

**“OBTENCIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE ASFALTO PARA EL DISEÑO
DE MEZCLAS DENSAS EN CALIENTE, CON CEMENTO ASFALTICO
NORMAL Y MODIFICADO, MEDIANTE EL MÉTODO MARSHALL,
EMPLEANDO AGREGADOS PÉTREOS DE LA CANTERA RIO TÉLLEZ,
VEREDA SAN JOSÉ MUNICIPIO DE FUNES, DEPARTAMENTO DE NARIÑO Y
ASFALTO DE BARRANCABERMEJA”**

OSCAR EDUARDO URBANO OROZCO

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
SAN JUAN DE PASTO
2014**

**“OBTENCIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE ASFALTO PARA EL DISEÑO
DE MEZCLAS DENSAS EN CALIENTE, CON CEMENTO ASFALTICO
NORMAL Y MODIFICADO, MEDIANTE EL MÉTODO MARSHALL,
EMPLEANDO AGREGADOS PÉTREOS DE LA CANTERA RIO TÉLLEZ,
VEREDA SAN JOSÉ MUNICIPIO DE FUNES, DEPARTAMENTO DE NARIÑO Y
ASFALTO DE BARRANCABERMEJA”**

OSCAR EDUARDO URBANO OROZCO

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Civil**

**Director de Investigación:
M.Sc. JORGE LUIS ARGOTY BURBANO**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
SAN JUAN DE PASTO
2014**

NOTA DE RESPONSABILIDAD

“Las ideas y conclusiones aportadas en el Trabajo de Grado, son responsabilidad exclusiva del autor”.

Artículo 1 del acuerdo N°. 324 de Octubre 11 de 1966, emanado del Honorable Concejo de la Universidad de Nariño.

“La Universidad de Nariño no se hace responsable de las opiniones o resultados obtenidos en el presente trabajo y para su publicación priman las normas sobre el derecho de autor

Artículo 13° del acuerdo No. 005 de enero 26 de 2010, emanado por el Honorable Concejo Académico de la Universidad de Nariño”

Nota de aceptación

Firma del Presidente de Tesis

Firma del jurado

Firma del jurado

San Juan de Pasto, Octubre de 2013

RESUMEN

Esta investigación consistió en la obtención del porcentaje óptimo de cemento asfáltico para una mezcla asfáltica normal y otra modificada por la adición de fibras de polipropileno, para lo anterior se identificó y caracterizo los agregados pétreos provenientes de la cantera “RIO TÉLLEZ, VEREDA SAN JOSÉ MUNICIPIO DE FUNES, DEPARTAMENTO DE NARIÑO” que generalmente se emplean en este medio para este tipo de pavimentos, por lo cual fueron sometidos a los ensayos exigidos por el instituto nacional de vías, teniendo en cuenta las condiciones más difíciles de tránsito.

Estas mezclas se realizaron con cemento asfáltico de Barrancabermeja del cual el proveedor se otorga los ensayos sobre las características del asfalto.

Con lo mencionado previamente se realizó una comparación de las propiedades obtenidas en cada una de estas mezclas, en cuanto a la estabilidad, el flujo y además una comparación en los precios de producción de cada una de ellas.

ABSTRACT

This research involved obtaining optimum percentage of asphalt cement for asphalt mixture normal and one modified by the addition of polypropylene fibers, for the above was identified and characterized the stony aggregates from the quarry "TÉLLEZ RIVER, SAN JOSE SIDEWALK, MUNICIPALITY FUNES, NARIÑO" it is generally used in our environment for this type of flooring, so were subjected to the tests prescribed by the National Institute of way, taking into account the difficult traffic conditions.

These mixtures were made with Barrancabermeja's asphalt cement which the supplier gives us trials on the characteristics of the asphalt.

As mentioned previously were compared to the properties obtained in each of these mixtures, in terms of stability, flow and further a comparison in the production rates of each of them.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	14
1. CALIBRACIÓN DE LA PRENSA MARSHALL.....	17
1.1 AMPLIFICADORES OPERACIONALES	17
1.2 CALIBRACIÓN DE LA CELDA DE CARGA	17
1.2.1 Compensación al error por temperatura.....	18
2. CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS	23
2.1 SELECCIÓN DEL MATERIAL.....	23
2.2 ENSAYOS DE LABORATORIO FÍSICO MECÁNICOS A LOS MATERIALES	23
2.2.1 Ensayo de composición	24
2.2.2 Ensayo de dureza	33
2.2.3 Ensayo de durabilidad.....	36
2.2.4 Ensayos de limpieza	39
2.2.6 Gravedad de las partículas	48
3. DOSIFICACIÓN DE MEZCLAS DENSAS EN CALIENTE MDC 2 (INV450 – 07).....	55
3.1 MÉTODO MARSHALL	55
3.1.1 Descripción del método.....	55
3.1.2 Equipo para realizar el ensayo:.....	56
3.1.3 Preparación de las briquetas.....	59
3.1.4 Determinación del peso específico “bulk”.....	65
3.1.5 Ensayo de estabilidad y flujo.....	67
3.1.6 Análisis de densidad y vacíos	67
3.1.7 Representación gráfica Marshall convencional.	70
3.1.8 Contenido óptimo de asfalto.....	75
3.2 CRITERIOS QUE IMPONE LAS ESPECIFICACIONES PARA EL CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO	76
4. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DE ENSAYO CON EL MÉTODO MARSHALL CON ASFÁLTO NORMAL Y MODIFICADO	77
5. ANÁLISIS DE COSTOS	78
7. CONCLUSIONES.....	81
8. RECOMENDACIONES	82
BIBLIOGRAFÍA	83

LISTA DE IMAGENES

	Pág.
Imagen 1. Celda de carga FC23.....	18
Imagen 2. Curva característica de la celda de carga FC23	19
Imagen 3. Curva característica de amplificador de voltaje	20
Imagen 4. Visualización de los datos en modulo LCD	20
Imagen 5. Curva de calibración celda de carga laboratorio de suelos.....	21
Imagen 6. Curva de comparación prensa Marshall datos sensor de carga	22
Imagen 7. Tamaño del tamiz vs porcentaje retenido en cada tamiz material grueso	27
Imagen 8. Tamaño del tamiz Vs porcentaje retenido en cada tamiz materia I fino	28
Imagen 9. Tabla ajuste granulometrico (metodo grafico).....	30
Imagen 10. Ajuste granulométrico método gráfico.....	31
Imagen 11. Curva ajuste granulométrico	33
Imagen 12. Descripción máquina de compresión	59
Imagen 13. Grafica peso unitario.....	72
Imagen 14. Grafica de estabilidad	72
Imagen 15. Grafica de flujo.....	73
Imagen 16. Gráfica porcentaje vacíos totales muestra.....	73
Imagen 17. Vacíos en el agregado.	74
Imagen 18. Vacíos llenos de asfalto en el agregado.	74

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Datos para la calibración por software	21
Tabla 2. Gradación material grueso realizado en laboratorio a la muestra proveniente de la cantera del rio Téllez	26
Tabla 3. Gradación material fino	27
Tabla 4. Gradaciones ideales Fuller - Thompson de agregados para concreto en porcentaje que pasa	29
Tabla 5. Ajuste granulométrico para mezclas asfálticas	32
Tabla 6. Resultados desgaste en la máquina de los ángeles	34
Tabla 7. Gradación para ensayo micro deval	35
Tabla 8. Resultados ensayo micro deval	36
Tabla 9. Resultados ensayo solidez en sulfato de sodio agregado fino	38
Tabla 10. Resultados ensayo solidez en sulfato de magnesio agregado fino.....	38
Tabla 11. Resultados ensayo solidez en sulfato de sodio agregado grueso	39
Tabla 12. Resultados ensayo solidez en sulfato de magnesio agregado	39
Tabla 13. Resultados ensayo equivalente de arena en agregado fino	41
Tabla 14. Resultados ensayo caras fracturadas.....	44
Tabla 15. Resultados ensayo índice de alargamiento.	46
Tabla 16. Resultados ensayo aplanamiento	47
Tabla 17. Resultados ensayo partículas planas y alargadas.....	47
Tabla 18. Resultados gravedad específica agregado grueso	51
Tabla 19. Resultados de ensayo de gravedad específica y absorción de agregados finos	52
Tabla 20. Resumen de ensayos a materiales pétreos provenientes de la cantera Rio Téllez, vereda San José, municipio de Funes	53
Tabla 21. Temperaturas óptimas de los asfaltos colombianos.	60
Tabla 22. Número de golpes por cara según la intensidad del transito	60
Tabla 23. Resultados método Marshall	69
Tabla 24. Resumen ensayo Marshall	76

Tabla 25.	Criterios de diseño para mezclas asfálticas en caliente según el método Marshall (Instituto del asfalto- Art 400.2.4).....	76
Tabla 26.	Resultados método Marshall asfalto modificado.....	77
Tabla 27.	Resumen resultados Marshall modificado	77
Tabla 28.	Comparación resultados Marshall con asfalto normal y modificado ..	77
Tabla 29.	Precios m ³ de mezcla densa en caliente con asfalto convencional	79
Tabla 30.	Precios m ³ de una mezcla densa en caliente con asfalto modificado con polipropileno.	80

LISTA DE FOTOGRAFÍA

	Pág.
Fotografía 1. Cuarteo material en laboratorio agregado grueso	23
Fotografía 2. Cuarteo material en laboratorio agregado fino	24
Fotografía 3. Abertura tamices	25
Fotografía 4. Serie de tamices	25
Fotografía 5. Tamizado manual y material retenido en cada tamiz	26
Fotografía 6. Proceso de abrasión y residuos resultantes, Maquina de los ángeles	33
Fotografía 7. Muestra para la determinación de la resistencia al desgaste por abrasión Micro Deval	35
Fotografía 8. Ensayo Micro Deval	35
Fotografía 9. Ensayo solidos y resistencia al sulfato de sodio y magnesio	37
Fotografía 10. Muestra de agregado y preparación de probetas para ensayo de equivalente de arena.	40
Fotografía 11. Alturas de las arcillas durante y después del ensayo de Equivalente de arena	40
Fotografía 12. Ensayo contenido de impurezas	42
Fotografía 13. Ensayo partículas fracturadas mecánicamente.	44
Fotografía 14. Ensayo partículas planas y alargadas. Muestra y proceso de conteo y selección de partículas alargadas.	45
Fotografía 15. Ensayo partículas planas y alargadas. Selección partículas planas y resultados del ensayo.	46
Fotografía 16. Muestra de agregado fino sumergida en agua para ensayo de gravedad específica.	49
Fotografía 17. Prueba del cono para determinar humedad del material a ensayar (Gravedad específica).	49

Fotografía 18. Extracción de aire al material fino más agua en ensayo de gravedad específica.	50
Fotografía 19. Muestras secas de agregado fino listas para pesaje después de ensayo de gravedad específica.	50
Fotografía 20. Prensa Universal	57
Fotografía 21. Anillo de carga y medidor de flujo.....	58
Fotografía 22. Calentamiento material pétreo para realización de briquetas.....	61
Fotografía 23. Calentamiento cemento asfáltico para realización de briquetas...	61
Fotografía 24. Cantidad de material pétreo para cada briqueta.....	62
Fotografía 25. Incorporación del cemento asfáltico al agregado pétreo	62
Fotografía 26. Mezcla de material pétreo y cemento asfáltico	63
Fotografía 27. Molde de compactación con la mezcla densa en caliente de asfalto convencional.....	63
Fotografía 28. Toma de temperatura para la compactación	64
Fotografía 29. Compactación de la briqueta	64
Fotografía 30. Briqueta terminada	65
Fotografía 31. Peso de la muestra en el aire para densidad bulk.....	66
Fotografía 32. Peso de la muestra sumergida en el agua para densidad bulk	67
Fotografía 33. Ensayo de estabilidad y flujo	67
Fotografía 34. Mezcla de materiales para realizar las briquetas con el polipropileno	77
Fotografía 35. Mezcla de materiales.....	77
Fotografía 36. Temperatura para la compactación	77
Fotografía 37. Briquetas con asfalto modificado.....	77

