12	11
50 mm. (2")	11.5	10.5

FUENTE: Manual de Carreteras-Ensayo de Materiales para Carreteras - MTC.



CAPITULO III

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para el desarrollo de la presente tesis se contó con una parte técnica llevada a cabo en el laboratorio para el control de calidad de los agregados, asfalto convencional y asfalto modificado. Dichos ensayos fueron llevados a cabo en la planta asfáltica y su respectivo laboratorio de la provincia de San Román – Juliaca.

Para efecto del análisis y control de calidad de los agregados en el laboratorio, se tuvo que traer la materia prima de la cantera Santo Tomas proveniente de la cuenca del rio Cabanillas ubicado en las provincias de San Román y Lampa, del departamento de Puno, para su posterior trituración en la planta asfáltica de Juliaca y determinar si los agregados son óptimos para el diseño de una mezcla asfáltica en caliente. Los procedimientos adecuados del muestreo permitirán la correlación de los respectivos datos con propiedades de la muestra como indican los valores obtenidos en anexos. Los ensayos de laboratorio son efectuados a fin de estimar los parámetros que correspondan a cada prueba y verificar si se encuentra dentro de los rangos dados por la ASTM y por el MTC. Mediante ensayos de laboratorio se puede comprobar las buenas propiedades de estos asfaltos modificados que imparten en las mezclas asfálticas para su aplicación.

3.1. ENSAYOS DE CONTROL DE CALIDAD DE LOS AGREGADOS

3.1.1. AGREGADOS PETREOS

Se refiere a la combinación de agregados usados en la mezcla asfáltica, de acuerdo a requerimientos específicos. Agregado grueso son los agregados pétreos retenidos en el tamiz N°4 (4.75mm) y agregado fino, a la porción que pasa dicho tamiz. Otro constituyente que se puede agregar al agregado es el filler, el que deberá estar constituido por un polvo mineral fino, que también podrá ser cemento portland, cal u otro material inerte libre de materia orgánica y partículas de arcilla, el filler son los agregados cuyo tamaño máximo absoluto es la malla N° 30 (0.63mm), que pasa por el tamiz de la malla N°200 (0.08mm), según las normas.

3.1.2. AGREGADOS UTILIZADOS PARA LA ELABORACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

Los agregados pétreos utilizados para el muestreo y diseño de mezcla asfáltica correspondiente a la presente investigación, fueron obtenidos en la planta de asfalto de la Municipalidad Provincial de San Román – Juliaca, los que se obtuvieron de las canteras de Santo Tomas (carretera Juliaca - Arequipa) conformada por grabas y guijarros, para su posterior trituración mecánica por medio de la chancadora.

Como también se indica en el ítem 1.7.2. Los diámetros mostrados (1/2", 1/4" y 3/8") son los máximos nominales por ende los agregados usados en la mezcla asfáltica son los que se retienen en diferentes tamices inferiores. Según nuestro diseño, se tomó las siguientes muestras, cuyo peso promedio por material es 50 kg.

- Piedra chancada 1/2" - cantera de Santo Tomas.
- Arena chancada de 1/4" - cantera de Santo Tomas.

- Arena zarandeada natural 3/8" cantera cahuarani

A estos materiales se les realizaron los siguientes ensayos.

AGREGADOS GRUESOS	AGREGADOS FINOS
Peso específico	Peso específico
Absorción	Absorción
Durabilidad	Equivalente de arena
Abrasión a los ángeles	Adhesividad (riedel weber)
Partículas chatas y alargadas	Límite líquido
	Índice de plasticidad

3.1.3. ANALISIS GRANULOMETRICO

El análisis granulométrico del agregado grueso y fino está basado en la norma: NTP 400.012, ASTM D-422 Y AASHTO T-127. Esta norma describe el método para determinar, cuantitativamente, los tamaños de las partículas de agregados gruesos y finos de una materia, por medio de los tamices de abertura cuadrada. Se determina la distribución de los tamaños de las partículas de una muestra seca del agregado, por separación a través de tamices dispuestos sucesivamente de mayor a menor. Dicha muestra debe ser preparada como se indica en el ítem 2.6.1.2. y los valores completos de dichas tablas se encuentran en anexos 01 (análisis granulométrico).

TABLA N° 11

PIEDRA CHANCADA DE TAMAÑO MAXIMO 1/2"

Tamices ASTM	Abertura mm	Peso Retenido	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado	% Que Pasa
3"	75.000				
2 1/2"	63.000				
2"	50.000				
1 1/2"	37.500				
1"	25.000				100.00
3/4"	19.000				100.00
1/2"	12.500	850.00	41.30	41.30	58.70
3/8"	9.500	688.00	33.40	74.70	25.30
No.04	4.750	511.00	24.80	99.50	0.50
No.10	2.000	9.30	0.50	100.00	0.00
No.20	0.840				
No.40	0.425				
No.80	0.180				
No.100	0.150				
No.200	0.075				
<No.200		0.00	0.00	100.00	0.00

FUENTE: PROPIA / muestra total 2058.30 gr

TABLA N° 12

ARENA CHANCADA DE TAMAÑO MAXIMO 1/4"

Tamices ASTM	Abertura mm	Peso Retenido	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado	% Que Pasa
3"	75.000				
2 1/2"	63.000				
2"	50.000				
1 1/2"	37.500				
1"	25.000				100.00
3/4"	19.000				100.00
1/2"	12.500				100.00
3/8"	9.500				100.00
No.04	4.750	115.00	6.50	6.50	93.50
No.10	2.000	652.00	36.60	43.10	56.90
No.20	0.840	441.00	24.70	67.80	32.20
No.40	0.425	156.90	8.80	76.60	23.40
No.80	0.180	180.00	10.10	86.70	13.30
No.100	0.150	19.00	1.10	87.80	12.20
No.200	0.075	70.00	3.90	91.70	8.30
<No.200		148.10	8.30	100.00	0.00

FUENTE: PROPIA / muestra total 1782 gr

TABLA N° 13
ARENA NATURAL DE TAMAÑO MAXIMO 3/8"

Tamices ASTM	Abertura mm	Peso Retenido	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado	% Que Pasa
3"	75.000				
2 1/2"	63.000				
2"	50.000				
1 1/2"	37.500				
1"	25.000				100.00
3/4"	19.000				100.00
1/2"	12.500				100.00
3/8"	9.500				100.00
No.04	4.750	128.00	4.70	4.70	95.30
No.10	2.000	547.00	19.90	24.60	75.40
No.20	0.840	800.00	29.20	53.80	
No.40	0.425	728.80	26.60	80.40	19.60
No.80	0.180	329.00	12.00	92.40	7.60
No.100	0.150	17.00	0.60	93.00	
No.200	0.075	34.00	1.20	94.20	5.80
<No.200		160.20	5.80	100.00	0.00

FUENTE: PROPIA / muestra total 2744 gr

TABLA N° 14
CAL HIDRATADA

Tamices ASTM	Abertura mm	Peso Retenido	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado	% Que Pasa
No.10	2.000				100.00
No.20	0.840				100.00
No.40	0.425	14.00	5.50	5.50	94.50
No.80	0.180	4.00	1.60	7.10	92.90
No.100	0.150	3.00	1.20	8.30	91.70
No.200	0.075	4.00	1.60	9.90	90.10
<No.200		228.00	90.10	100	0.00

FUENTE: PROPIA / muestra total 253gr

TABLA N° 15
CAUCHO RECICLADO DE LLANTA

Tamices ASTM	Abertura mm	Peso Retenido	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado	% Que Pasa
3"	75.000				
2 1/2"	63.000				
2"	50.000				
1 1/2"	37.500				
1"	25.000				
3/4"	19.000				
1/2"	12.500				100.00
3/8"	9.500				100.00
No.04	4.750	0.00	0.00	0.00	100.00
No.10	2.000	0.00	0.00	0.00	100.00
No.20	0.840	103.91	56.10	56.10	14.40
No.40	0.425	54.61	29.50	85.60	1.20
No.80	0.180	24.43	13.20	98.80	
No.100	0.150	1.32	0.70	99.50	
No.200	0.075	0.62	0.30	99.80	0.20
<No.200		0.33	0.20	100.00	0.00

FUENTE: PROPIA / muestra total 185.22gr



Las granulometrías mostradas nos muestran una distribución uniforme de los agregados en los diferentes tamices anexos 01 (análisis granulométrico), lo cual es bueno para posteriores trabajos y mezcla de los mismos.

3.1.4. DOSIFICACION DE LOS AGREGADOS

Después de realizar la granulometría de los agregados individual mente, se realizó a través de una simulaciones en computadora la mezcla de los agregados para poder combinarlos posterior mente con el cemento asfáltico y que estos cumplan con las normas establecidas. Esta simulación consiste en variar los porcentajes que intervienen los agregados en la mezcla de agregados respecto a su granulometría y que estos valores se encuentren dentro del rango establecido por las normas del ministerio de transportes y comunicaciones (MTC).

De acuerdo con nuestra granulometría, se determinó finalmente como uso granulométrico el diseño de graduación MAC-2 (tabla N° 07) del ministerio de transportes, donde los agregados combinados y al tamaño máximo nominal se centra mejor nuestra mezcla de agregados. Cada briqueta pesa 1200 gr, a este peso total se le descuenta el peso del asfalto óptimo, quedando el peso de la mezcla de agregados .Los porcentajes individuales de agregados en la combinación de estos, son los siguientes.

➤ PARA LA MUESTRA CONVENCIONAL

TIPO DE AGREGADOS	PESO EN GRAMOS (gr)	% EN MEZCLA
✓ Piedra chancada de 1/2 "máx.	334.80	30%
✓ Arena chancada de 1/4" máx.	412.92	37%
✓ Arena zarandeada natural de 3/8" máx.	334.80	30%
✓ Cal hidratada	33.48	3%
TOTAL	1116.00 gr	100%

➤ PARA LA MUESTRA MODIFICADA CON 9% DE CAUCHO

TIPO DE AGREGADOS	PESO EN GRAMOS (gr)	% EN MEZCLA
✓ Piedra chancada de 1/2 "máx.	335.16	30%
✓ Arena chancada de 1/4" máx.	323.99	29%
✓ Arena zarandeada natural de 3/8" máx.	323.99	29%
✓ Cal hidratada	33.52	3%
✓ Caucho reciclado de llanta (CRLI)	100.55	9%
TOTAL	1117.20 gr	100%

➤ PARA LA MUESTRA MODIFICADA CON 7% DE CAUCHO

TIPO DE AGREGADOS	PESO EN GRAMOS (gr)	% EN MEZCLA
✓ Piedra chancada de 1/2 "máx.	334.80	30%
✓ Arena chancada de 1/4" máx.	345.96	31%
✓ Arena zarandeada natural de 3/8" máx.	323.64	29%
✓ Cal hidratada	33.48	3%
✓ Caucho reciclado de llanta (CRLI)	78.12	7%
TOTAL	1116.00 gr	100%

➤ PARA LA MUESTRA MODIFICADA CON 5% DE CAUCHO

TIPO DE AGREGADOS	PESO EN GRAMOS (gr)	% EN MEZCLA
✓ Piedra chancada de 1/2 "máx.	345.96	31%
✓ Arena chancada de 1/4" máx.	345.96	31%
✓ Arena zarandeada natural de 3/8" máx.	334.80	30%
✓ Cal hidratada	33.48	3%
✓ Caucho reciclado de llanta (CRLI)	55.80	5%
TOTAL	1116.00 gr	100%