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. DENSIDAD MÁXIMA TEÓRICA (RICE)	83
ANEXO B. ENSAYOS DE LABORATORIO FÍSICO MECÁNICOS A LOS MATERIALES	83
ANEXO C. CARACTERISTICAS DE ASFALTO BARRANCAMERMEJA.....	83
ANEXO D. RESULTADOS DE DETERMINACIÓN DEL % ÓPTIMO DE ASFALTO CON EL ENSAYO MARSHALL POR EL MÉTODO DE LA NAPA.....	83
ANEXO E. DETERMINACIÓN DE TEMPERATURAS DE COMPACTACIÓN Y MEZCLADO EN BASE A LA CURVA DE SUSCEPTIBILIDAD TÉRMICA.....	83

INTRODUCCIÓN

Como es bien sabido por todos, el mundo se encuentra en constante desarrollo y crecimiento, tal es el caso de los medios de transporte, que cada día aumenta tanto en su número como en su capacidad de carga, lo cual se transmite a las vías en repeticiones y esfuerzos de carga que combinados con los agentes abrasivos del medio ambiente y al incorrecto empleo de los agregados que conforman la mezcla asfáltica disponible en cada región, hacen que se presenten deterioros importantes como las deformaciones plásticas permanentes en las capas de rodadura de la red vial del departamento de Nariño, lo cual obliga a los ingenieros a buscar métodos eficientes para mitigar dichos efectos, es así como en este trabajo de grado se presentan los resultados de la investigación realizada en el programa de ingeniería civil en el área de pavimentos; estudiando la forma de mejorar las capas de rodamiento de pavimento asfáltico tradicionales, introduciendo mezclas asfálticas mejoradas con los materiales pétreos disponibles en la región, los cuales se clasifican y caracterizan según exige la norma INVIAS 2007 en el artículo 400, para un óptimo aprovechamiento de sus condiciones, es decir esta investigación pretende caracterizar los materiales pétreos de la cantera río Téllez, vereda San José municipio de Funes, departamento de Nariño y además, utilizar fibras de polipropileno para reforzar las mezclas asfálticas y mediante el método Marshall ampliamente conocido, dosificar los porcentajes de cada componente de la mezcla con los materiales que hay a disposición de dicha cantera, logrando así un mejor comportamiento frente a los deterioros que sufren este tipo de pavimentos, buscando que sean flexibles, resistentes y capaces de desarrollar una alta energía de fractura.

Para lo anterior es indispensable para esta investigación rectificar y verificar la precisión de la prensa Marshall para lograr garantizar resultados exitosos y confiables dentro del laboratorio de suelos de la Universidad de Nariño.

Siguiendo el procedimiento normal de la investigación se procede a realizar un análisis físico-mecánico de los materiales de la cantera río Téllez, vereda San José Municipio de Funes, departamento de Nariño, teniendo en cuenta el cumplimiento de las especificaciones técnicas dadas en la tabla 400.1 (c) del artículo 400 INVIAS 2007, esto garantiza que los materiales granulares sean los adecuados, ya que de esto depende en gran medida el desempeño y la vida útil de una superficie de rodadura asfáltica de una vía.

A continuación, se desarrolla y elabora una serie de análisis teórico-prácticos (*Estabilidad, flujo, densidad y vacíos*), los cuales son necesarios para determinar el óptimo contenido de asfalto, utilizando los materiales pétreos de la cantera río Téllez, vereda san José municipio de Funes, departamento de Nariño y asfalto de

la refinería de Barrancabermeja (*Mayormente utilizado en el departamento de Nariño*), a través del método Marshall, el cual determina un contenido óptimo de asfalto para las granulometrías obtenidas en laboratorio y una mezcla elaborada con los agregados mencionados anteriormente.

Partiendo que la adición de fibras de polipropileno al ligante asfáltico mejora las características de la mezcla, se busca hacer una comparación entre una mezcla asfáltica normal y otra modificada con fibras de polipropileno para observar las diferencias en valores de estabilidad y flujo, además se realiza también una evaluación de costos en la producción de cada una de las mezclas.

JUSTIFICACIÓN

En la ingeniería de vías el diseño de mezclas asfálticas cuenta con diferentes métodos para establecer un proyecto óptimo en laboratorio; el más utilizado y conocido en Colombia es el método Marshall “NORMA INV 450-07”, que en este medio poco se ha implementado, por la carencia de este ensayo, lo cual se ha llevado a fallas en el desempeño de la carpeta asfáltica en su vida útil.

En la actualidad la importancia de determinar el porcentaje óptimo de asfalto para los diseño de mezclas de este tipo, radica en lograr establecer a través de ensayos de laboratorio (caracterización mecánica o física), que las propiedades de los materiales granulares empleados, sean los adecuados, ya que de estos depende en gran medida el desempeño y durabilidad de la superficie de rodamiento, lo que se traduce en comodidad para el usuario y disminución de costos por mantenimiento para el contratista. Es así como una parte de este estudio fue dirigido a la caracterización mecánica de los agregados de la cantera “CANTERA RIO TÉLLEZ, VEREDA SAN JOSÉ MUNICIPIO DE FUNES, DEPARTAMENTO DE NARIÑO”, con el fin de obtener datos puntuales sobre los porcentajes óptimos de agregados y asfalto para la mina en estudio, utilizando el equipo de laboratorio (prensa Marshall).

Últimamente se han introducido nuevas investigaciones en mezclas asfálticas en Colombia, con la finalidad de disminuir deterioros comunes en estas vías, algunas de estas investigaciones han conducido estudios con empleo de diferentes tipos de fibras, todo esto para reforzar las mezclas asfálticas producidas; en este caso específicamente se emplean fibras de polipropileno para mejorar la resistencia en los pavimentos, las cuales son el objeto de este estudio, ya que son de bajo costo y están a plena disposición, puesto que son utilizadas igualmente en la fabricación de sacos para uso agrícola, que tienen bastante salida en nuestro medio.

OBJETIVOS

Objetivo general: Determinar y comparar el contenido óptimo de ligante asfáltico para una mezcla densa en caliente con asfalto normal y asfalto modificado con fibras de polipropileno, así como también proporcionar información sobre las características físicas y mecánicas de los agregados de la cantera “CANTERA RIO TÉLLEZ, VEREDA SAN JOSÉ MUNICIPIO DE FUNES, DEPARTAMENTO DE NARIÑO”, para que cumpla con las especificaciones existentes de acuerdo a la INVIAS 2007.

Objetivos específicos:

- Implementar y calibrar el equipo para el desarrollo del ensayo Marshall:
- Caracterizar el agregado de la Cantera “CANTERA RIO TÉLLEZ, VEREDA SAN JOSÉ MUNICIPIO DE FUNES, DEPARTAMENTO DE NARIÑO” según la Norma vigente INV E-400.2.1 para mezclas asfálticas densas en caliente utilizando el método Marshall.
- Realizar el diseño Marshall determinando el contenido óptimo de ligante asfáltico para una mezcla densa en caliente con asfalto normal y asfalto modificado con fibras de polipropileno, utilizando el procedimiento del Instituto Nacional del Asfalto
- Comparar la estabilidad y el flujo de los dos tipos de mezcla (MDC-2) con asfalto normal y (MDC-2) con asfalto modificado con fibras de polipropileno extraídas de sacos rojos tejidos, usados generalmente en el transporte agrícola.
- Realizar un análisis de costos de la mezcla con asfalto normal vs. Los costos de la mezcla con asfalto modificado (economía).

1. CALIBRACIÓN DE LA PRENSA MARSHALL

La calibración es un proceso mediante el cual se garantiza que los resultados encontrados son confiables, pues cuando el equipo cumple con las especificaciones muestran características del material verdaderas con las cuales se obtienen óptimos diseños a un mejor rendimiento de la producción.

En el ensayo Marshall estudiado en este trabajo de grado, uno de los equipos más necesarios es la prensa la cual está involucrada en el estudio de la estabilidad y el flujo de la mezclas densa en caliente de asfalto, los cuales son uno de los parámetros más importantes para la evaluación final de la mezcla encontrando el porcentaje óptimo de asfalto. Por lo anterior, fue en este equipo en el cual se realizó la calibración para que de esta manera los resultados sean precisos, fiables y con total trazabilidad.

Por otra parte con la calibración en la prensa se busca optimizar el desarrollo de la investigación disminuyendo la incertidumbre y llevando a resultados precisos, reducción de costes en el desarrollo y la fabricación, y aumento de la rentabilidad.

Para la verificar la calibración de la prensa Marshall, se utilizó un amplificador operacional, por lo general, este aparato se utiliza para proporcionar cambios en la amplitud de voltaje, pero en este caso se lo utiliza para comparar los resultados dados por la prensa encontrada en la Universidad de Nariño y una celda de carga la cual ya está calibrada.

1.1 AMPLIFICADORES OPERACIONALES

Un amplificador operacional, es un amplificador diferencial de muy alta ganancia que posee alta impedancia de entrada y baja impedancia de salida. Por lo general, el amplificador operacional se utiliza para proporcionar cambios en la amplitud de voltaje (amplitud y polaridad), en osciladores, circuitos de filtro y muchos tipos de circuitos de instrumentación.

1.2 CALIBRACIÓN DE LA CELDA DE CARGA

Para lograr la calibración exitosa de la celda de carga, presente en el laboratorio de suelos de la Universidad de Nariño, Se hace uso de otra celda, con referencia FC23. Para seleccionar el sensor más óptimo para la variable de medición, se tomó en cuenta factores como el tamaño, tiempos de respuesta, rango de

funcionamiento, peso, voltaje de funcionamiento, etc. Todo esto para lograr la máxima eficacia en el censado.

Se considera óptima la celda de carga FC23, debido a su alto rango de trabajo (906 Kgf), además de sus características y funciones que se necesitan para censar fuerza y lograr la calibración de la otra celda. (ver imagen 1)

Características celda FC23 (Imagen 1):

- Bajo ruido.
- Sensor Robusto, con alto rango de capacidad.
- Alta confiabilidad.
- Tiempo de respuesta rápido.
- Ciclo largo de expectativa de vida.
- Baja deflexión.
- Diseño botón de carga compacto.
- Empaquetado industrial estándar.



Imagen 1. Celda de carga FC23

Es un transductor utilizado para convertir una fuerza en una señal eléctrica que en conjunto con el amplificador muestran una curva de calibración (figura 3) comparada con la curva característica del sensor (figura 2) en un compilador de programación del micro procesador da el resultado buscado.

1.2.1 Compensación al error por temperatura. Viene definido por el fabricante. Esta celda está compensada en temperatura en un rango de 0°C a 50°C. Por lo tanto, no hay necesidad de realizar un acondicionamiento electrónico extra para este factor. Considerando que en la ciudad de Pasto, el promedio de temperatura

está entre los 18°C y 20°C, promedio muy inferior a los 50°C que compensa la celda. . (ver imagen 2)

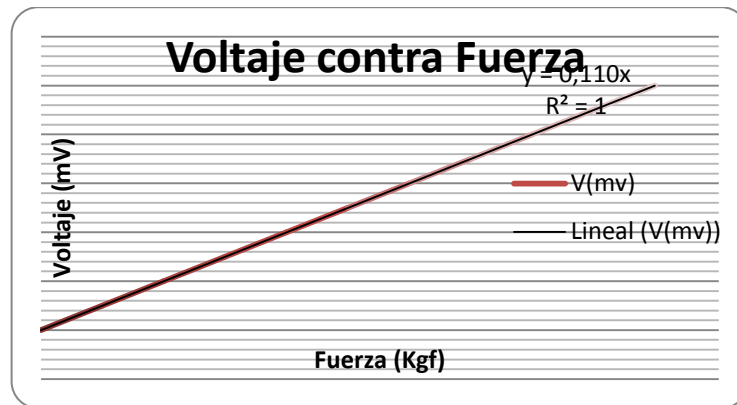


Imagen 2. Curva característica de la celda de carga FC23

En donde se puede apreciar la función característica para conversión de voltaje a fuerza de la celda de carga FC23, es:

$$F = \frac{V}{0.11_0}$$

Dónde:

V = Valor de voltaje

F = Fuerza

x = Pendiente obtenida de los datos de calibración.

Dada la amplificación, el nuevo rango de voltajes a la salida del amplificador de instrumentación vendría dado por la ecuación. . (ver imagen 3-4)

$$F = \frac{V}{0,00_s}$$

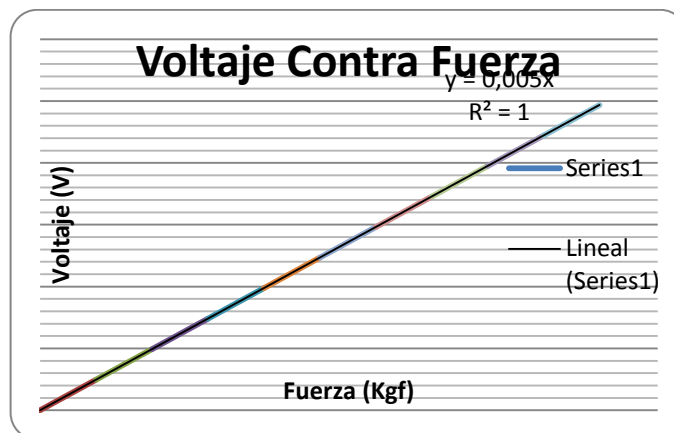


Imagen 3. Curva característica de amplificador de voltaje

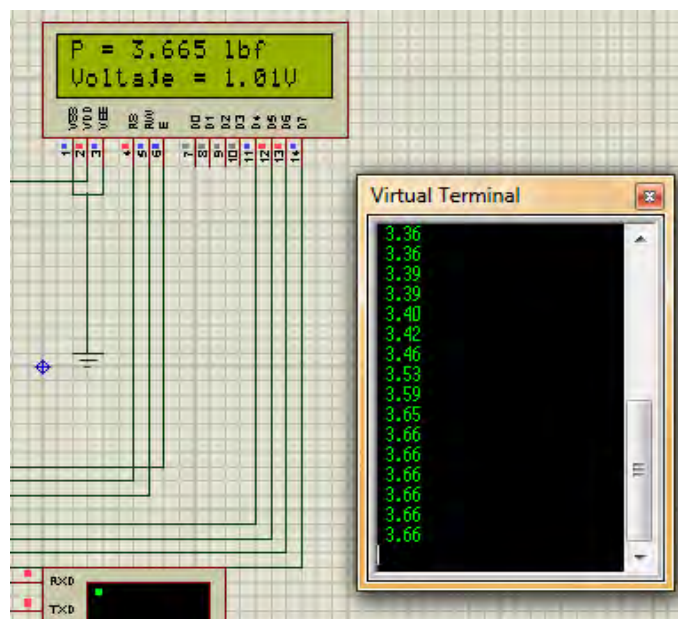


Imagen 4. Visualización de los datos en modulo LCD

Los datos que se obtienen en el módulo LCD son el valor de la fuerza censada en un rango de 0 a 4.9 voltios, valor que se convierte a número y se somete a la función de calibración del sensor que se presenta a continuación:

La calibración fue realizada en una máquina de compresión que posee la celda de carga con rango de 11000 lbf. . (ver tabla 1) . (ver imagen 5)

Después de la calibración del sensor los valores que se obtuvieron, fueron:

V (v)	F (lbf)
0.03	14
0.35	143
0.70	285
1.09	449
1.53	625
1.98	811
2.45	999
2.98	1212
3.49	1415

Tabla 1. Datos para la calibración por software

La ecuación obtenida queda por tanto:

$$F = \frac{V}{0.002465}$$

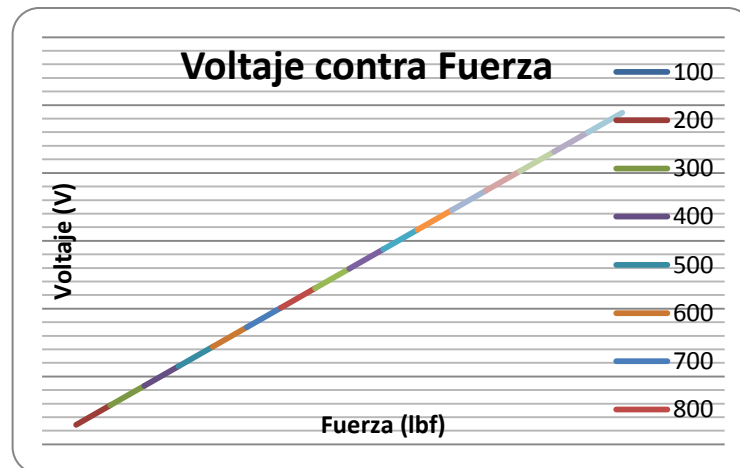


Imagen 5. Curva de calibración celda de carga laboratorio de suelos

Se muestran una curva de calibración de la prensa Marshall comparada con la curva característica del sensor, donde se puede apreciar que sigue la misma tendencia y hay poca variabilidad. (ver imagen 6)

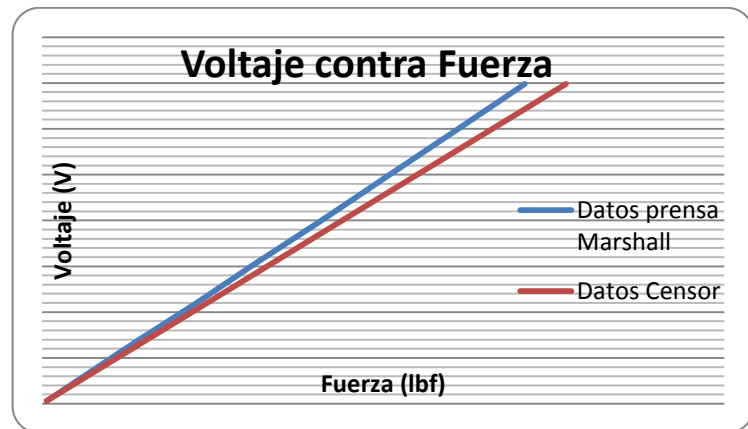


Imagen 6. Curva de comparación prensa Marshall datos sensor de carga

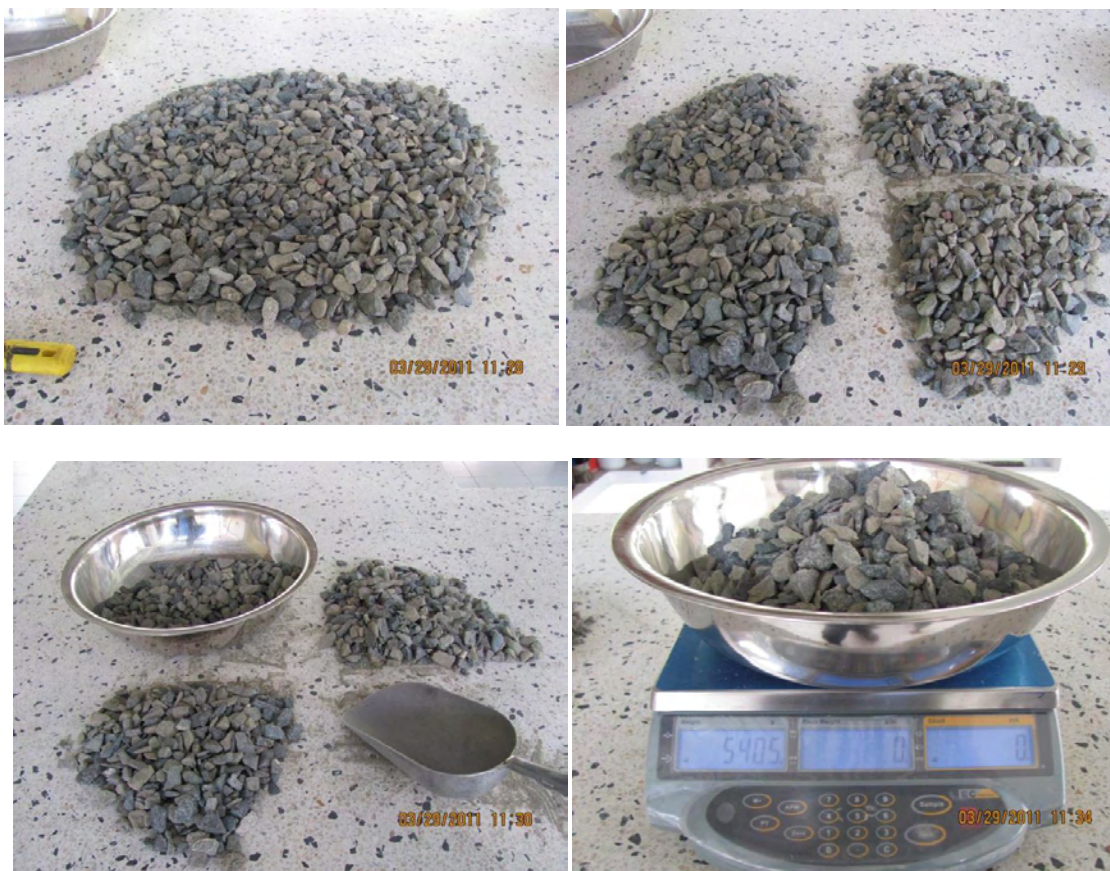
2. CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS

2.1 SELECCIÓN DEL MATERIAL

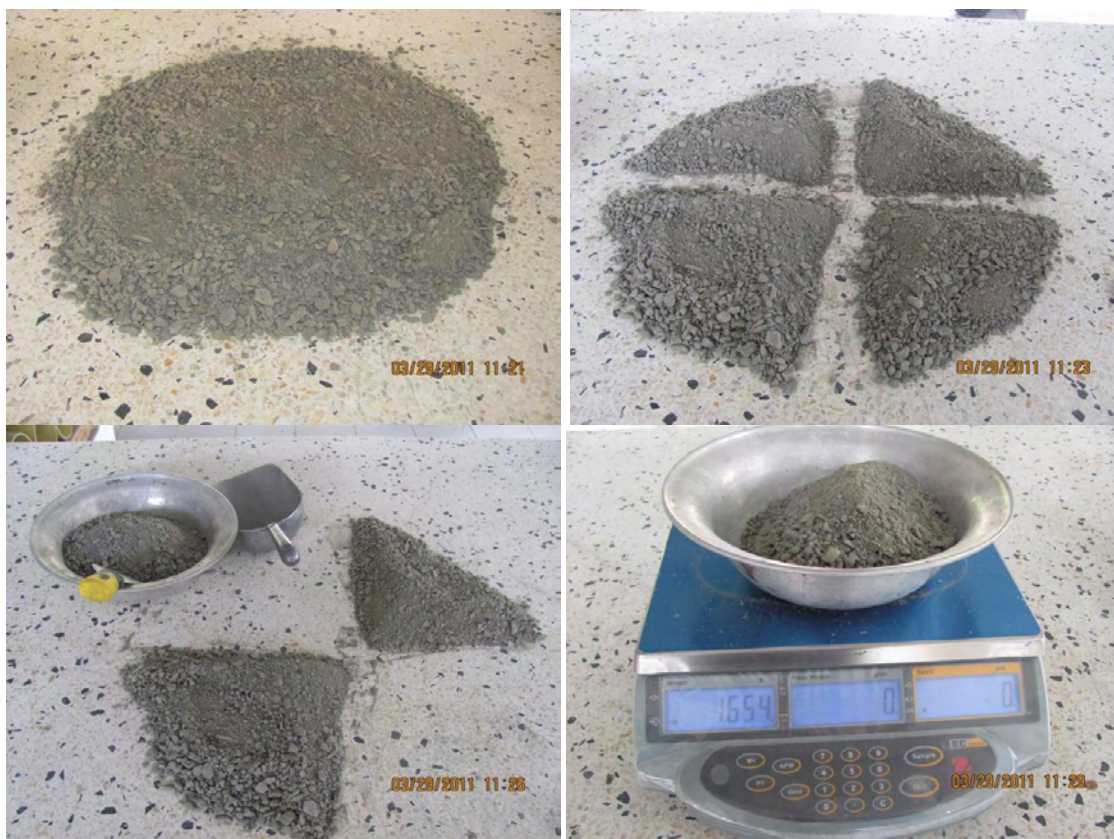
El agregado procede de la cantera rio Téllez, ubicada en el municipio de Funes Departamento de Nariño.

2.2 ENSAYOS DE LABORATORIO FÍSICO MECÁNICOS A LOS MATERIALES

Para la realización de los ensayos se toma una muestra representativa del material a caracterizar, mezclándolo para homogeneizarlo y así poder separar la cantidad necesaria a través del método del cuarteo (fotografía 1 y 2).



Fotografía 1. Cuarteo material en laboratorio agregado grueso



Fotografía 2. Cuarteo material en laboratorio agregado fino

2.2.1 Ensayo de composición

- Granulometría. (INV E-213- 07).

Tiene como objetivo la separación física de partículas que componen la muestra heterogénea de agregado árido.