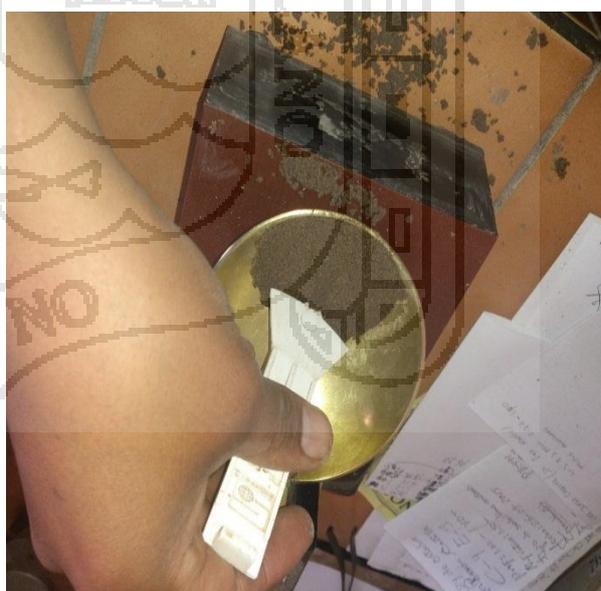
➤ PARA LA MUESTRA MODIFICADA CON 3% DE CAUCHO

TIPO DE AGREGADOS	PESO EN GRAMOS (gr)	% EN MEZCLA
✓ Piedra chancada de 1/2 "máx.	356.74	32%
✓ Arena chancada de 1/4" máx.	345.59	31%
✓ Arena zarandeada natural de 3/8" máx.	345.59	31%
✓ Cal hidratada	33.44	3%
✓ Caucho reciclado de llanta (CRLI)	33.44	3%
TOTAL	1114.80 gr	100%

3.1.5 LIMITES DE ATTERBERG

A. LIMITE LIQUIDO (LL)

El límite líquido es el contenido de humedad expresado en porcentaje del suelo secado en el horno, cuando este se entre el estado plástico y líquido. Se basa en las normas NTP 339.129, ASTM D-424 Y AASHTO T-89.

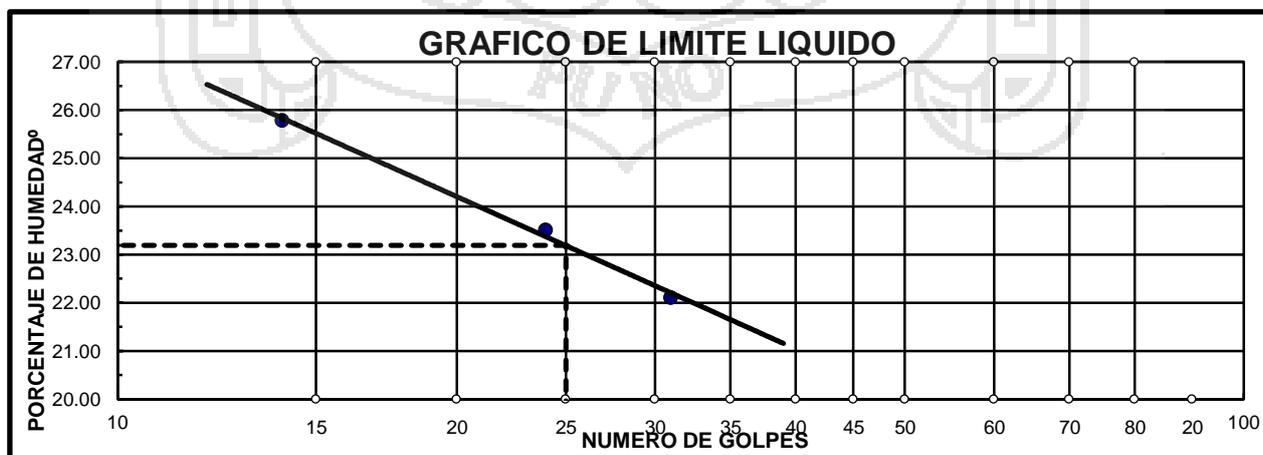


A. LIMITE PLASTICO (LP)

Se denomina límite plástico a la humedad más baja con la que se pueden formar barritas de suelo de unos 3.2 mm de diámetro, rodando dicho suelo entre la palma de la mano y una superficie lisa (vidrio esmerilado) sin que dichas barras se desmoronen. Se explica con más detalle en las normas NTP 339.129, ASTM D-4318 Y AASHTO T-90.

**TABLA N° 16
LIMITE DE CONSISTENCIA**

DESCRIPCION	LIMITE LIQUIDO			LIMITE PLASTICO		
01. No.DE GOLPES	31	24	14			
02. TARRO No.	8	12	8			
03. SUELO HUMEDO * TARRO	25.68	23.68	25.54			
04. SUELO SECO * TARRO	23.04	21.31	22.59			
05. PESO DEL AGUA	2.64	2.37	2.95			
06. PESO DEL TARRO	11.10	11.23	11.15	NP		
07. PESO DEL SUELO SECO	11.94	10.08	11.44			
08. HUMEDAD	22.11	23.51	25.79			
L.L.=	23.19	L.P.=	NP	%	I.P.=	NP
					%	



3.1.6 EQUIVALENTE DE ARENA

Este ensayo nos sirve para determinar la proporción relativa del contenido de polvo fino nocivo o material arcilloso, en los agregados, Se explica con más detalle en las normas NTP 339.146 Y ASTM D-2419.

TABLA N° 17
EQUIVALENTE DE ARENA
EQUIVALENTE DE ARENA
(ASTM D 2419)

Muestra	N°1	N°2	N°3
Hora de entrada	14:25	14:27	14:29
Hora de salida	14:35	14:37	14:39
Hora de entrada	14:36	14:38	14:40
Hora de salida	14:56	14:58	15:00
Altura de nivel material fino	4.52	4.81	4.89
Altura de nivel arena	3.02	2.93	3.02
Equivalente de Arena	66.80	60.90	61.80

Equivalente de Arena Promedio: **63.2 %**

3.1.7 ABRASION LOS ANGELES

El ensayo de resistencia de los agregados de tamaños menores por abrasión o impacto de la máquina de los ángeles, está basado en la norma: NTP 400.019, ASTM C-131 Y AASHTO T-96. Esta norma describe el método para determinar la resistencia al desgaste de los agregados naturales o triturados, empleando la citada maquina con una carga abrasiva.



TABLA N° 18
ABRASION LOS ANGELES
ASTM C131, MTC E 207

TAMAÑO DE MALLAS		MASA ORIGINAL	MASA FINAL	MASA PERDIDA DESPUES DE 500 REVOLUCIONES	% DE DESGASTE POR ABRASION
PASA	RETIENE	(GRAMOS)	(GRAMOS)		
38.1mm(1 1/2")	25.4mm(1")		.....	.....	.....
25.4mm(1")	19.0mm(3/4")		.....	.....	.....
19.0mm(3/4")	12.7mm(1/2")	2.500	.....	.....	.....
12.7mm(1/2")	9.5mm(3/8")	2.500	.....	.....	.....
PESO TOTAL DE LA MUESTRA		5.000	4.04	0.97	19.30%

FUENTE: PROPIA

3.1.8 CEMENTO ASFALTICO

El cemento asfáltico utilizado en el presente diseño de concreto asfáltico es penetración 120-150, el empleo de este ligantes para zonas que se encuentra a una altitud superior a los 3.500 msnm como es el caso de nuestro proyecto, a fin de

mitigar cierto efecto que se pudo verificar en base a las experiencias de los últimos diez años en la construcción de carreteras en zonas de altura y dadas las condiciones climáticas predominantes en el altiplano (bajas temperaturas, gradiente térmico. Alto en lapsos cortos de tiempo y fuerte radiación ultravioleta) que afecta negativamente a la carpeta asfáltica generan un incremento marcado en el módulo de rigidez, lo que provoca una flexión en toda la estructura del pavimento, produciéndose tracciones que pueden llegar a ocasionar la fractura de la misma.

TABLA N° 19

ESPECIFICACIONES TECNICAS DEL CEMENTO ASFALTICO PEN 120-150

PROPIEDADES	CARACTERISTICAS
APARIENCIA, COLOR, OLOR :	Sólido a temperatura ambiente, líquido durante su manipulación a más de 100° C, homogéneo y libre de agua. Color de marrón oscuro a negro y olor característico.
GRAVEDAD ESPECÍFICA a 15.6/15.6°C :	1.01 – 1.03 aprox.
PUNTO DE INFLAMACIÓN, °C :	218 mín.
PUNTO DE AUTOIGNICIÓN, °C :	485 aprox.
. LÍMITES DE INFLAMABILIDAD, % Vol. en aire :	De 1 a 6 aprox.
SOLUBILIDAD EN AGUA :	Insignificante.

FUENTE: PETRO-PERU



CLASE DE PRODUCTO:	ASFALTO SOLIDO			
TIPO DE PRODUCTO:	CEMENTO ASFALTICO			
NOMBRE DEL PRODUCTO:	ASFALTO SOLIDO 120/150 PEN			
	ESPECIFICACIONES		METODO	
ENSAYOS	MIN.	MAX.	ASTM	AASHTO
PENETRACION a 25°C, 100g, 5s, 0.1mm	120	150	D-5	T-49
VOLATILIDAD				
Punto de Inflamacion cleveland, copa abierta, °C		218	D-92	T- 48
Gravedad especifica a 15.6/15.6°C		Reportar	D-70	T-228
DUCTILIDAD a 25°C. 5 cm/min. Cm		100	D-113	T-51
Solubilidad en Tricloroetileno , %masa		99	D-2042	T-44
SUSCEPTIBILIDAD TERMICA				
Prueba de calentamiento sobre pelicula fina, 3.2mm, 163°C, 5 horas.			D-1754	T-179
Perdida por calentamiento, % masa		1.3		
penetracion retenida, % del original		42+	D-5	T-49
Ductilidad a 25°C. 5 cm/min. cm		100	D-113	T-51
Indice de susceptibilidad termica		-1 +1		Frances RLB
FLUIDEZ				
Viscosidad cinematica a 100°C, cSt		Reportar	D-2170	T-201
Viscosidad cinematica a 135°C, cSt		140	D-2171	T-301
REQUERIMIENTO GENERAL:	El cemento asfaltico debera ser homoganeo, libre de agua, y no debera formar espuma al ser calentado a 175°C			
OBSERVACIONES:				
(a) En concordancia con la norma tecnica peruana NTP 321.051 y con los estandares ASTM D 946 Y AASHTO M-20.				