La granulometría consiste en tomar una muestra representativa del material que se va a utilizar en la fabricación del concreto asfáltico, la cual debe estar seca para evitar la formación de conglomerados, por lo cual se lleva al horno a una temperatura entre 110 °C y 115 °C hasta masa contraste para el completo secado, se pesa el material seco y posteriormente se hace pasar por una serie de tamices normalizados (*cedazos*), que están ordenados de mayor a menor abertura de poros, con una relación de aberturas de 1 a 2 con respecto al siguiente tamiz. (ver fotografía 3)



Fotografía 3. Abertura tamices

Se ubica el material en la pila de tamices y se agita continua y fuertemente durante algunos minutos hasta que el material fino logre atravesar cada tamiz hasta el fondo y se retenga el agregado grueso según su tamaño en cada tamiz. Al finalizar se pesa el material retenido en cada tamiz y se toma nota en el respectivo formato, esto se realiza tanto para la grava como para la arena. *(Ver los formatos en el anexo B).*

La fotografía 4, ilustra la cantidad de tamices a utilizar para la caracterización del agregado árido tanto fino como grueso, proveniente de la cantera rio Téllez, vereda San José, Municipio de Funes departamento de Nariño, para lo cual se utiliza los tamices de abertura 1", 3/4", 1/2", 3/8", 1/4", N°4, N°10", N°40, N°80, N°200, Fondo, de mayor a menor abertura en el orden especificado, según el artículo 400-07 de las especificaciones de la norma del Instituto Nacional de Vías.



Fotografía 4. Serie de tamices



Fotografía 5. Tamizado manual y material retenido en cada tamiz

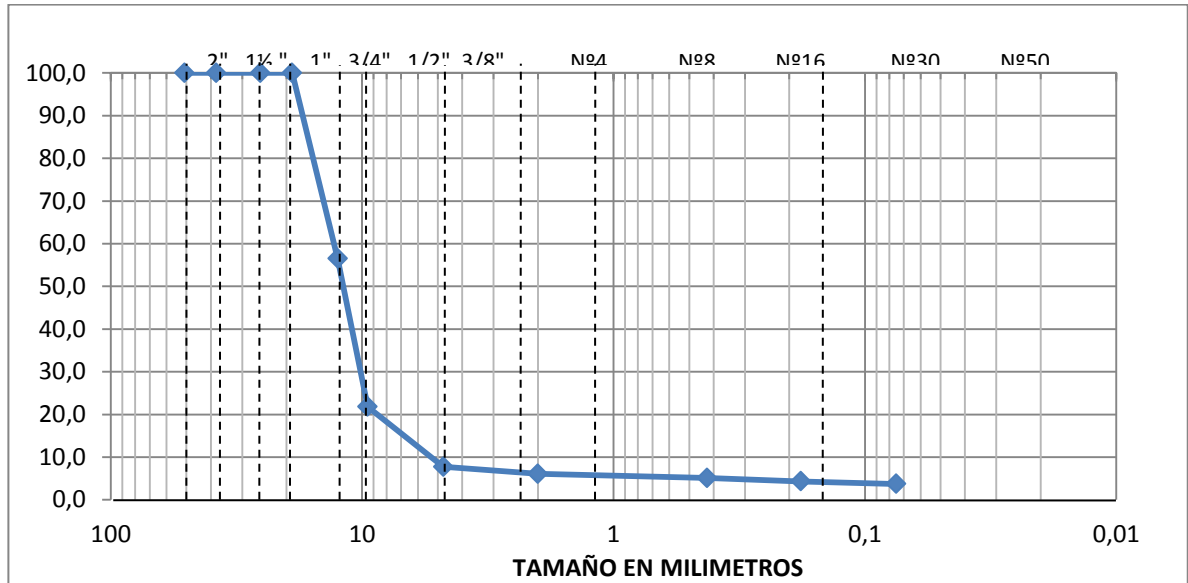
a. Granulometría material grueso:

GRADACIÓN					
Peso inicial	36452		Peso lavado	35527	
Tamiz	Tamiz mm	P. Retenido	% Retenido	% R. Acum	% Pasa
1	25,4	0,00	0,00	0,00	100,00
¾	19,05	0,00	0,00	0,00	100,00
½	12,7	15860,00	43,51	43,51	56,49
3/8	9,525	12647,00	34,69	78,20	21,80
¼	6,3	5128,00	14,07	92,27	7,73
4	4,75	608,00	1,67	93,94	6,06
10	2	344,00	0,94	94,88	5,12
40	0,425	296,00	0,81	95,70	4,30
80	0,18	211,00	0,58	96,27	3,73
200	0,075	394,00	1,08	97,36	2,64
P-200		964,0	2,64	100,00	0,00

Tabla 2. Gradación material grueso realizado en laboratorio a la muestra proveniente de la cantera del rio Téllez

Para la muestra de agregado grueso proveniente de la cantera Rio Téllez, ensayada en laboratorio, se observa un tamaño máximo de partículas de media pulgada ($1/2''$), reteniendo de ahí en adelante porcentajes aceptables en cada tamiz, lo cual se traduce en una gradación continua, siendo esto algo favorable a los fines de elaboración de mezclas asfálticas (Tabla 2)

2.). Las curvas granulométricas son una representación gráfica de la distribución de los tamices del material; las gráficas están compuestas por el porcentaje que pasa en cada tamiz en las ordenadas (*escala aritmética*) y el tamaño del tamiz en las abscisas (*en escala logarítmica*). Con esta gráfica se puede saber sobre la gradación de los tamaños del material (*figura 7 y 8*).



Para la muestra de agregado fino ensayada en laboratorio se observa un tamaño máximo de partículas de tres octavos de pulgada ($3/8"$), reteniendo de ahí en adelante porcentajes aceptables en cada tamiz, lo cual se traduce en una gradación continua, siendo esto algo favorable a los fines de elaboración de mezclas asfálticas (*Tabla 3*).

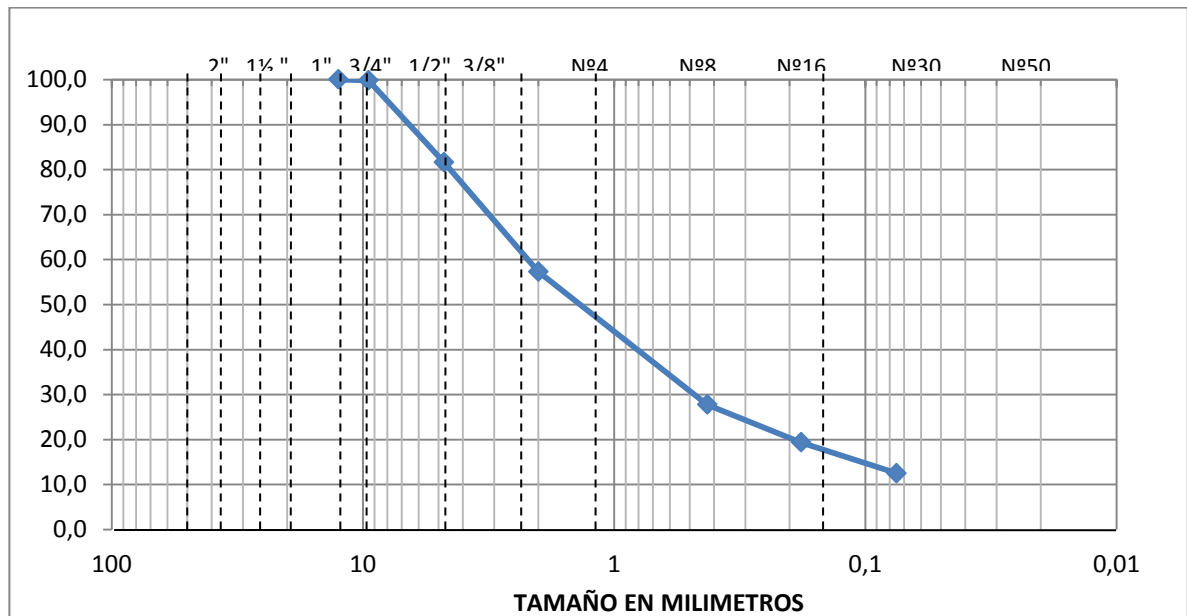


Imagen 8. Tamaño del tamiz Vs Porcentaje retenido en cada tamiz material fino

c. Ajuste granulométrico (método gráfico):

Por lo general, los agregados de la la region nariñense se catalogan dentro de los agregados “conocidos pero no controlados” que son aquellos que provienen de una zona de explotacion de la que habitualmente se extraen agregados, cuya inocuidad ya fue analizada en algunas ocaciones y probada en algunas otras, pero que la preparación y control a que son sometidos no permiten garantizar que su limpieza y granulometria sean las adecuadas y se mantengan en el tiempo, por lo cual la muestra proveniente de la cantera rio Téllez, vereda San José, Municipio de Funes departamento de Nariño, después del correspondiente tamizado y trazado de su curva granulométrica, tanto para el agregado fino como grueso, requiere un ajuste, ya que al combinarlos la curva resultante se sale del rango establecido, haciendo necesario un ajuste granulométrico el cual se realiza por el método gráfico, ampliamente conocido y que consiste en buscar la combinación de los agregados disponibles que produzca la máxima densidad y por consiguiente mayor resistencia.

Este método fue propuesto por Fuller y Thompson en el año 1907, donde el contenido de vacíos es mínimo y consiste en combinar los agregados de tal forma,

que la granulometría del conjunto se adapte lo más cercanamente posible a la “curva ideal” generada a partir de la tabla de “gradaciones ideales Fuller y Thompson de agregados para concreto en porcentaje que pasa” (tabla 4), con el objeto de obtener una granulometría tal que la manejabilidad de la mezcla sea la adecuada según su finalidad, teniendo en cuenta que una carencia de agregados finos se traduce en mezclas ásperas, segregables y difíciles de trabajar, en tanto que un exceso de finos exigirá un alto contenido de ligante, dando problemas de retracción, y, obviamente, a mezclas más costosas e incluso de resistencias menores.

TAMIZ		TAMAÑO MAXIMO mm (pulg)						
mm	pulg	76,1	50,8	38,1	25,4	19	12,7	9,51
		(3")	(2")	(1 1/2")	(1")	(3/4")	(1/2")	(3/8")
76,1	3"	100						
50,8	2"	81,6	100					
38,1	1 1/2"	70,7	86,6	100				
25,4	1"	57,8	70,7	81,6	100			
19,0	3/4"	50	61,2	70,7	86,6	100		
12,7	1/2"	40,9	50	57,8	70,7	81,6	100	
9,51	3/8"	35,4	43,3	50	61,2	70,7	87,2	100
4,76	N°4	25	30,6	35	43,3	50	61,2	70,8
2,38	N°8	17,7	21,6	25,4	30,6	35,4	43,3	50
1,19	N°16	12,5	15,3	17,7	21,6	25	30,6	35,4
0,595	N°30	8,8	10,8	12,5	15,3	17,7	21,6	25
0,297	N°50	6,2	7,7	8,8	10,8	12,5	15,3	17,8
0,149	N°100	4,4	5,4	6,2	7,7	8,8	10,8	12,6

Tabla 4. Gradaciones ideales Fuller - Thompson de agregados para concreto en porcentaje que pasa

El método provee las cantidades de cada tamaño de partículas de agregados grueso y fino, refiriendo a una curva de gradación recomendada. Este proceso se detalla a continuación:

- Se dibuja una cuadrícula de 10 X 10.
- A lo largo de las ordenadas y en orden ascendente se numeran porcentajes iguales de 0 a 100.
- En la abscisa superior se enumeran porcentajes iguales de 100 a 0 y de derecha a izquierda. Allí se lea el porcentaje de agregados fino referido al agregado total.
- En las ordenadas del lado izquierdo se marcan los porcentajes que pasan correspondientes al agregado fino, anotando el número o abertura del tamiz correspondiente.
- En las ordenadas del lado derecho se repite lo mismo con el agregado grueso.

- f) En el eje inferior de las abscisas se leera entonces, el porcentaje de agregado grueso referido al agregado total.
- g) Los puntos correspondientes a tamices de igual número de abertura en las dos granulometrias se unen entre si por una linea recta. Estas lineas representan los porcentajes posibles de la mezcla de agregados que pueden pasar por cada uno de los tamices. El cuadro asi elaborado permite calcular graficamente las granulometrias para cualquier mezcla de un agregado fino y un agregado grueso.

Para ello basta con encontrar sobre el eje de las abscisas, una linea paralela a las ordenadas correspondientes a la mezcla deseada y la interseccion de esta linea con las lineas inclinadas indica el porcentaje que pasa por el respectivo tamiz.

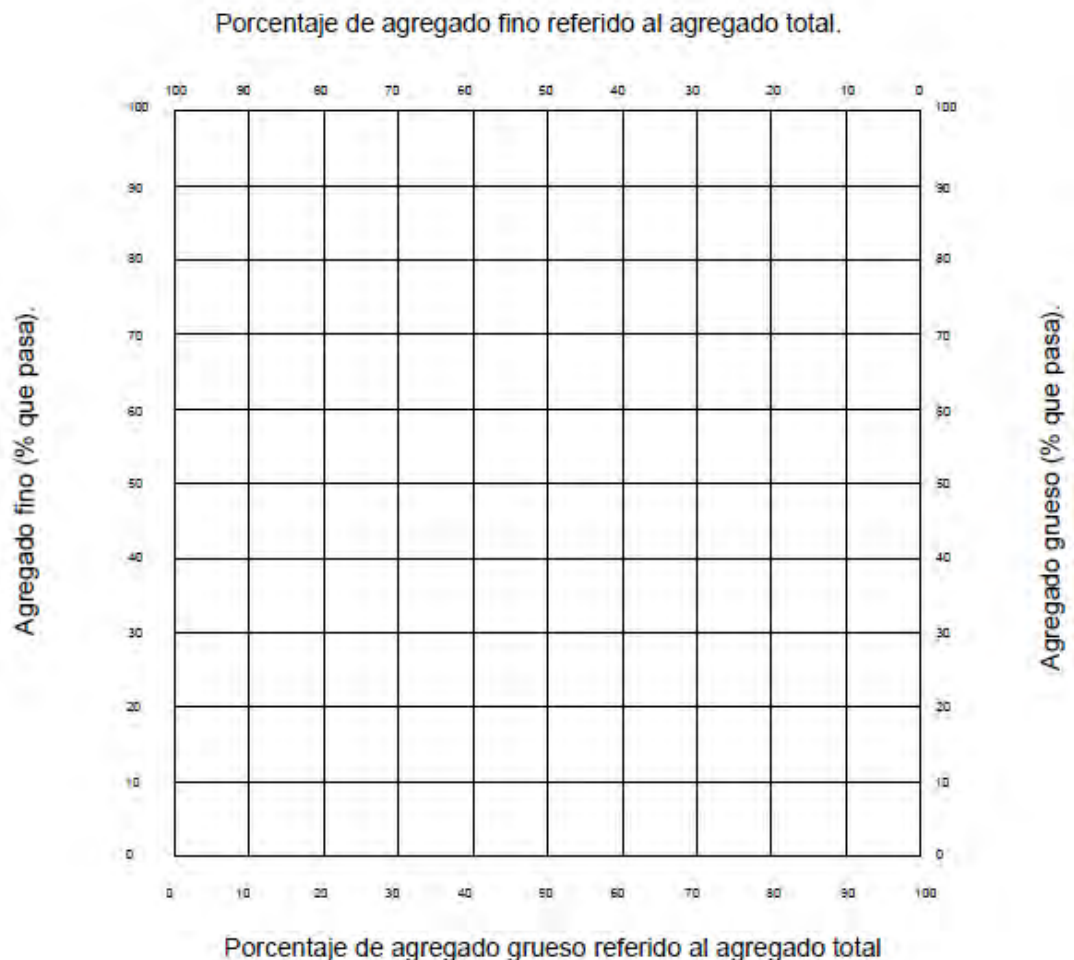


Imagen 9. Tabla ajuste granulométrico (método gráfico)

- h) Sobre las líneas trazadas, para el tamaño máximo correspondiente, se marcan los límites porcentuales (máximo y mínimo) que pasa por cada tamiz (tabla 4).
- i) Las franjas aisladas, definidas por los límites marcados anteriormente, deben comprender la línea vertical paralela a las ordenadas que indique “el porcentaje de agregado referido al agregado total”.
- j) Hechos los pasos anteriores, los “porcentajes que pasan” de la granulometría resultante, pueden leerse directamente en las ordenadas. Para ello debe recordarse que la intersección de la línea vertical paralela a las ordenadas con las líneas inclinadas indica el porcentaje que pasa por el respectivo tamiz.

Para la muestra tomada de la cantera del Rio Téllez; vereda san José Municipio de Funes en el departamento de Nariño, el desarrollo del anterior proceso resulta así:

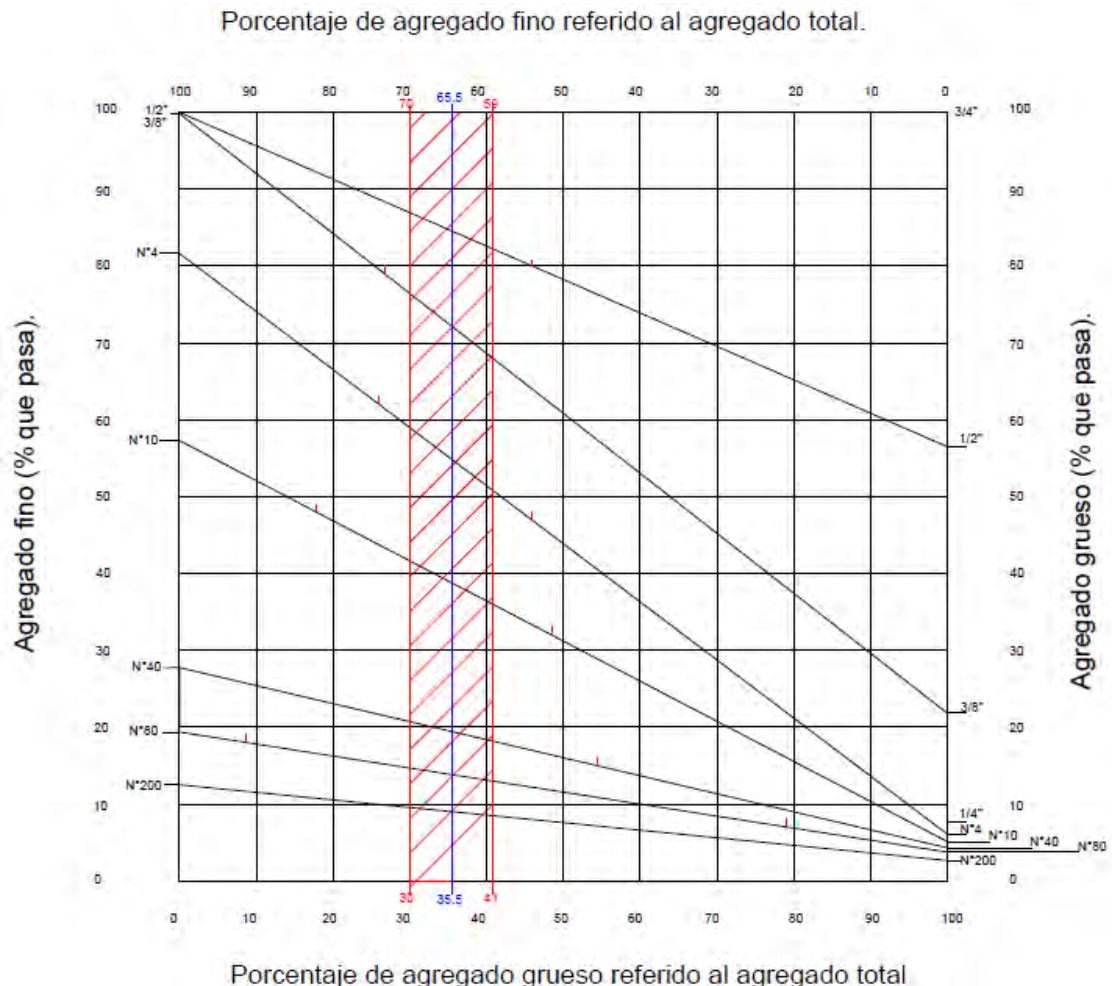


Imagen 10. Ajuste granulométrico método gráfico.

FRACCIÓN : AGREGADO GRUESO				FRACCIÓN : AGREGADO FINO				FRACCIÓN : LLENANTE MINERAL			
TAMIZ	PESO RETENIDO	%RETENIDO	% PASA	TAMIZ	PESO RETENIDO	% RETENIDO	% PASA	TAMIZ	PESO RETENIDO	% RETENIDO	% PASA
3/4	0,0	0,0	100,0	3/4	0,0	0,0	100,0	3/4	0,0	0,0	100,0
1/2	15860,0	43,5	56,5	1/2	0,0	0,0	100,0	1/2	0,0	0,0	100,0
3/8	12647,0	34,7	21,8	3/8	5,0	0,2	99,8	3/8	0,0	0,0	100,0
No.4	5736,0	15,7	6,1	No.4	546,5	18,2	81,6	No.4	0,0	0,0	100,0
No.10	344,0	0,9	5,1	No.10	729,7	24,3	57,3	No.10	0,0	0,0	100,0
No.40	296,0	0,8	4,3	No.40	886,7	29,6	27,7	No.40	72,8	72,8	27,2
No.80	211,0	0,6	3,7	No.80	251,7	8,4	19,3	No.80	6,9	6,9	20,3
No.200	394,0	1,1	2,6	No.200	205,3	6,8	12,5	No.200	9,8	9,8	10,5
PASA 200	964,0	2,6		PASA 200	375,1	12,5		PASA 200	10,5	10,5	
	36452,0				3000,0				100,00		

TAMIZ	% AGREGADO GRUESO	% AGREGADO FINO	% LLENANTE	ABERTURA DE TAMICES (mm)	FORMULA DE TRABAJO	ESPECIFICACIÓN INVIAS 2007	
	35%	49%	16%				
3/4	35,0	49,0	16,0	19,1	100,0	100	100,0
1/2	19,8	49,0	16,0	12,7	84,8	80	100,0
3/8	7,6	48,9	16,0	9,5	72,5	70	88,0
No.4	2,1	40,0	16,0	4,8	58,1	49	65,0
No.10	1,8	28,1	16,0	2,0	45,9	29	45,0
No.40	1,5	13,6	4,4	0,40	19,5	14	25,0
No.80	1,3	9,5	3,3	0,18	14,0	8	17,0
No.200	0,9	6,1	1,7	0,075	8,7	4	8,0

Tabla 5. Ajuste granulométrico para mezclas asfálticas

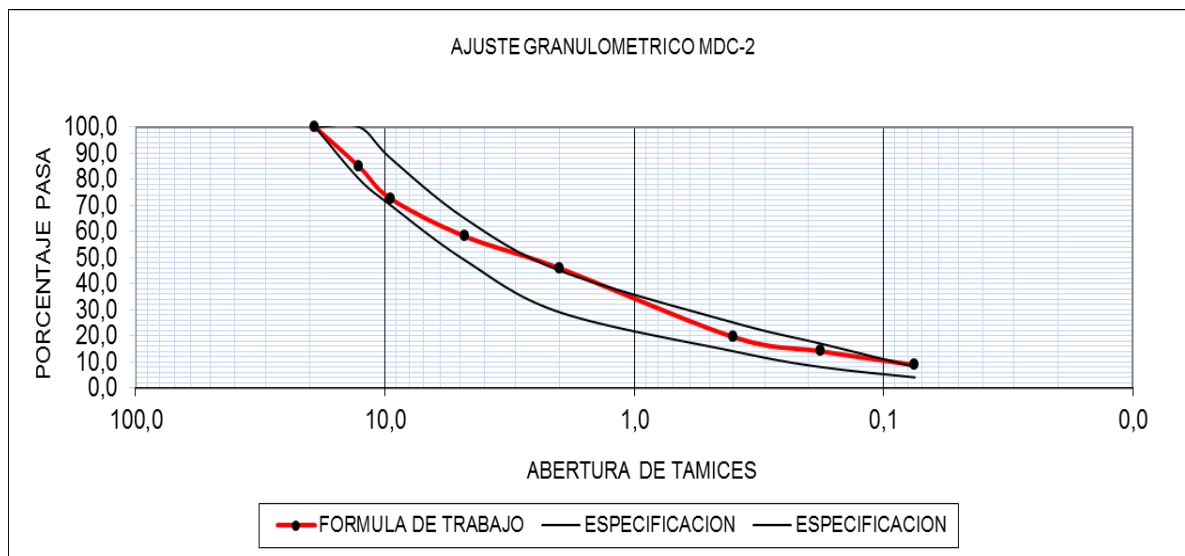


Imagen 11. Curva ajuste granulométrico

2.2.2 Ensayo de dureza

- Desgaste máquina de los Ángeles (INV E-218 y INV E-219).