FUENTE: PETRO-PERU

3.2 DISEÑO PARA MEZCLAS ASFALTICAS POR EL METODO MARSHALL (ASFALTO CONVENCIONAL)

3.2.1 CALCULO DEL PESO UNITARIO DE LA MUESTRA COMPACTADA

Este ensayo consiste en pesar el espécimen seco después que haya permanecido al aire por lo menos durante una hora, a la temperatura ambiente. El espécimen se lleva su condición saturada superficial mente seca y se sumerge en agua y se pesa.

$$G_{mb} = \frac{W_d}{W_{ssd} - W_{sumer}}$$

G_{mb} = peso unitario de la mezcla asfáltica compactada

W_d = peso al aire del espécimen seco

W_{ssd} = peso al aire del espécimen saturado superficial mente seco

W_{sumer} = peso del espécimen saturado superficial mente seco sumergido

TABLA N° 20

%DE ASFALTO	PESO UNITARIO DE LA MUESTRA COMPACTADA (gr/cm ³) (asfalto convencional)		
	M-1	M-2	M-3
6.00%	2.329	2.345	2.337
6.50%	2.375	2.361	2.345
7.00%	2.369	2.357	2.356
7.50%	2.343	2.354	2.386
8.00%	2.329	2.350	2.351

FUENTE: PROPIA

3.2.2 PESO ESPECIFICO BULK DE LA COMBINACIÓN DE AGREGADOS

Cuando el agregado total consiste en fracciones separadas de agregado grueso, agregado fino y filler, todos tienen diferentes gravedades específicas, la gravedad específica neta para el agregado total se calcula usando:

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}}$$

Donde:

G_{sb} = gravedad específica neta para el agregado total

P_1, P_2, P_n = porcentajes individuales por masa de agregado

G_1, G_2, G_n = gravedad específica neta individual del agregado

TABLA N° 21

%DE ASFALTO	PESO EFECTIVO PROMEDIO DEL AGREGADO (gr/cm3) (asfalto convencional)		
	M-1	M-2	M-3
6.00%	2.523	2.523	2.523
6.50%	2.523	2.523	2.523
7.00%	2.523	2.523	2.523
7.50%	2.523	2.523	2.523
8.00%	2.523	2.523	2.523

FUENTE: PROPIA

3.2.3 PESO EFECTIVO DE LOS AGREGADOS

Por tanto, el valor para la gravedad específica efectiva de un agregado debe estar entre su gravedad específica neta y su gravedad específica aparente. Cuando la gravedad específica efectiva sale de estos límites, su valor se debe asumir como incorrecto. El cálculo de la gravedad específica máxima de la mezcla mediante la ASTM D 2041/ASSHTO T 209; la composición de la mezcla en términos del contenido de agregado; y el total de asfalto se deben entonces, volver a inspeccionar para encontrar la causa del error.

$$G_{se} = \frac{P_{mm} - P_b}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}}$$

Donde:

G se = gravedad específica efectiva del agregado

G mm = gravedad específica máxima (ASTM D 2041/AASHTO T 209) de mezcla de pavimento (sin vacíos de aire)

P mm = porcentaje de masa del total de la mezcla suelta = 100

P b = contenido de asfalto con el cual ASTM D 2041/AASHTO T 209 desarrolló el ensayo; el porcentaje por el total de la masa de la mezcla

G b = gravedad específica del asfalto

TABLA N° 22

%DE ASFALTO	PESO EFECTIVO DE LOS AGREGADO (gr/cm ³) (asfalto convencional)		
	M-1	M-2	M-3
6.00%	2.672	2.672	2.672
6.50%	2.691	2.691	2.691
7.00%	2.692	2.692	2.692
7.50%	2.714	2.714	2.714
8.00%	2.708	2.708	2.708

FUENTE: PROPIA

3.2.4 PORCENTAJE DE ASFALTO ABSORBIDO

La absorción se expresa como un porcentaje de la masa del agregado, más que como un porcentaje del total de la masa de la mezcla.

La absorción del asfalto, P_{ba}, se determina mediante:

$$P_{ba} = 100 \times \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{sb} G_{se}} \times G_b$$

Donde:

P_{ba} = asfalto absorbido, porcentaje de la masa del agregado

G_{se} = gravedad específica efectiva del agregado

G_{sb} = gravedad específica neta del agregado

G_b = gravedad específica del asfalto

TABLA N° 23

%DE ASFALTO	PORCENTAJE DE ASFALTO ABSORBIDO (%) (asfalto convencional)		
	M-1	M-2	M-3
6.00%	2.254	2.254	2.254
6.50%	2.524	2.524	2.524
7.00%	2.538	2.538	2.538
7.50%	2.845	2.845	2.845
8.00%	2.762	2.762	2.762

FUENTE: PROPIA

3.2.5 CONTENIDO DE ASFALTO EFECTIVO

El contenido de asfalto efectivo, P_{be}, de una mezcla de pavimento es el volumen total de asfalto, menos la cantidad de asfalto perdido por absorción dentro de las partículas del agregado. Es la porción del contenido total de asfalto que se queda como una capa en el exterior de la partícula del agregado y es el contenido de asfalto que gobierna el desempeño de una mezcla asfáltica. La fórmula es:

$$P_{be} = P_b - \frac{P_{ba} P_s}{100}$$

Donde:

P_{be} = contenido de asfalto efectivo, porcentaje de la masa total de la mezcla

P_b = contenido de asfalto, porcentaje de la masa total de la mezcla

P_{ba} = asfalto absorbido, porcentaje de la masa del agregado

P_s = contenido de agregado, porcentaje total de la masa de la mezcla

TABLA N° 24

%DE ASFALTO	CONTENIDO DE ASFALTO EFECTIVO (%) (asfalto convencional)		
	M-1	M-2	M-3
6.00%	3.88	3.88	3.88
6.50%	4.14	4.14	4.14
7.00%	4.64	4.64	4.64
7.50%	4.87	4.87	4.87
8.00%	5.46	5.46	5.46

FUENTE: PROPIA

3.2.6 PORCENTAJE VMA EN MEZCLA COMPACTADA

Los vacíos en el agregado mineral, VMA, se definen como el vacío inter granular entre las partículas del agregado en una mezcla asfáltica compactada, que incluye los vacíos de aire y el contenido de asfalto efectivo, expresado como un porcentaje del volumen total. El VMA puede calcularse sobre la base de la gravedad específica neta del agregado y expresado como un porcentaje volumen mezcla asfáltica compactada. Por lo tanto, el VMA puede estimarse restando el volumen del agregado determinado por su gravedad específica neta, del volumen neto de la mezcla asfáltica compactada.

Si la composición de la mezcla se determina como el porcentaje del total de la masa de la mezcla asfáltica:

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb} \times P_s}{G_{sb}}$$

Donde:

VMA = vacíos en el agregado mineral (porcentaje del volumen neto)

G sb = gravedad específica neta del total de agregado

G mb = gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada (ASTM D 188 O D 2726/AASHTO T 166)

P s = contenido de agregado, porcentaje del total de la masa de la mezcla asfáltica

TABLA N° 25

%DE ASFALTO	VACIOS EN EL AGREGADO MINERAL (%) (asfalto convencional)		
	M-1	M-2	M-3
6.00%	13.235	12.626	12.920
6.50%	11.988	12.509	13.099
7.00%	12.662	13.119	13.147
7.50%	14.082	13.711	12.538
8.00%	15.081	14.317	14.273

FUENTE: PROPIA

3.2.7 PORCENTAJE DE VACÍOS DE AIRE EN LA MEZCLA COMPACTADA

Los vacíos de aire, V_a , en la mezcla asfáltica compactada consiste en los pequeños espacios de aire entre las partículas de agregado. El porcentaje del volumen de vacíos de aire en una mezcla compactada, puede determinarse usando:

$$V_a = 100 \times \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}}$$

Donde:

V_a = vacíos de aire en la mezcla compactada, porcentaje del volumen total

G_{mm} = gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica

G_{mb} = gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada

TABLA N° 26

%DE ASFALTO	VACIOS DE AIRE EN LA MEZCLA COMPACTADA (%) (asfalto convencional)		
	M-1	M-2	M-3
6.00%	4.40	3.70	4.00
6.50%	2.40	2.90	3.60
7.00%	1.90	2.40	2.40
7.50%	2.90	2.50	1.20
8.00%	2.60	1.70	1.70

FUENTE: PROPIA

3.2.8 VACÍOS LLENOS CON ASFALTO

El porcentaje de los vacíos en el agregado mineral que son llenados por el asfalto, VFA, no incluyendo el asfalto absorbido, se determina usando:

$$VFA = 100 \times \frac{VMA - Va}{VMA}$$

Donde:

VFA = vacíos llenados con asfalto, porcentaje de

VMA = vacíos en el agregado mineral, porcentaje del volumen total

V a = vacíos de aire en mezclas compactadas, porcentaje del volumen total

TABLA N° 27

%DE ASFALTO	VACIOS LLENOS CON ASFALTO (%) (asfalto convencional)		
	M-1	M-2	M-3
6.00%	66.755	70.695	69.040
6.50%	79.980	76.817	72.517
7.00%	84.994	81.706	81.745
7.50%	79.406	81.766	90.429
8.00%	82.760	88.126	88.089

FUENTE: PROPIA

3.2.9 CALCULO DEL CONTENIDO OPTIMO DE ASFALTO CONVENCIONAL

Se determinó el contenido óptimo de asfalto de la mezcla, considerando el peso unitario, la estabilidad, y vacíos en la mezcla. De dichos cálculos se determina el porcentaje de asfalto óptimo.