Su objetivo es determinar la resistencia de las partículas del agregado grueso al desgaste. Este ensayo es un indicador de la calidad relativa del agregado o de la competencia de diferentes fuentes de agregados pétreos de similares composiciones, los resultados brindan comparaciones entre fuentes de origen, composición o estructura (*fotografía 6 y 7*).



Fotografía 6. Proceso de abrasión y residuos resultantes, Máquina de los ángeles

Para caracterizar el material proveniente de la cantera del río Téllez, se tomó una muestra de 5000 gr (*según lo describe la norma INV E-218 en la tabla 2, para*

granulometrías con agregados no mayores a ½”), desarrollando el ensayo se obtuvo los siguientes resultados:

ENSAYO No	1
Gradación utilizada	B
No de revoluciones	500
Peso de la muestra inicial (gr)	Pi 5000
Peso de la muestra después (gr)	Pf 3995
% Desgaste $= \{(Pi - Pf) / Pi\} * 100$	20,10
Coeficiente de uniformidad	1,55

Tabla 6. Resultados desgaste en la máquina de los ángeles

Como lo describe la tabla 6, se midió un porcentaje de desgaste de 20.1% el cual está dentro de los rangos permisibles en la norma del instituto nacional de vías, que da como tope máximo de abrasión por desgaste después del proceso en la máquina de los ángeles un 25%, descritos en el artículo 400-07 de las especificaciones de la norma, en la tabla 400.1 (c), (*Requisitos de los agregados pétreos para tratamientos, lechadas y mezclas bituminosas para un nivel de transito 3*).

- **Micro Deval (INV E-238-07)**

Su objetivo es determinar la resistencia a la abrasión y durabilidad de los agregados pétreos, por la acción combinada de la molienda y la abrasión con bolas de acero en presencia de agua ya que muchos de los agregados son más débiles húmedos que secos, gracias a esto se debe utilizar esta información útil para juzgar la resistencia desgaste/abrasión y durabilidad/solidez y acción de desintegración con el medio ambiente cuando no existe información de este tipo de comportamiento (*fotografía 7*).



Fotografía 7. Muestra para la determinación de la resistencia al desgaste por abrasión Micro Deval.

El material que se analizó en laboratorio de la cantera del río Téllez (Fotografía 7) aplica a una gradación correspondiente a la tabla 7 (tabla 1 inscrita en la INV-E 238-07), la cual asume masas específicas del material retenido en cada tamiz, esto como preparación de la muestra para la elaboración del ensayo Micro Deval.

Gradación Tabla 1		
Pasante Tamiz	Retenido Tamiz	Masa gr
3/4"	5/8"	375,1
5/8"	1/2"	375.4
1/2"	3/8"	750.1
		Σ 1501.6

Tabla 7. Gradación para ensayo Micro Deval



Fotografía 8. Ensayo Micro Deval

En la fotografía 8 se observa el procedimiento del ensayo micro deval realizado a la muestra de agregado grueso proveniente de la cantera rio Téllez, ilustrando el proceso de abrasión al que fue sometido en la máquina del mismo nombre del ensayo y el posterior retiro de las masas metálicas con las cuales se simula el efecto abrasivo en presencia de agua para posteriormente proceder al peso del material después del lavado, obteniendo los resultados inscritos en la tabla 8.

ENSAYO		1
Gradación utilizada		TABLA 1
No de revoluciones		12000 $\pm$ 100
Peso de la muestra inicial (gr)	Pi	1500,6
Peso de la muestra después (gr)	Pf	1344,6
% Desgaste = $\{(Pi - Pf) / Pi\} * 100$		10,40

Tabla 8. Resultados ensayo Micro Deval

Los resultados inscritos en la tabla 8, medidos después de la elaboración del ensayo, da como porcentaje de desgaste 10.4%, lo que indica que el material es apto para la elaboración de mezclas asfálticas, ya que está dentro del porcentaje máximo de desgaste permitido por la norma del instituto nacional de vías que es del 20%, descrito en el artículo 400-07 de las especificaciones de la norma, en la tabla 400.1 (c), (*Requisitos de los agregados pétreos para tratamientos, lechadas y mezclas bituminosas para un nivel de transito 3*).

2.2.3 Ensayo de durabilidad

- Perdidas en el ensayo de solidez en sulfato de sodio o magnesio (INV E- 220-07):

Determinar la resistencia a la desintegración de los agregados, por la acción de soluciones saturadas de sulfato de sodio o magnesio, seguido por un secado al horno para deshidratar completa o parcialmente la sal que se encuentra en los poros permeables del material, gracias a esto se puede obtener información para determinar la calidad de los agregados en condiciones atmosféricas fuertes.

La sanidad se refiere a la capacidad de los agregados para soportar cambios de volumen por la acción del intemperismo, esta capacidad depende de la forma, textura, procedencia, granulometría y porosidad del agregado.

Este ensayo pretende reproducir rápidamente los procesos de calentamiento, enfriamiento, humedecimiento, secado, congelamiento y deshielo.

El objeto de utilizar sulfato en este ensayo es para que se llene en los poros y en el momento de evaporarse cristaliza las sales por el secado, creando presiones internas que se asemejan a la acción del congelamiento del agua (*fotografía 9*).



Fotografía 9. Ensayo solidez y resistencia al sulfato de sodio y magnesio

En la fotografía 9, se describe el ensayo de solidez y resistencia al sulfato de sodio y magnesio, a la cual fueron sometidas las muestras de agregado árido provenientes de la cantera del río Téllez, ilustrando las muestras de grava retenida de cada tamiz, tal cual lo describe la norma INV-E220-07, para posterior sumergimiento en sulfatos de sodio y magnesio en intervalos de tiempo predeterminado, en medio de los cuales se seca las muestras al horno hasta temperatura constante.

- a. Solidez en sulfato de sodio agregado fino cantera rio Téllez, vereda San José, Municipio de Funes:

ANÁLISIS CUANTITATIVO						
Fracciones		Peso inicial P1 (gr)	Peso final P2 (gr)	% Perdida $\{(P1-P2)/P1\} \cdot 100$	Granulometría Original	% Perdida Corregida
Pas a	Retenido					
3/8"	No 4	100	83,7	16,3	18,22	3,4
No 4	No 8	100	92,1	7,9	24,32	2,2
No 8	No 16	100	92	8	29,56	2,7
No 16	No 30	100	90,3	9,7	8,39	0,9
No 30	No 50	100	95,5	4,5	6,84	0,4
PERDIDA TOTAL CORREGIDA						9,6

Tabla 9. Resultados ensayo solidez en sulfato de sodio agregado fino

- b. Solidez en sulfato de magnesio agregado fino cantera rio Téllez, vereda San José, Municipio de Funes:

ANÁLISIS CUANTITATIVO						
Fracciones		Peso inicial P1 (gr)	Peso final P2 (gr)	% Perdida $\{(P1-P2)/P1\} \cdot 100$	Granulometría Original	% Perdida Corregida
Pas a	Retenido					
3/8"	No 4	100	94	6	18,22	1,3
No 4	No 8	100	98,1	1,9	24,32	0,5
No 8	No 16	100	97	3	29,56	1
No 16	No 30	100	91,4	8,6	8,39	0,8
No 30	No 50	100	93,8	6,2	6,84	0,5
PERDIDA TOTAL CORREGIDA						4,1

Tabla 10. Resultados ensayo solidez en sulfato de magnesio agregado fino

- c. Solidez en sulfato de sodio agregado grueso cantera rio Téllez, vereda San José, Municipio de Funes:

ANÁLISIS CUANTITATIVO						
Fracciones		Peso inicial P1 (gr)	Peso final P2 (gr)	% Perdida $\{(P1-P2)/P1\} \cdot 100$	Granulometría Original	% Perdida Corregida
Pas a	Retenido					
3/4"	1/2"	670	632,1	5,7	43,51	2,46
1/2"	3/8"	330	286,7	13,1	34,69	4,55
3/8"	No 4	300	274,4	8,5	15,74	1,34
PERDIDA TOTAL CORREGIDA						8,36

Tabla 11. Resultados ensayo solidez en sulfato de sodio agregado grueso

- d. Solidez en sulfato de magnesio agregado grueso cantera rio Téllez, vereda San José, Municipio de Funes:

ANÁLISIS CUANTITATIVO						
Fracciones		Peso inicial P1 (gr)	Peso final P2 (gr)	% Perdida $\{(P1-P2)/P1\} \cdot 100$	Granulometría Original	% Perdida Corregida
Pas a	Retenido					
3/4"	1/2"	672,5	656,1	2,4	43,51	1,06
1/2"	3/8"	330	301,5	8,6	34,69	3
3/8"	No 4	300	291,6	2,8	15,74	0,44
PERDIDA TOTAL CORREGIDA						4,5

Tabla 12. Resultados ensayo solidez en sulfato de magnesio agregado grueso

Los resultados que se obtuvieron después del ensayo de solidez en sulfatos de sodio y magnesio para la muestra de agregados áridos provenientes de la cantera rio Téllez, inscritos en las tablas 9 a 12, da una noción del comportamiento de los agregados ante las simulaciones de los más duros agentes atmosféricos, otorgando una idea de la resistencia a la desintegración de los agregados por acción de sales saturadas dentro de sus poros permeables.

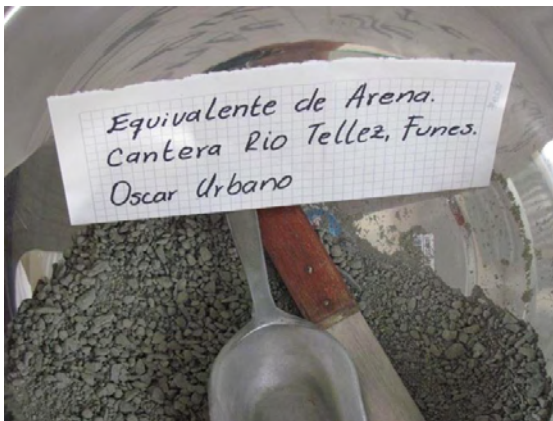
2.2.4 Ensayos de limpieza

- Índice de plasticidad (INV E-125 y E-126-07).

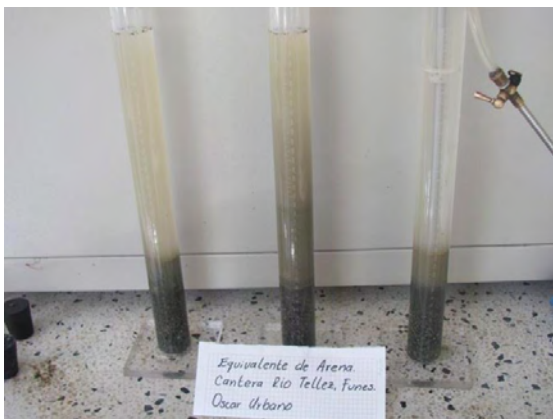
No se realiza este ensayo para esta clase de materiales, ya que el índice de plasticidad se realiza a suelos finos y cohesivos.

- Equivalente de arena (INV E- 133- 07).

Este ensayo produce un valor empírico de la cantidad relativa, finura y carácter del material arcilloso presente en la muestra de agregado fino y se realiza adicionando a un volumen determinado de suelo una pequeña cantidad de solución floculante, mezclándolos en un cilindro plástico graduado, y agitándolos para que las partículas de arena pierdan su cobertura arcillosa. La muestra es entonces irrigada, usando una cantidad adicional de solución, para forzar al material arcilloso a quedar en suspensión encima de la arena; después de un periodo de sedimentación se determinan las alturas de las arcillas floculadas y de la arena en el cilindro, dando como resultado el equivalente de arena, que es la relación entre la altura de la arena y la altura de la arcilla, expresada en porcentaje (*fotografía 10 y 11*).



Fotografía 10. Muestra de agregado y preparación de probetas para ensayo de equivalente de arena.



Fotografía 11. Alturas de las arcillas durante y después del ensayo de Equivalente de arena

ENSAYO No		1			2		
PROBETA	No	1	2	3	1	2	3
LECTURA ARCILLA	(mm)	136	144	135	129	145	133
LECTURA ARENA	(mm)	78	98	86	76	85	79
EQUIVALENTE DE ARENA	(%)	57	68,1	64	59	58,6	59
PROMEDIO	(%)	63			59		

Tabla 13. Resultados ensayo equivalente de arena en agregado fino

Los resultados obtenidos al final del ensayo de equivalente de arena son aceptables, pues la muestra de material ensayado proveniente de la cantera Rio Téllez, vereda San José, municipio de Funes, tiene un promedio de equivalente de arena del 61% (Tabla 14,) superando los valores mínimos establecidos en 50% en la tabla 400.1 (c), requisitos de los agregados pétreos para, tratamientos, lechadas mezclas bituminosas para el nivel de tránsito NT3, de las especificaciones de la norma, en el art 400-07.(**disposiciones generales para la ejecución de riegos de imprimación, liga y curado, tratamientos superficiales, sellos de arena asfalto, lechadas asfálticas, mezclas asfálticas en frío y en caliente y reciclado de pavimentos asfálticos**)

- Valor de azul de metileno (INV E- 235- 07).

Este ensayo se emplea para estimar la cantidad de arcillas dañinas y materia orgánica presente en un agregado. Un valor significativo indica una gran cantidad de arcilla o de materia orgánica presentes en la muestra.

Este método no es necesario, ya que la norma indica que si la prueba de contenido de arena no satisface los requisitos de los agregados pétreos para tratamientos, lechadas y mezclas bituminosas nivel de tránsito NT3 de la tabla 400.1(c) de estas especificaciones, pero es igual o superior a 40%, se deberá determinar el valor de azul de metileno y este resultado deberá ser menor o igual a diez (10)

- Determinación de la limpieza superficial de las partículas de agregado grueso (INV E-237-07).

Este ensayo se realiza para determinar la limpieza superficial de los agregados, con tamaños superiores a 4.75 mm (nº 4) utilizados en la construcción de vías.

Se realiza separando mediante lavado en un tamiz (500 µm nº 35) las partículas de 0.5 mm adheridas en la superficie de los agregados gruesos, las cuales se las

considera como impurezas. Se lava hasta que el agua salga clara, se debe tener en cuenta que no haya perdidas de material por fuera del tamiz, la cantidad retenida en el tamiz de lavado se recupera y se seca al horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ \text{C}$ hasta la masa constante de 1gr, se vuelve a pasar por el tamiz durante 1 min, recuperando la totalidad del material retenido y se determina la masa pesándola nuevamente. (Fotografía 12).



Fotografía 12. . Ensayo contenido de impurezas

Cantidad de la muestra para el ensayo (M):

$$\begin{aligned} 200 * D &< M < 500 * D \\ 200 * 19 \text{ mm} &< M < 500 * 19\text{mm} \\ 3800 \text{ gr} &< M < 9500 \text{ gr} \\ \text{Toma de muestra para ensayo } M &= 4000 \text{ gr} \end{aligned}$$

Muestra para humedad (W):

$$\begin{aligned} M_h &= 2094.0 \text{ gr} \\ M_s &= 2066.2 \text{ gr} \end{aligned}$$

Muestra para ensayo:

$$M_{he} = 1906,0 \text{ gr}$$

$$M_s = 1793,5 \text{ gr}$$

CACULOS:

Humedad de la muestra (W):

$$W = \frac{M_h - M_s}{M_s} = \frac{2094,0 - 2060,2}{2066,2} = 0.013$$

Cantidad de masa seca (Mse):

$$M_{se} = \frac{M_{he}}{1 + W} = \frac{1906,0}{1 + 0,013} = 1880.5 \text{ gr}$$

Impurezas:

$$\text{Impurezas} = M_{se} - M_s$$

$$\text{Impurezas} = 1880,5 \text{ gr} - 1793,5 \text{ gr} = 87,013 \text{ gr}$$

Coeficiente de limpieza superficial:

$$\frac{M_{se} - M_s}{M_{se}} * 100 = \frac{1880,5 - 1793,5}{1880,5} * 100 = 4,62\%$$

La muestra estudiada proveniente de la cantera **Rio Téllez, vereda San José, municipio de Funes** posee un coeficiente de limpieza superficial equivalente al 4.62%, el cual no cumple las especificaciones mínimas del (0,5%), inscritas en **la tabla 400.1 (c), Requisitos de los agregados pétreos para, tratamientos, lechadas mezclas bituminosas para el nivel de transito NT3, de las especificaciones de la norma, en el art 400-07.***(disposiciones generales para la ejecución de riegos de imprimación, liga y curado, tratamientos superficiales, sellos de arena asfalto, lechadas asfálticas, mezclas asfálticas en frío y en caliente y reciclado de pavimentos asfálticos)*, para mezcla densa, semi-densa y gruesa en caliente, para agregado grueso, por lo cual fue necesario realizar un prelavado a las muestras provenientes de dicha cantera, después de lo cual el contenido de limpieza superficial es de 0.35%, y cumple con los requisitos mínimos inscritos en la tabla 400,1 (c).

Debido a lo anterior se recomienda realizar un último lavado al material explotado en la cantera **Rio Téllez, vereda San José, municipio de Funes departamento**

de Nariño, antes de ser distribuido para mezclas asfálticas en la región, mejorando así la adherencia entre partículas del agregado grueso y el ligante asfáltico usado.

2.2.5 Geometría de las partículas

- Partículas fracturadas mecánicamente (INV E-227-07).

Uno de los propósitos de este requisito es incrementar la resistencia al corte incrementando la fricción entre partículas en mezcla del agregado ligadas o no ligadas, otro propósito es dar estabilidad a los agregados y proporcionar mayor fricción y textura para agregados usados en capas superficiales de pavimento. (fotografía 13).



Fotografía 13. Ensayo partículas fracturadas mecánicamente.

TAMIZ		Peso de la Muestra (gr)	Peso material caras fract (gr)	% con caras fract (B/A *100)	% reten gradación original	Calculo final
PASA	RETENIDO					
		A	B	C	D	E
3/4"	1/2"	1200	1085	90,4	56,49	5107,7
1/2"	3/8"	300	253	84,3	21,8	1838,1
TOTAL		1500	1338	174,7	78,29	6945,8
PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS		$\frac{\text{TOTAL E}}{\text{TOTAL D}} = \frac{5107,7 + 1838,1}{6945,8} = 88,70\%$				

Tabla 14. Resultados ensayo caras fracturadas.

La muestra estudiada proveniente de la cantera **Rio Téllez, vereda San José, municipio de Funes** posee un porcentaje de partículas fracturadas mecánicamente equivalente al 88.7 %, (Tabla 14) el cual cumple las especificaciones mínimas (70%), inscritas en la **tabla 400.1 (c), Requisitos de los agregados pétreos para, tratamientos, lechadas mezclas bituminosas para el nivel de transito NT3, de las especificaciones de la norma, en el art 400-07.**(disposiciones generales para la ejecución de riegos de imprimación, liga y curado, tratamientos superficiales, sellos de arena asfalto, lechadas asfálticas, mezclas asfálticas en frío y en caliente y reciclado de pavimentos asfálticos), para mezcla densa, semidensa y gruesa en caliente, para agregado grueso, lo cual nos da una buena condición para mezclado, compactación y resistencia de la mezcla.

- Partículas planas y alargadas (INV E-240-07).

Este método determina el porcentaje de partículas planas y alargadas, en un agregado grueso, esto con el fin de no tener proporciones elevadas de esta clase de material ya que pueden interferir en la compactación y dificultar la colocación del material.

Se mide partículas individuales de agregado de una fracción de tamaño específico de tamiz para determinar las relaciones de ancho/espesor, longitud/ancho o longitud/espesor (fotografía 14).



Fotografía 14. Ensayo partículas planas y alargadas. Muestra y proceso de conteo y selección de partículas alargadas.



Fotografía 15. Ensayo partículas planas y alargadas. Selección partículas planas y resultados del ensayo.

a. Índice de alargamiento:

TAMAÑO DEL AGREGADO		PESO	PESO MATERIAL	PORCENTAJE	% RETENIDO	CÁLCULO FINAL
		MUESTRA	Partículas Alargadas	Partículas. Alargadas	Gradación Original	
PASA TAMI Z	RET. TAMI Z	A (g)	B (g)	$C = (B/A \times 100)$	D	$E = (C \times D)$
3/4"	1/2"	1285.2	516.3	40.2	43.51	1747.9
1/2"	3/8"	443	232.7	52.5	34.69	1822.5
3/8"	1/4"	94.1	60.0	63.8	14.07	897.0
TOTAL		1822.3	809.0	156.5	92.3	4467.3
ÍNDICE DE ALARGAMIENTO			TOTAL E / TOTAL D		48%	

Tabla 15. Resultados ensayo índice de alargamiento.

b. Índice de aplanamiento:

TAMAÑO DEL AGREGADO		PESO	PESO MATERIAL	PORCENTAJE	% RETENIDO	CÁLCULO FINAL
		MUESTR A	Partículas. Aplanadas	Partículas. Aplanadas	Gradación Original	
PASA TAMIZ	RET. TAMI Z	A (g)	B (g)	$C = (B/A \times 100)$	D	$E = (C \times D)$
3/4"	1/2"	1285.2	330.7	25.7	43.51	1119.6
1/2"	3/8"	443	128.3	29.0	34.69	1004.8
3/8"	1/4"	94.1	25.5	27.1	14.07	381.2
TOTAL		1822.3	484.5	81.8	92.3	2505.6
ÍNDICE DE APLANAMIENTO =			TOTAL E / TOTAL D		27%	

Tabla 16. Resultados ensayo aplanamiento

c. Índice de partículas planas y alargadas:

TAMAÑO DEL AGREGADO		PESO	CANTIDAD MATERIAL	PORCENTAJE
		MUESTRA	Partículas. Aplanadas y alargadas	Partículas. Aplanadas y alargadas
PASA TAMIZ	RET. TAMI Z	A (Und)	B (Und)	$C = (B/A \times 100)$
3/4"	1/2"	100.0	5.0	5.0
1/2"	3/8"	100.0	13.0	13.0
PORCENTAJE DE PARTICULAS PLANAS Y ALARGADAS (5:1)				9.0

Tabla 17. Resultados ensayo partículas planas y alargadas.

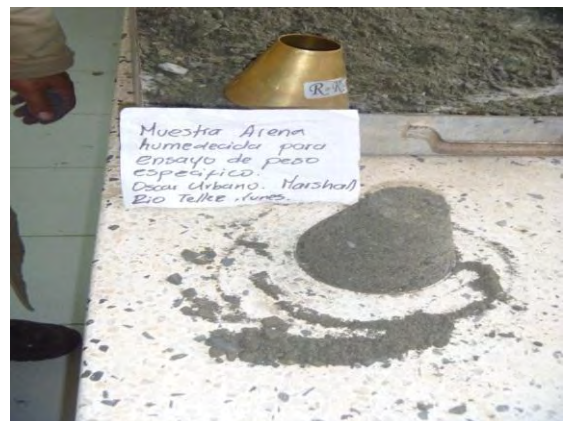
La muestra de agregado grueso proveniente de la cantera Rio Téllez, vereda San José, municipio de Funes después de realizarle el ensayo otorga un 9.0% de índice de partículas planas y alargadas, cumpliendo las especificaciones de la norma que se establecen como valor máximo de índice de partículas planas y alargadas en 10.0% según tabla 400.1 (c), Requisitos de los agregados pétreos para, tratamientos, lechadas mezclas bituminosas para el nivel de tránsito NT3, de las especificaciones de la norma, en el art 400-07. **(disposiciones generales para la ejecución de riegos de imprimación, liga y curado, tratamientos superficiales, sellos de arena asfalto, lechadas asfálticas, mezclas asfálticas en frío y en caliente y reciclado de pavimentos asfálticos)**, lo cual da un buen indicio para el acomodo de las partículas en la compactación de la mezcla y una mayor resistencia a la fractura del agregado grueso perteneciente a la mezcla.