$$Pb \text{ optimo} = \frac{Pb1 + Pb2 + Pb3}{3}$$

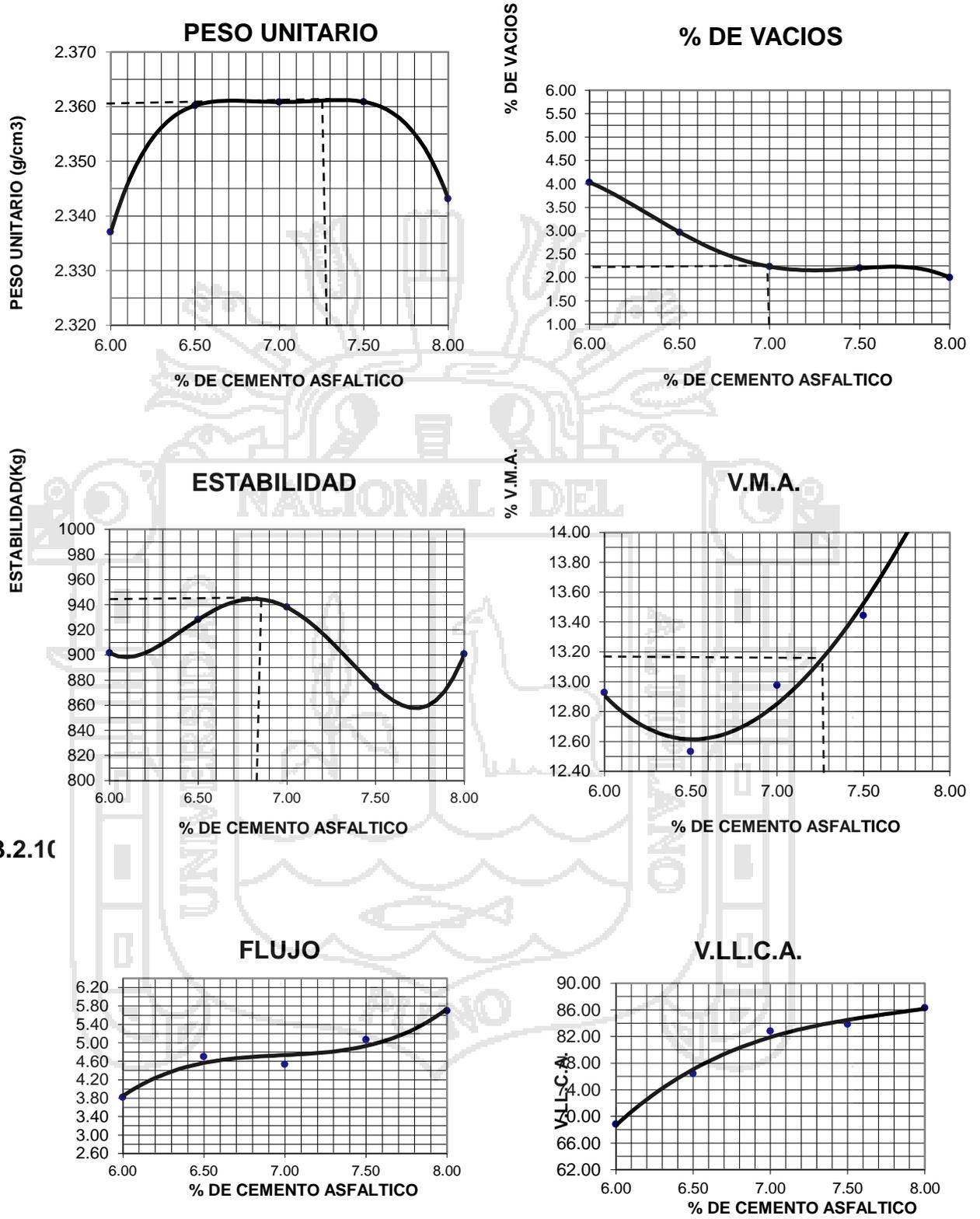
Óptimo de por estabilidad : 6.8%

Óptimo de por peso unitario : 7.3%

Óptimo para 3% de vacíos : 7.0%

Óptimo a usar : 7.0%

GRAFICOS DE MARSHALL



3.2.1c

RESULTADO DEL DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE

1. MEZCLA DE AGREGADOS (PROPORCION EN PESO)

Agregado Grueso Chancado 1/2"	:	30%
Arena Chancado 1/4"	:	37%
Arena natural 3/8"	:	30%
Cal	:	3%
		100%

2. CEMENTO ASFALTICO

Tipo de Asfalto	:	C. A. 120/150
% Optimo de C.A.	:	7.00% \pm 0.3

3. CARACTERISTICAS FISICO MECANICAS

CARACTERISTICAS	DISEÑO	ESPECIFICACIONES
% Cemento Asfáltico	7.0%	
N° de Golpes en cada lado	75	
Estabilidad (kg)	945	Min - 815 kgs.
Fluencia (mm)	4.81	3 - 5 mm
% Vacíos de Aire	2.25	2 - 4 %
% V.M.A.	13.19	Min. 14
Peso Unitario	2.362	
% V. LL.C. A.	83.90	Min. 80
Estabilidad Flujo kg/cm	1965	1,700 - 2500
% Estabilidad retenida	83.46%	Mín. 75%
% Índice de Compactabilidad	8.08	Mín. 5%

3.3 DISEÑO PARA MEZCLAS ASFALTICAS POR EL METODO MARSHALL (ASFALTO MODIFICADO)

3.3.1 CALCULO DEL PESO UNITARIO DE LA MUESTRA COMPACTADA

Este ensayo consiste en pesar el espécimen seco después que haya permanecido al aire por lo menos durante una hora, a la temperatura ambiente. El espécimen se lleva su condición saturada superficial mente seca y se sumerge en agua y se pesa.

$$G_{mb} = \frac{W_d}{W_{ssd} - W_{sumer}}$$

G_{mb} = peso unitario de la mezcla asfáltica compactada

W_d = peso al aire del espécimen seco

W_{ssd} = peso al aire del espécimen saturado superficial mente seco

W_{sumer} = peso del espécimen saturado superficial mente seco sumergido

TABLA N° 28
Para 3% de caucho

%DE ASFALTO	PESO UNITARIO DE LA MUESTRA COMPACTADA (gr/cm ³) (asfalto modificado)		
	M-1	M-2	M-3
6.00%	2.004	1.984	1.993
6.50%	2.017	1.983	2.000
7.00%	2.027	2.019	2.022
7.50%	2.000	1.983	2.017
8.00%	1.993	1.984	2.004

FUENTE: PROPIA

NOTA: Todos los resultados obtenidos con los diferentes porcentajes de caucho y asfalto en base a los parámetros Marshall se muestran en el capítulo ANEXOS.

3.3.2 PESO ESPECIFICO BULK DE LA COMBINACIÓN DE AGREGADOS

Cuando el agregado total consiste en fracciones separadas de agregado grueso, agregado fino y filler, todos tienen diferentes gravedades específicas, la gravedad específica neta para el agregado total se calcula usando:

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_N}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_N}{G_N}}$$

Donde:

G_{sb} = gravedad específica neta para el agregado total

P_1, P_2, P_n = porcentajes individuales por masa de agregado

G_1, G_2, G_n = gravedad específica neta individual del agregado

TABLA N° 29
Para 3% de caucho

%DE ASFALTO	PESO EFECTIVO PROMEDIO DEL AGREGADO (gr/cm ³) (asfalto modificado)		
	M-1	M-2	M-3
6.00%	2.434	2.434	2.434
6.50%	2.434	2.434	2.434
7.00%	2.434	2.434	2.434
7.50%	2.434	2.434	2.434
8.00%	2.434	2.434	2.434

FUENTE: PROPIA

3.3.3 PESO EFECTIVO DE LOS AGREGADOS

Por tanto, el valor para la gravedad específica efectiva de un agregado debe estar entre su gravedad específica neta y su gravedad específica aparente. Cuando la

gravidad específica efectiva sale de estos límites, su valor se debe asumir como incorrecto. El cálculo de la gravidad específica máxima de la mezcla mediante la ASTM D 2041/ASSHTO T 209; la composición de la mezcla en términos del contenido de agregado; y el total de asfalto se deben entonces, volver a inspeccionar para encontrar la causa del error.

$$G_{se} = \frac{P_{mm} - P_b}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}}$$

Donde:

G_{se} = gravidad específica efectiva del agregado

G_{mm} = gravidad específica máxima (ASTM D 2041/AASHTO T 209) de mezcla de pavimento (sin vacíos de aire)

P_{mm} = porcentaje de masa del total de la mezcla suelta = 100

P_b = contenido de asfalto con el cual ASTM D 2041/AASHTO T 209 desarrolló el ensayo; el porcentaje por el total de la masa de la mezcla

G_b = gravidad específica del asfalto

TABLA N° 30
Para 3% de caucho

%DE ASFALTO	PESO EFECTIVO DE LOS AGREGADOS (gr/cm ³) (asfalto modificado)		
	M-1	M-2	M-3
6.00%	2.476	2.476	2.476
6.50%	2.485	2.485	2.485
7.00%	2.467	2.467	2.467
7.50%	2.461	2.461	2.461
8.00%	2.487	2.487	2.487

FUENTE: PROPIA

3.3.4 PORCENTAJE DE ASFALTO ABSORBIDO

La absorción se expresa como un porcentaje de la masa del agregado, más que como un porcentaje del total de la masa de la mezcla.

La absorción del asfalto, P_{ba} , se determina mediante:

$$P_{ba} = 100 \times \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{sb} G_{se}} \times G_b$$

Donde:

P_{ba} = asfalto absorbido, porcentaje de la masa del agregado

G_{se} = gravedad específica efectiva del agregado

G_{sb} = gravedad específica neta del agregado

G_b = gravedad específica del asfalto

TABLA N° 31
Para 3% de caucho

%DE ASFALTO	PORCENTAJE DE ASFALTO ABSORBIDO (%) (asfalto modificado)		
	M-1	M-2	M-3
6.00%	0.711	0.711	0.711
6.50%	0.860	0.860	0.860
7.00%	0.561	0.561	0.561
7.50%	0.460	0.460	0.460
8.00%	0.893	0.893	0.893

FUENTE: PROPIA

3.3.5 CONTENIDO DE ASFALTO EFECTIVO

El contenido de asfalto efectivo, P_{be} , de una mezcla de pavimento es el volumen total de asfalto, menos la cantidad de asfalto perdido por absorción dentro de las partículas del agregado. Es la porción del contenido total de asfalto que se queda como una capa en el exterior de la partícula del agregado y es el contenido de asfalto que gobierna el desempeño de una mezcla asfáltica. La fórmula es:

$$P_{be} = P_b - \frac{P_{ba} P_s}{100}$$

Donde:

P_{be} = contenido de asfalto efectivo, porcentaje de la masa total de la mezcla

P_b = contenido de asfalto, porcentaje de la masa total de la mezcla

P_{ba} = asfalto absorbido, porcentaje de la masa del agregado

P_s = contenido de agregado, porcentaje total de la masa de la mezcla

TABLA N° 32
Para 3% de caucho

%DE ASFALTO	CONTENIDO DE ASFALTO EFECTIVO (%) (asfalto modificado)		
	M-1	M-2	M-3
6.00%	5.332	5.332	5.332
6.50%	5.696	5.696	5.696
7.00%	6.478	6.478	6.478
7.50%	7.075	7.075	7.075
8.00%	7.178	7.178	7.178

FUENTE: PROPIA

3.3.6 PORCENTAJE VMA EN MEZCLA COMPACTADA

Los vacíos en el agregado mineral, VMA, se definen como el vacío inter granular entre las partículas del agregado en una mezcla asfáltica compactada, que incluye los vacíos de aire y el contenido de asfalto efectivo, expresado como un porcentaje del volumen total. El VMA puede calcularse sobre la base de la gravedad específica neta del agregado y expresado como un porcentaje volumen mezcla asfáltica compactada. Por lo tanto, el VMA puede estimarse restando el volumen del agregado determinado por su gravedad específica neta, del volumen neto de la mezcla asfáltica compactada.

Si la composición de la mezcla se determina como el porcentaje del total de la masa de la mezcla asfáltica:

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb} \times P_s}{G_{sb}}$$

Donde:

VMA = vacíos en el agregado mineral (porcentaje del volumen neto)

G_{sb} = gravedad específica neta del total de agregado

G_{mb} = gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada (ASTM D 1188 O D 2726/AASHTO T 166)

P_s = contenido de agregado, porcentaje del total de la masa de la mezcla asfáltica

TABLA N° 33
Para 3% de caucho

%DE ASFALTO	VACIOS EN EL AGREGADO MINERAL (%) (asfalto modificado)		
	M-1	M-2	M-3
6.00%	22.625	23.389	23.019
6.50%	22.515	23.841	23.187
7.00%	22.555	22.856	22.758
7.50%	24.009	24.656	23.343
8.00%	24.657	25.019	24.271

FUENTE: PROPIA

3.3.7 PORCENTAJE DE VACÍOS DE AIRE EN LA MEZCLA COMPACTADA

Los vacíos de aire, V_a, en la mezcla asfáltica compactada consiste en los pequeños espacios de aire entre las partículas de agregado. El porcentaje del volumen de vacíos de aire en una mezcla compactada, puede determinarse usando:

$$V_a = 100 \times \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}}$$

Donde:

V a = vacíos de aire en la mezcla compactada, porcentaje del volumen total

G mm = gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica

G mb = gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada

TABLA N° 34
Para 3% de caucho

%DE ASFALTO	VACIOS DE AIRE EN LA MEZCLA COMPACTADA (%) (asfalto modificado)		
	M-1	M-2	M-3
6.00%	12.100	13.000	12.600
6.50%	11.300	12.800	12.000
7.00%	9.700	10.000	9.900
7.50%	10.100	10.900	9.300
8.00%	10.600	11.100	10.200

FUENTE: PROPIA

3.3.8 VACÍOS LLENOS CON ASFALTO

El porcentaje de los vacíos en el agregado mineral que son llenados por el asfalto, VFA, no incluyendo el asfalto absorbido, se determina usando:

$$VFA = 100 \times \frac{VMA - Va}{VMA}$$

Donde:

VFA = vacíos llenados con asfalto, porcentaje de

VMA = vacíos en el agregado mineral, porcentaje del volumen total

V a = vacíos de aire en mezclas compactadas, porcentaje del volumen total

TABLA N° 35
Para 3% de caucho

%DE ASFALTO	VACIOS LLENOS CON ASFALTO (%) (asfalto modificado)		
	M-1	M-2	M-3
6.00%	46.519	44.418	45.263
6.50%	49.811	46.311	48.247
7.00%	56.994	56.248	56.499
7.50%	57.932	55.792	60.159
8.00%	57.010	55.634	57.975

FUENTE: PROPIA

3.3.9 CALCULO DEL CONTENIDO OPTIMO DE ASFALTO MODIFICADO

Se determinó el contenido óptimo de asfalto de la mezcla, considerando el peso unitario, la estabilidad, y vacíos en la mezcla. De dichos cálculos se determina el porcentaje de asfalto óptimo.

$$Pb \text{ optimo} = \frac{Pb1 + Pb2 + Pb3}{3}$$

Óptimo de por estabilidad : 7.0%

Óptimo de por peso unitario : 7.0%

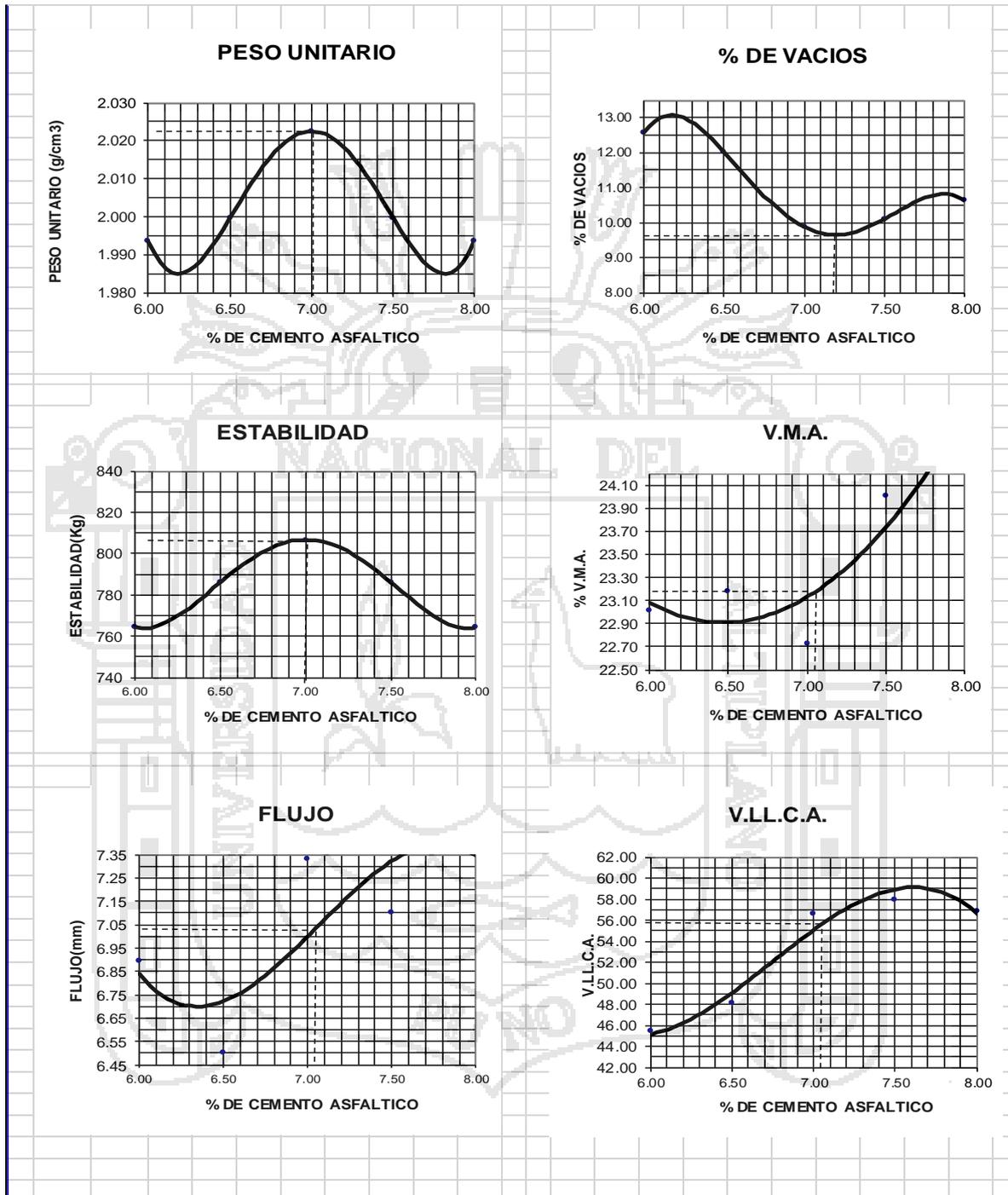
Óptimo para 3% de vacíos : 7.17%

Óptimo a usar : 7.06%

NOTA: Todos los resultados obtenidos con los diferentes porcentajes de caucho y asfalto en base a los parámetros Marshall se muestran en el capítulo ANEXOS.

3.3.10 GRAFICOS DE MARSHALL

Para 3% de caucho



NOTA: Todos los resultados obtenidos con los diferentes porcentajes de caucho y asfalto en base a los parámetros Marshall se muestran en el capítulo ANEXOS.

3.3.11 RESULTADOS FINAL

Para 3% de caucho

RESULTADO DEL DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE		
1. MEZCLA DE AGREGADOS (PROPORCION EN PESO)		
Agregado Grueso Chancado 1/2"	:	32%
Arena Chancado 1/4"	:	31%
Arena natural 3/8"	:	31%
Cal	:	3%
Caucho	:	3%
		100%
2. CEMENTO ASFALTICO		
Tipo de Asfalto	:	C. A. 120/150
% Optimo de C.A.	:	7.06% +-0.3
3. CARACTERISTICAS FISICO MECANICAS		
CARACTERISTICAS	DISEÑO	ESPECIFICACIONES
% Cemento Asfáltico	7.1%	
N° de Golpes en cada lado	75	
Estabilidad (kg)	808	Min - 815 kgs.
Fluencia (mm)	7.03	2 - 4 mm
% Vacios de Aire	9.06	3 - 5 %
% V.M.A.	23.20	Min. 14
Peso Unitario	2.023	
% V. LL.C. A.	55.90	Min. 80
Estabilidad Flujo kg/cm	1149	1,700 - 2500
% Estabilidad retenida	61.78%	Mín. 75%
% Indice de Compactabilidad	5.67	Mín. 5%

NOTA: Todos los resultados obtenidos con los diferentes porcentajes de caucho y asfalto en base a los parámetros Marshall se muestran en el capítulo ANEXOS.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. CONTRASTACION DE HIPOTESIS.

4.1.1. CONTRASTACION DE HIPOTESIS GENERAL

Al diseñar mezcla asfáltica modificada con material reciclado de llanta. **“Mejora del comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica en caliente modificado, a partir de la incorporación del caucho reciclado de llantas”.**

Los datos obtenidos de los ensayos realizados en el laboratorio son confrontados con las especificaciones dadas por las normas peruanas. Se realizó 15 muestras de diseño asfáltico convencional (DAC) cuyos resultados finales se mostraran en la tabla N°36. Se realizaron varios ensayos con diferentes porcentajes de caucho y asfalto hasta buscar el que mejor comportamiento tenga. Se realizó 15 muestras de diseño asfáltico modificado con 3% de caucho reciclado de llanta en su composición, ya que fue este el porcentaje de caucho que mejor comportamiento tubo, el diseño asfáltico modificado (DAM) cuyos resultados finales se mostraran en la tabla N°36:

Cabe resaltar que se realizaron diseños asfálticos modificados con 3%,5%,7%y9% de caucho reciclado de llanta. De los cuales los resultados obtenidos se muestran en los anexos y se podrá comprobar que de todos los diseños asfálticos modificados, el que mejor comportamiento tubo es el de 3%, siendo los resultados de los otros diseños muy alejados de las especificaciones normativas.

Todos los diseños de asfalto modificado no cumplieron las especificaciones normativas, llegando a valores muy por debajo de los límites permitidos. Se tomó en cuenta el diseño que más se acerca (3% de caucho).

TABLA N° 36

Comparación del DAM Y el DAC

CARACTERISTICAS	DAM	DAC	ESPECIFICACIONES
% Cemento Asfáltico	7.1%	7.0%	
N° de Golpes en cada lado	75	75	
Estabilidad (kg)	808	945	Min - 815 kgs.
Fluencia (mm)	7.03	4.81	3 - 5 mm
% Vacíos de Aire	9.06	2.25	2 - 4 %
% V.M.A.	23.20	13.19	Min. 14
Peso Unitario	2.023	2.362	
% V. LL.C. A.	55.90	83.90	Min. 80
Estabilidad Flujo kg/cm	1149	1965	1,700 - 2500
% Estabilidad retenida	61.78%	83.46%	Mín. 75%
% Índice de Compactabilidad	5.67	8.08	Mín. 5%

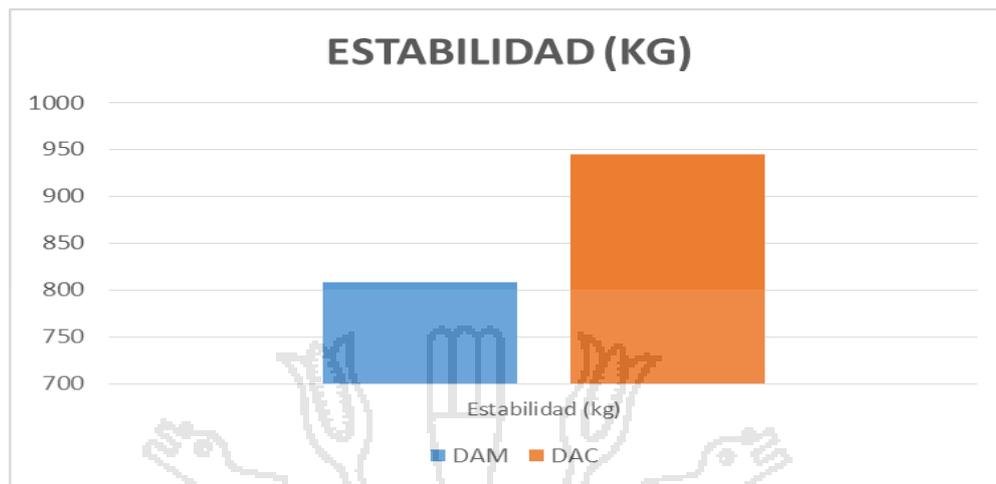
FUENTE: PROPIA

A. COMPARACION DEL ENSAYO MARSHALL DE LAS MEZCLAS

Resumiremos las características físicas mecánicas del método Marshall de los asfaltos convencionales y asfaltos modificados con caucho reciclado de llantas.

La estabilidad de los asfaltos convencionales es de 945 kg mientras que los asfaltos modificados con caucho es de 808 kg, siendo inferior a la estabilidad convencional en 137 kg, donde los cementos asfálticos modificados aportan menor estabilidad a la deformación, siendo los agregados pétreos los mismos para ambas mezclas.

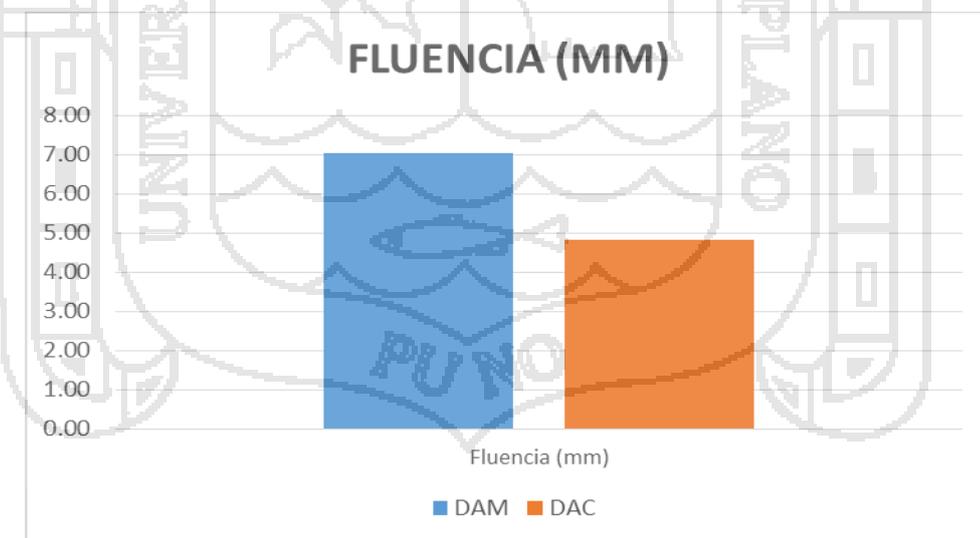
TABLA N° 37



FUENTE: PROPIA

El flujo de los asfaltos convencionales es de 4.81 mm mientras de los asfaltos modificados con caucho reciclado es de 7.03 mm, siendo superior en la fluencia en 2.22 mm. Este incremento de flujo causa en las mezclas asfálticas demasiada plasticidad y tienen tendencia a deformarse bajo las cargas del tránsito y el aumento de temperatura.

TABLA N° 38

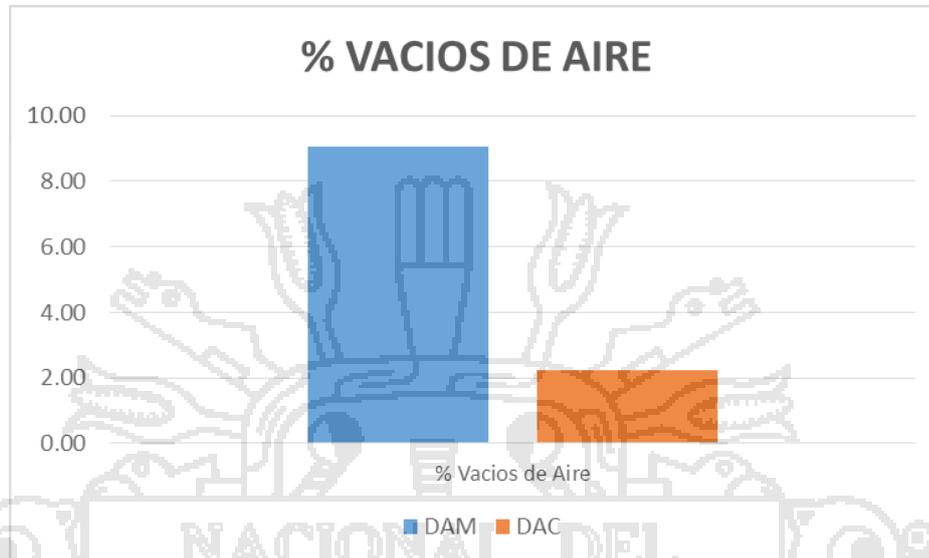


FUENTE: PROPIA

El porcentaje de vacíos de los asfaltos convencionales es de 2.25% mientras de los asfaltos modificados con caucho reciclado es de 9.06%, siendo superior en

la fluencia en 6.81%. Esto debido a que el caucho genera vacíos por su forma misma y al momento de compactar amortigua los golpes.

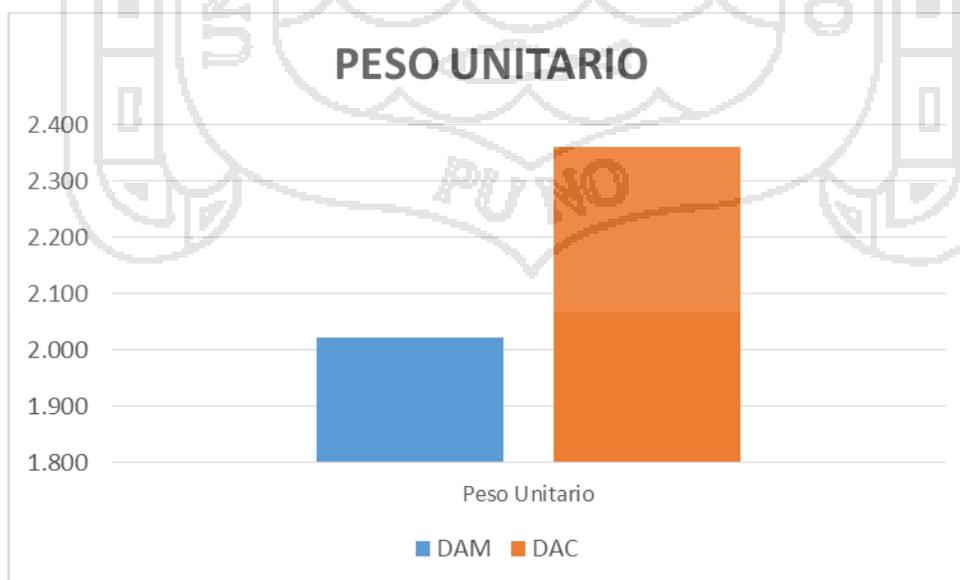
TABLA N° 39



FUENTE: PROPIA

El peso unitario de los asfaltos convencionales es de 2.362, mientras de los asfaltos modificados con caucho reciclado es de 2.0230, siendo inferior en 0.339. Esto debido a que el caucho tiene un peso específico menor ya que las probetas modificadas tiene más volumen mayor.

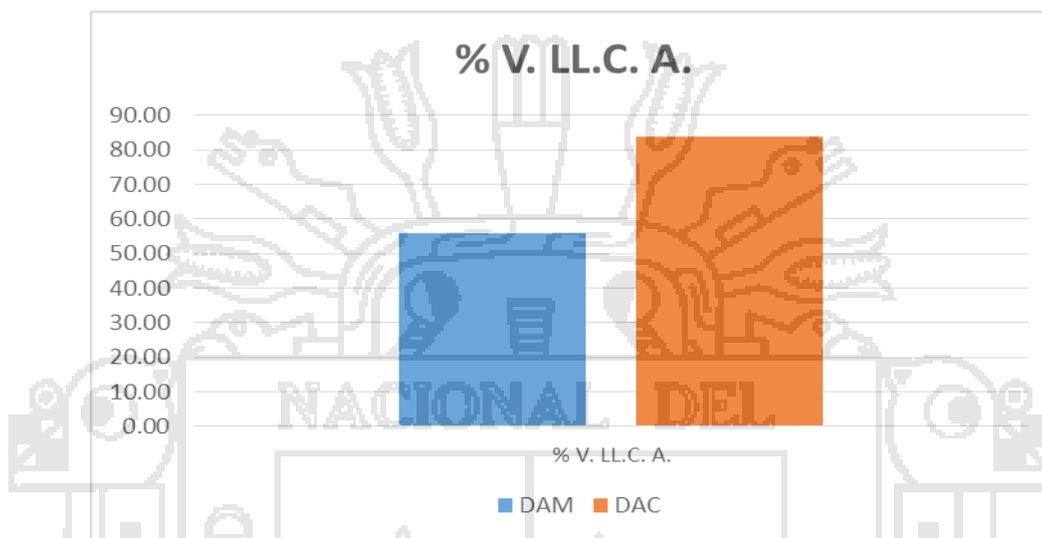
TABLA N° 40



FUENTE: PROPIA

Los vacíos llenados de cemento asfáltico de los asfaltos convencionales es de 83.90%, mientras de los asfaltos modificados con caucho reciclado es de 55.90%, siendo inferior en 28%. Esto debido a que las probetas con caucho tienen más volumen.

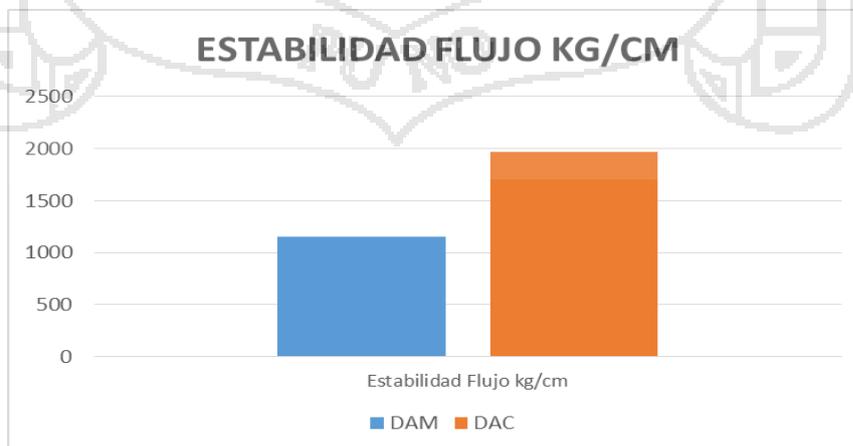
TABLA N° 41



FUENTE: PROPIA

La relación estabilidad flujo o rigidez de los asfaltos convencionales es de 1965, mientras de los asfaltos modificados con caucho reciclado es de 1149, siendo inferior en 816. Esto debido a que las probetas con caucho tiene un flujo muy elevado lo cual disminuye la estabilidad.

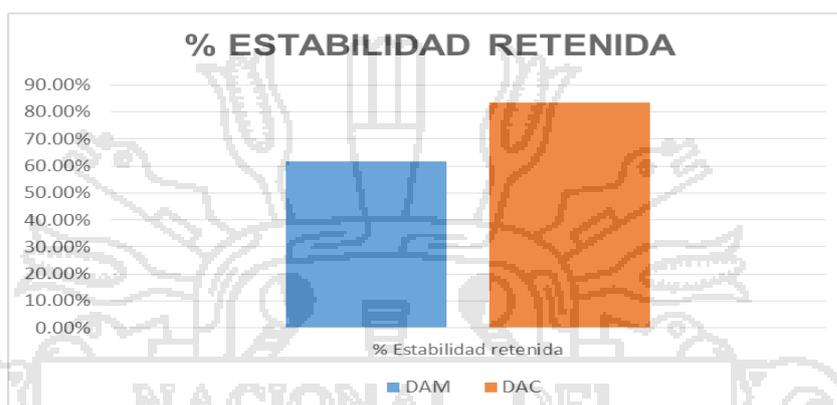
TABLA N° 42



FUENTE: PROPIA

El valor de estabilidad retenida de los asfaltos convencionales es de 83.46% mientras de los asfaltos modificados con caucho reciclado es de 61.78%, siendo inferior en 21.68%. Esto hace que las probetas con caucho sean más frágiles a la fatiga al tránsito esto e climas severos.

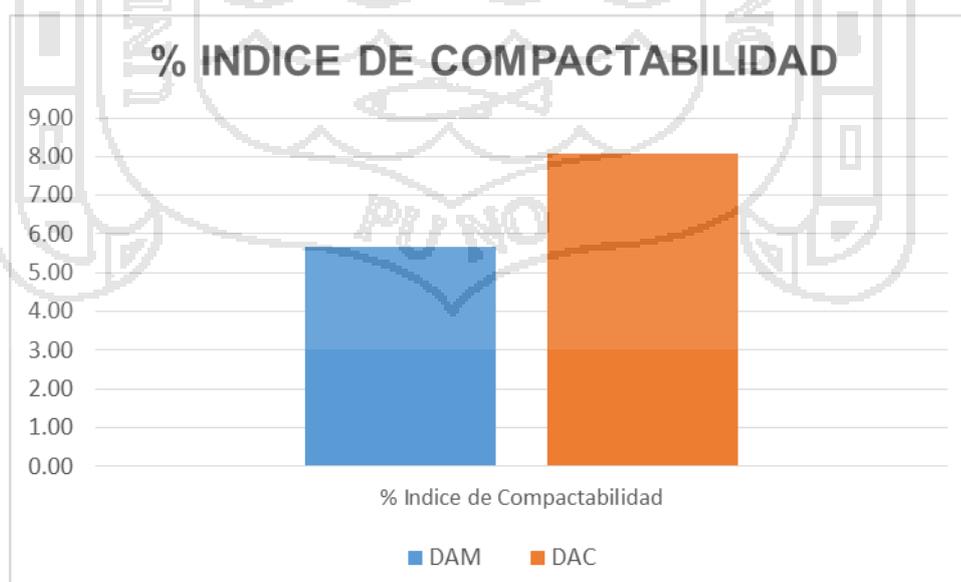
TABLA N° 43



FUENTE: PROPIA

El índice de compactibilidad de los asfaltos convencionales es de 8.08% mientras de los asfaltos modificados con caucho reciclado es de 5.67%, siendo inferior en 2.41%. esto significa que las mezclas modificadas no se compactan bien ya que el caucho amortigua la compactación.

TABLA N° 44



FUENTE: PROPIA

4.1.2. CONTRASTACION DE LAS HIPOTESIS ESPECÍFICAS.

4.1.2.1. CONTRASTACION DE HIPOTESIS ESPECÍFICAS I.

“El caucho reciclado de llanta, tiene un mejor comportamiento en la mezcla asfáltica, haciendo mejor su comportamiento mecánico”.

De acuerdo al análisis hecho en 4.1.1 sección A, de los valores obtenidos y mostrados en la tabla 36. Damos por rechazada la hipótesis I planteada, ya que los valores de los ensayos realizados en el laboratorio están por debajo de lo que las especificaciones normativas nos piden.

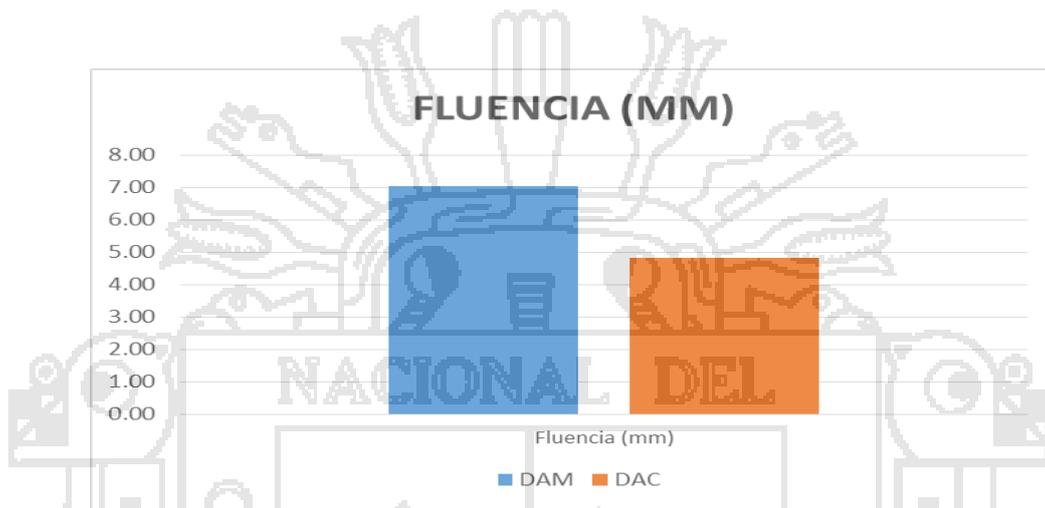
Por lo que el caucho reciclado con llanta no tiene un mejor comportamiento en las mezclas asfálticas. Al momento de comparar nuestro diseño de asfalto modificado (DAM) y el diseño de asfalto convencional (DAC) a nivel de mezcla de agregados, tanto en DAC como en DAM, estos diseños de agregados cumplen de acuerdo a las normas. Pero al momento de evaluar los valores obtenidos en las roturas de las briquetas nos dimos cuenta que el DAM no cumple las normas.

4.1.2.2. CONTRASTACION DE HIPOTESIS ESPECÍFICAS II

➤ **“Mejora la flexibilidad y la elasticidad a cambios de temperatura”**

De acuerdo al análisis hecho en 4.1.1 sección A. El flujo de los asfaltos convencionales es de 4.81 mm mientras de los asfaltos modificados con caucho reciclado es de 7.03 mm, siendo superior en la fluencia en 2.22 mm. Lo cual aparentemente nos muestra que los DAM trabajan mejor en condiciones de alta y baja temperatura como es en la zona de estudio. Sin embargo las especificaciones normativas nos dan un rango de 3 a 5 mm de flujo.

Este incremento de flujo causa en las mezclas asfálticas demasiada plasticidad y tienen tendencia a deformarse bajo las cargas del tránsito y el aumento de temperatura. Por lo cual nuestro flujo del DAM si es mayor q el flujo del DAC pero no de la forma que mejore las condiciones ante el cambio de temperatura.

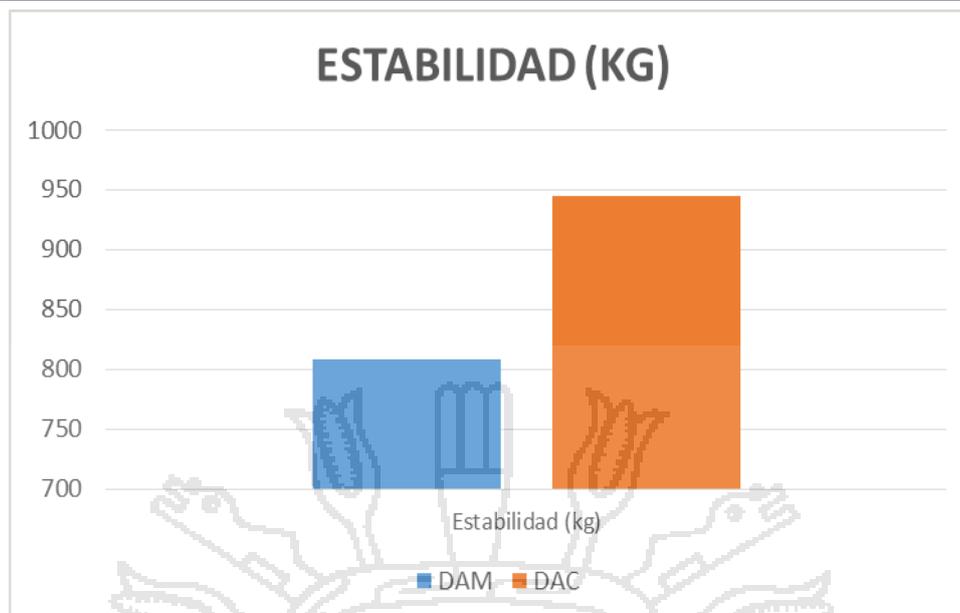


FUENTE: PROPIA

4.1.2.3. CONTRASTACION DE HIPOTESIS ESPECÍFICAS III

“Mejora el comportamiento a la fatiga”

De acuerdo al análisis hecho en 4.1.1 sección A. La estabilidad de los asfaltos convencionales es de 945 kg mientras que los asfaltos modificados con caucho es de 808 kg, siendo inferior a la estabilidad convencional en 137 kg, esta disminución de estabilidad aumenta las fallas por fatiga que se produce en las vías asfaltadas debido a la baja estabilidad del asfalto.



FUENTE: PROPIA

4.1.2.4. CONTRASTACION DE HIPOTESIS ESPECÍFICAS IV.

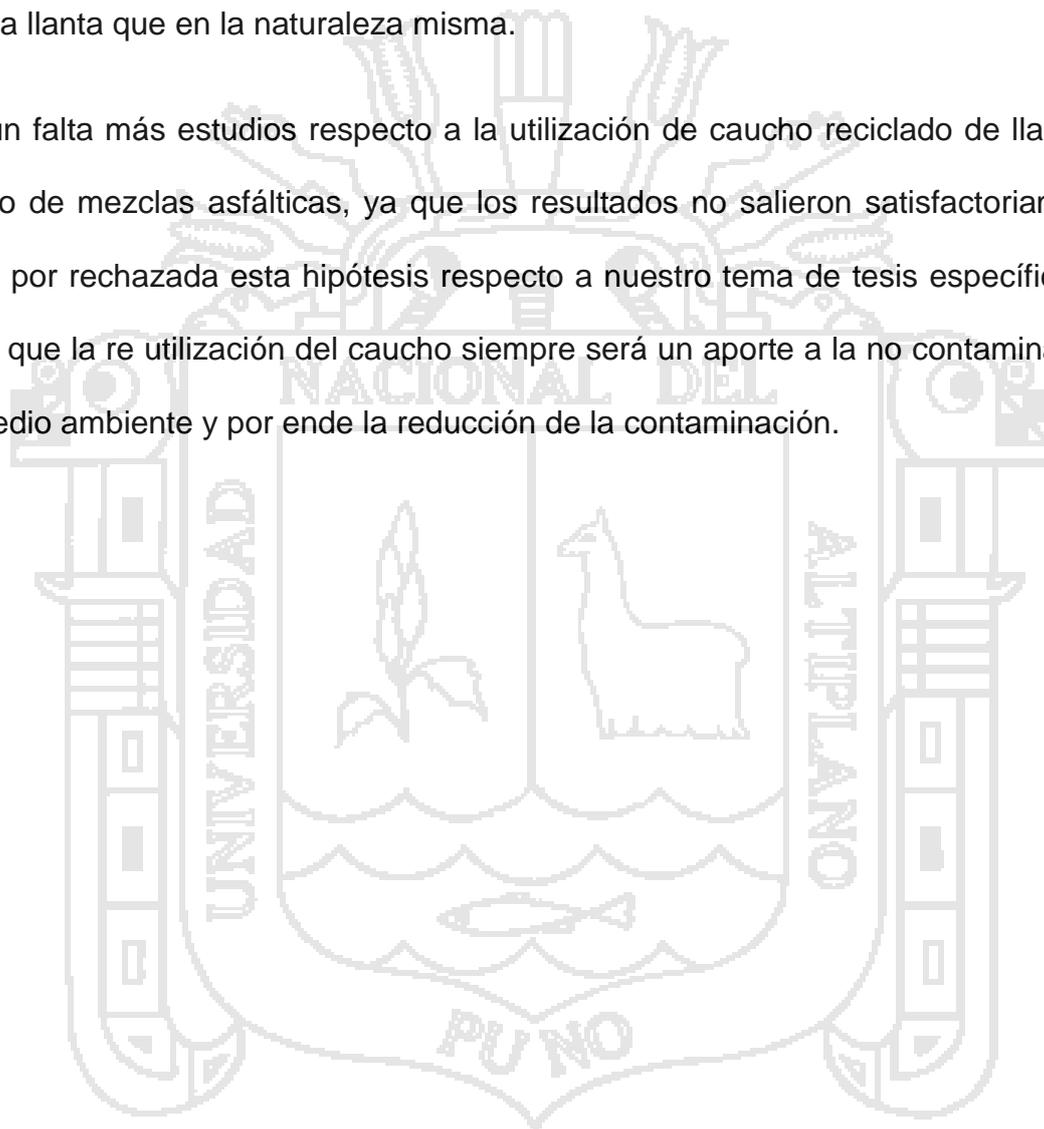
“Reduce la contaminación ambiental”.

Siempre la re utilización de materiales serán un aporte para el medio ambiente, como ya se vio en el capítulo II los neumáticos tienen gran cantidad de compuestos químicos tóxicos al ser quemados, que es la mayoría a donde va a parar los neumáticos, además los neumáticos no son materiales los cuales se puedan volver a su forma original.

El 70% de las llantas son incineradas como combustible en hornos de producción panelera y de cemento entre otros, afectando el medio ambiente y la salud pública a causa de las emisiones de contaminantes carcinogénicos y mutagénicos como lo son los compuestos orgánicos volátiles (COV's) y los hidrocarburos aromáticos polinucleares (HAP's), además de otros elementos que causan afecciones al sistema respiratorio y circulatorio.

Por otra parte, si se opta por almacenar las llantas viejas, aparte de la contaminación visual que estas generan, también se observan múltiples inconvenientes como la proliferación de roedores o insectos; dentro de los que se encuentra el mosquito transmisor del dengue y la encefalitis, cuya tasa de reproducción se ha estimado que es 4.000 veces mayor en el agua estancada de una llanta que en la naturaleza misma.

Aún falta más estudios respecto a la utilización de caucho reciclado de llanta en el uso de mezclas asfálticas, ya que los resultados no salieron satisfactoriamente se da por rechazada esta hipótesis respecto a nuestro tema de tesis específicamente, ya que la re utilización del caucho siempre será un aporte a la no contaminación del medio ambiente y por ende la reducción de la contaminación.



CAPITULO V

5. CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS

5.1. CONCLUSIONES

5.1.1. CONCLUSIONES RESPECTO A LA HIPOTESIS GENERAL

- La mezcla asfáltica modificada con caucho reciclado de llanta no presenta mejoras en el comportamiento físico - mecánicas en ninguno de los distintos diseños realizados con caucho reciclado de llanta que se hizo en el laboratorio, ya que los valores obtenidos por el ensayo Marshall están por debajo de la mezcla asfáltica convencional y las especificaciones normativas a la cual nos regimos.

5.1.2. CONCLUSIONES RESPECTO A LA HIPOTESIS ESPECÍFICA I.

- De acuerdo al análisis hecho en 4.1.1 sección A, de los valores obtenidos y mostrados en la tabla 36, están por debajo de lo que las especificaciones normativas nos piden.

En la mezcla de los agregados, usando el caucho reciclado de llanta como un agregado más en dicha mezcla, nos cumple con los rangos establecidos por el MTC, sin embargo al momento de los resultados del ensayo

Marshall, los valores están por debajo de los parámetros establecidos.

5.1.3. CONCLUSIONES RESPECTO A LA HIPOTESIS ESPECÍFICA II.

- El flujo del Diseño Asfáltico Modificado es mayor q el flujo del Diseño Asfáltico Convencional e incluso que las normas establecidas. Esto no mejora la flexibilidad y elasticidad ante los cambio de temperatura que se producen en nuestra zona, llegaría a producirse más casos de aguellamiento en las carreteras.

5.1.4. CONCLUSIONES RESPECTO A LA HIPOTESIS ESPECÍFICA III.

- La estabilidad de los asfaltos modificados con caucho reciclado de llanta están por debajo del Asfáltico Convencional e incluso que las normas establecidas. Esta disminución de la estabilidad, aumenta las fallas por fatiga que se produce en las vías asfaltadas debido a la baja estabilidad del asfalto.

5.1.5. CONCLUSIONES RESPECTO A LA HIPOTESIS ESPECÍFICA IV.

- La utilización de caucho reciclado de llanta en el uso de mezclas asfálticas o en cualquier otro uso reducirá la contaminación ambiental, ya que la reutilización del caucho no producirá efectos contaminantes como lo hacen al ser quemados, proliferación de insectos, etc.
- Los neumáticos no son materiales, los cuales se puedan volver a su forma original.

5.2. SUGERENCIAS

- Se recomienda a las instituciones interesadas implementar laboratorios con equipos especializados que permitan efectuar estudios más profundos. A si mismo se debe de capacitar al personal técnico de la planta de asfalto en nuevos tipos de asfaltos modificados.
- Se recomienda realizar más estudios de los efectos del caucho reciclado de llanta en mezclas asfálticas, ya que el caucho tiene en su composición química elementos los cuales hacen más durable y resistente al neumático en conjunto. Así como también probar el uso de otros compuestos químicos en la mezcla asfáltica.
- Realizar todo tipo de aportes bibliográficos en el diseño de mezclas asfálticas con caucho reciclado de llanta, ya que no se tiene mucha información respecto a este tema.
- Incentivar e apoyar a los distintos tipos de plantas recicladoras de neumáticos para dar un uso adecuado al caucho reciclado de llantas. Ya que el caucho reciclado de llanta se puede usar para distintos productos finales y a ser un aporte a la no contaminación del medio ambiente.

BIBLIOGRAFIA

1. AFANASIEVA, N & ALVAREZ, M. COLCIENCIAS. Estudio del proceso de envejecimiento de los asfaltos colombianos bajo la acción de algunos factores climáticos. Informe de Investigación Parte 1, 2 y 3, Bogotá, Colombia, 2000.
2. ALCALDIA MAYOR DE BOGOTA DC. INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO y UNIVERSIDAD DE LOS ANDES. Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas. Bogota. 2002.
3. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standards compilations. USA. 2005.
4. BIRD, R; STEMART W. N. y LIGHFOOT E. N. Fenómenos de transporte, 2 edición, Barcelona, Reverte, 1992, pág. 1-3, 1-10.
5. CORASFALTOS. Proyecto de investigación transferencia y desarrollo de tecnología para la construcción de una planta de modificación de asfaltos utilizados en pavimentos. Bucaramanga. 2004.
6. CORASFALTOS; SENA; ECOPETROL ICP; MINA SAN PEDRO; TEXPAR ENERGY INC; INVIAS; MPI. Manuales para uso de asfaltos naturales, crudos pesados y asfaltos modificados. 4as Jornadas internacionales del asfalto. Cartagena. 2004.
7. INSTITUTO NACIONAL DE VIAS (INV), MINISTERIO DE TRANSPORTE. Artículos 400 y 450, Especificaciones generales de construcción de carreteras, Construcción de carreteras, Contenido general, tomo 1, capítulo1. Colombia: INV, 1998.
8. ECOPETROL-ICP, Datos de control de operación de la planta UOP II, Estudio investigativo, Barrancabermeja, 2005.
9. PEREA, Oscar y VILLABONA, Adriana. Inventario Nacional de plantas mezcladoras de asfalto en caliente, Tesis de grado. Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander, 1998.
10. PERRY, Robert H. y GREN, Don W. Chemical Engineers' Handbook, 7 edición, Mexico, McGraw-Hill, 1997, pag 20-5, 20-7.

11. PETERS, Max S. y TIMMERHAUS, Klaus D. Plant Design and Economics for Chemical Engineers, 4 edición, Singapore, 1991, pag 150-165, 295-310.
12. RAY, Martins S. y JOHNSTON, David W. Chemical Engineering Design Project, 1 edición, Glasgow, Bell and Bain, 1989, pag 87-97
13. REY, Mauricio y HERNANDEZ, Robinson, Diseño de una planta a nivel semipiloto para la preparación de mezclas azufro-asfálticas, tesis de grado. Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander, 1999.
14. ROBERTS, Freddy L; KANDHAL, Printhis. y DUNNING, Robert L. Investigation and evaluation of ground tire rubber in hot mix. 1989
15. Tesis "Asfalto Ahulado" del instituto tecnológico de la construcción, A.C. – México. 2004
16. Tesis "Comportamiento de mezclas asfálticas en caliente PEN 120 – 150 modificado con polímero tipo III (PS)" de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, UNA – Puno, 2012.
17. Tesis "Modificación de un Asfalto con caucho reciclado de llanta para su aplicación en pavimentos" de la universidad industrial de Santander – facultad de ciencias fisicoquímicas – escuela profesional de química, Bucaramanga, Colombia, 2005.
18. TREYBAL, Robert E. Operaciones de Transferencia de Masa, 2 edición, México, McGraw-Hill, 1992, pág. 723-742.
19. UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA. GRUPO DE PAVIMENTOS Y MATERIALES DE INGENIERÍA. Estudio del comportamiento de mezclas densas en caliente elaboradas con asfaltos modificados con policloruro de vinilo, látex natural y caucho reciclado. 4as Jornadas internacionales del asfalto. Cartagena. 2004.
20. UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN ASFALTOS GIAS. Asfaltos modificados: reología, química y su relación con propiedades mecánicas en mezclas densas fabricadas en Caliente. 4as Jornadas internacionales del asfalto. Cartagena. 2004.
21. US Patent 5,835,401. Recycled rubber in a polymer modified asphalt and a method of making same.

22. US Patent 5,938,832. Crumb rubber modifier asphalt with enhanced setting characteristics.
23. US Patent 5,990,207. Mixtures of bitumen, of powdered rubber waste and of polymer, employed as road binder.
24. USMANI, Artur M. Asphalt science and Technology. 1997, pag. 385-341.
25. <http://www.arqhys.com/arquitectura/asfalto-composicion.html>
26. <http://www.construaprende.com/Trabajos/T7/T7pag09.html>
27. <http://www.ecopetrol.com.co>
28. http://www.invias.gov.co/info/manuales/Normas/especificaciones_construccion/especificaciones/Art400.htm
29. <http://www.monografias.com/trabajos13/neuma/neuma.shtml>
30. http://www.rubberizedasphalt.org/ar_design_guide/Vol_1.pdf
31. http://www.tytlabs.co.jp/english/review/rev381epdf/e381_039fukumori.pdf
32. <http://www.matche.com/>