2.2.6 Gravedad de las partículas

- Gravedad específica y absorción (INV E- 222-07 - INV E- 223-07).
- Con estos métodos se determina la relación entre la masa o peso en el aire de un volumen de sólido y la masa de un volumen igual de agua a una temperatura establecida. Partiendo de esta definición se puede calcular la gravedad específica bulk, bulk saturada y superficialmente seca y aparente, así como la absorción de agregado fino y grueso después de que los agregados han estado sumergidos en agua durante 15 horas (*fotografía 15*), para mejor comprensión se utilizan las siguientes definiciones:
- Gravedad específica bulk aparente: relación entre el peso en el aire del volumen impermeable del agregado a una determinada temperatura y el peso en el aire de un volumen igual de agua destilada, libre de gas.
- Gravedad específica bulk: es la relación entre el peso en el aire del volumen del agregado incluyendo los vacíos permeables e impermeables de sus partículas pero no los vacíos entre partículas a una determinada temperatura y el peso en el aire de un volumen igual de agua destilada libre de gas.
- Gravedad específica bulk en condición saturada y superficialmente seca(sss): Es la relación entre el peso en el aire en condición saturada y superficialmente seca incluyendo el peso del agua que ocupa los vacíos de las partículas luego de inmersión durante 15 horas, y el peso en el aire de un volumen igual de agua destilada libre de gas.
- Absorción: es la masa de agua que llena los poros permeables de las partículas de agregado sin incluir el agua adherida a la superficie de las mismas, expresada como porcentaje de la masa del agregado, después de secado a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$.



Fotografía 16. Muestra de agregado fino sumergida en agua para ensayo de gravedad específica.



Fotografía 17. Prueba del cono para determinar humedad del material a ensayar (Gravedad específica).



Fotografía 18. Extracción de aire al material fino más agua en ensayo de gravedad específica.



Fotografía 19. Muestras secas de agregado fino listas para pesaje después de ensayo de gravedad específica.

a. Gravedad específica y absorción de agregados gruesos:

ENSAYO No		1	2		3	Promedio
Temperatura de ensayo	°C	Temperatura ambiente.				
Peso de la muestra sss Wsss	gr	1096.4	1284.4	920.4	1351.6	
Peso de la muestra en el agua Wa	gr	708.9	820.7	590.7	873	
Peso de la muestra seca Ws	gr	1084.3	1271.8	908.4	1336.7	
Ws - Wa	gr	375.4	451.1	317.7	463.7	
Wsss - Wa	gr	387.5	453.7	329.7	478.6	
Densidad Nominal = Ws / Ws-Wa	gr/cm³	2.888	2.819	2.859	2.883	2.856
Densidad Aparente = Ws / Wsss - Wa	gr/cm³	2.798	2.743	2.755	2.793	2.772
Densidad Aparente SSS = Wsss / Wsss - Wa	gr/cm³	2.829	2.770	2.792	2.824	2.804
Absorción = (Wsss - Ws / Ws) * 100	%	1.116	0.991	1.387	1.115	1.152
Peso canastilla	gr	137	139.5	138.1	143	
peso canastilla + muestra sss	gr	1233.4	1423.9	1058.5	1494.6	
peso muestra sss	gr	1096.4	1284.4	920.4	1351.6	
peso canastilla + muestra en el agua	gr	757	868.8	638.8	921.1	
Peso canastilla en el agua	gr	48.1	48.1	48.1	48.1	
Peso muestra en el agua	gr	708.9	820.7	590.7	873	
Peso muestra seca + recipiente	gr	1221.3	1411.3	1046.5	1479.7	
Peso recipiente	gr	137	139.5	138.1	143	
Peso muestra seca	gr	1084.3	1271.8	908.4	1336.7	

Tabla 18. Resultados gravedad específica agregado grueso

b. Gravedad específica y absorción de agregados finos:

ENSAYO No		1	2	3	Promedio
Temperatura de ensayo	°C	22	23	21	
Peso de la muestra sss Wsss	Gr	250	250	250	
Peso matraz + agua Wma	Gr	649.8	646.5	653.2	
Peso matraz + agua + muestra Wmam	Gr	811.3	807.9	814.8	
Peso muestra seca Ws	Gr	248.7	248.2	249.2	
Densidad Nominal = Ws / Ws + Wma – Wmam	gr/cm ³	2.852	2.859	2.845	2.8521
Densidad Aparente = Ws / Wsss + Wma – Wmam	gr/cm ³	2.810	2.801	2.819	2.8102
Densidad Aparente SSS = Wsss / Wsss + Wma - Wmam	gr/cm ³	2.825	2.822	2.828	2.8249
Absorción = (Wsss - Ws / Ws) * 100	%	0.523	0.725	0.321	0.5230
Peso muestra seca + recipiente	Gr	392.8	391.8	393.9	
Peso recipiente	Gr	144.1	143.6	144.7	
Peso muestra seca	Gr	248.7	248.2	249.2	

Tabla 19. Resultados de ensayo de gravedad específica y absorción de agregados finos

Tabla resumen de ensayos a materiales pétreos provenientes de la cantera Rio Téllez, vereda San José, municipio de Funes:

ENSAYOS DE VERIFICACION SOBRE LOS AGREGADOS PARA MEZCLA EN CALIENTE.			
Nivel de tránsito NT3			
ENSAYO	NORMA DE ENSAYO INV	EXIGENCIA DE LA NORMA	VALOR MEDIDO EN LABORATORIO
Composición			
Granulometría	E-213	-	-
Dureza			
Desgaste máquina de los ángeles	E-218	25% máx.	20.1%
Micro-Deval	E-238	20% máx.	10.4%
Durabilidad			
Pérdidas en el ensayo de solidez en sulfato de sodio agregado grueso	E-219	12% máx.	8.36%
Pérdidas en el ensayo de solidez en sulfato de sodio agregado fino	E-220	12% máx.	9.6%
Pérdidas en el ensayo de solidez en sulfato de magnesio agregado grueso	E-220	18% máx.	4.50%
Pérdidas en el ensayo de solidez en sulfato de magnesio agregado fino	E-221	18% máx.	4.1%
Limpieza			
Equivalente de arena	E-133	50% mín.	61%
Contenido de impurezas	E-237	0.5% máx.	5.0%
Geometría de las partículas			
Partículas fracturadas mecánicamente	E-227	85 - 70% mín	88.7%
Partículas planas y alargadas relación 1:5	E-240	10% máx.	9.0%
Gravedad específica			
Gravedad específica y absorción	E-222 Y E-223	-	-

Tabla 20. Resumen de ensayos a materiales pétreos provenientes de la cantera Rio Téllez, vereda San José, municipio de Funes

Al comparar los resultados obtenidos en los ensayos realizados con los topes definidos por la norma según tabla 400.1 (c), Requisitos de los agregados pétreos para, tratamientos, lechadas mezclas bituminosas para el nivel

de tránsito NT3, de las especificaciones de la norma, en el art 400-07. **(disposiciones generales para la ejecución de riegos de imprimación, liga y curado, tratamientos superficiales, sellos de arena asfalto, lechadas asfálticas, mezclas asfálticas en frío y en caliente y reciclado de pavimentos asfálticos)**, el material ensayado perteneciente a la cantera Río Téllez, vereda San José, municipio de Funes, cumple con la totalidad de las imposiciones hechas por la norma, excepto el contenido de impurezas, el cual no sería un inconveniente mayor ya que se soluciona realizando un lavado al material posterior a la fragmentación y separación realizada en cantera.

Con lo anterior se cataloga el material como apto para la elaboración de mezclas densas en caliente 2.

3. DOSIFICACIÓN DE MEZCLAS DENSAS EN CALIENTE MDC 2 (INV450 – 07)

3.1 MÉTODO MARSHALL

Este método fue propuesto por el ingeniero Bruce Marshall del cuerpo de ingenieros de los Estados Unidos, encargado del control de calidad de las mezclas asfáltica en Missisipi State Highway Department. El cual basado en resultados de diversas investigaciones y estudios de correlación mejoraron y proporcionaron ciertas características al método de diseño de mezclas.

El método de Bruce Marshall, es aplicable únicamente a mezclas en caliente empleando cemento asfáltico y agregados con tamaño máximo igual o inferior a 25mm, se puede emplear para desarrollar proyectos en laboratorio o en el control de la obra en el proceso de construcción, este método se lo tomó como base y se ha normalizado por la ASTM y la AASHTO.

3.1.1 Descripción del método. Lo primordial al empezar a desarrollar el método Marshall, es que los materiales para la mezcla, cumplan con los requerimientos exigidos por las especificaciones. Se debe tener una cantidad suficiente de material en las diferentes fracciones según su tamaño que brinda de la granulometría, se debe haber determinado los pesos específicos de los materiales pétreos y el cemento asfáltico, para poder realizar un análisis de densidad y vacíos.

Este método, se prepara a través de un procedimiento especificado para calentar, mezclar y compactar la mezcla de agregados pétreos con el cemento asfáltico empleando briquetas cilíndricas normalizadas de 2.5 pulg. (6.35 cm) de altura y 4 pulg. (10.16 cm) de diámetro.

El propósito y objetivos de este método es realizar un análisis de densidad, vacíos y la determinación de la estabilidad y el flujo de cada briqueta elaborada, la estabilidad se define como la máxima carga que puede resistir la briqueta normalizada a 60 °C (140 °F) ensayadas bajo las condiciones que exige el método y el flujo es la deformación total que se produce en la briqueta desde el comienzo hasta la máxima carga durante el ensayo de estabilidad.

3.1.2 Equipo para realizar el ensayo:

Baño de agua para probetas Marshall:

- Construido totalmente en acero inoxidable, tiene una capacidad para 10 probetas Marshall.
- Posee termostato de corte automático, llave de encendido y luz piloto.

Molde de compactación Marshall:

- Construido de tubo de acero maquinado, con base y collar intercambiables en ambos extremos del molde. Se utiliza para la preparación de probetas para ensayo de estabilidad.

Pisón de compactación para ensayos de estabilidad:

- El pisón de compactación se utiliza para compactar dinámicamente la probeta de asfalto dentro del molde de compactación.
- El martillo deslizante tiene un peso de 4,540 kg y una caída libre de 457 mm.

Base de compactación:

- El pedestal de compactación se utiliza con el molde de compactación durante este proceso.
- Consiste en un taco de madera dura con una placa de acero instalada en la parte superior y una guía especial para el pisón de compactación Marshall.

Compactador automático para ensayos Marshall:

- El compactador reproduce automáticamente la compactación manual, asegurando la repetitividad en los resultados del ensayo.
- Este equipo está diseñado y construido de forma que la distancia de caída del martillo sea la misma en cada impacto.
- Un contrapeso ubicado en la parte superior de la máquina evita el efecto de rebote sobre la muestra.
- Posee un sistema de lectura de la cantidad de golpes efectuados, con pre determinador de parada automática, todo esto instalado en forma separada del cuerpo principal de la máquina.
- Incluye un molde de compactación Marshall.

Mordaza para ensayo de estabilidad:

- Este dispositivo de ensayo se utiliza para la aplicación de cargas durante el ensayo de estabilidad.

Prensa extractora:

- Esta prensa se utiliza para la extracción de probetas del interior del molde Marshall.
- Accionamiento manual a tornillo.

Máquina extractora de probetas de pavimento:

- Esta máquina está diseñada y construida para extraer testigos en carreteras, puentes, etc, equipada con motor a explosión de 6hp. con camisa de acero y acelerador, posee tres ruedas, una de ellas giratoria que facilita su traslado en trayectos cortos.
- A pedido se construye sobre ruedas neumáticas y enganche vehicular.



Fotografía 20. Prensa universal



Fotografía 21. Anillo de carga y medidor de flujo

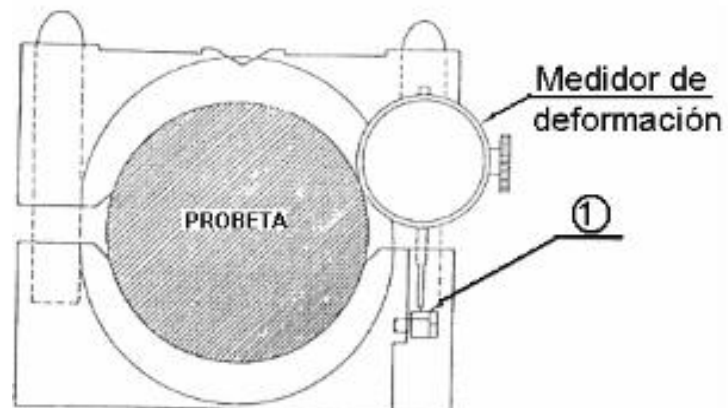


Imagen 12. Dispositivo de ensayo de la probeta y mordaza.

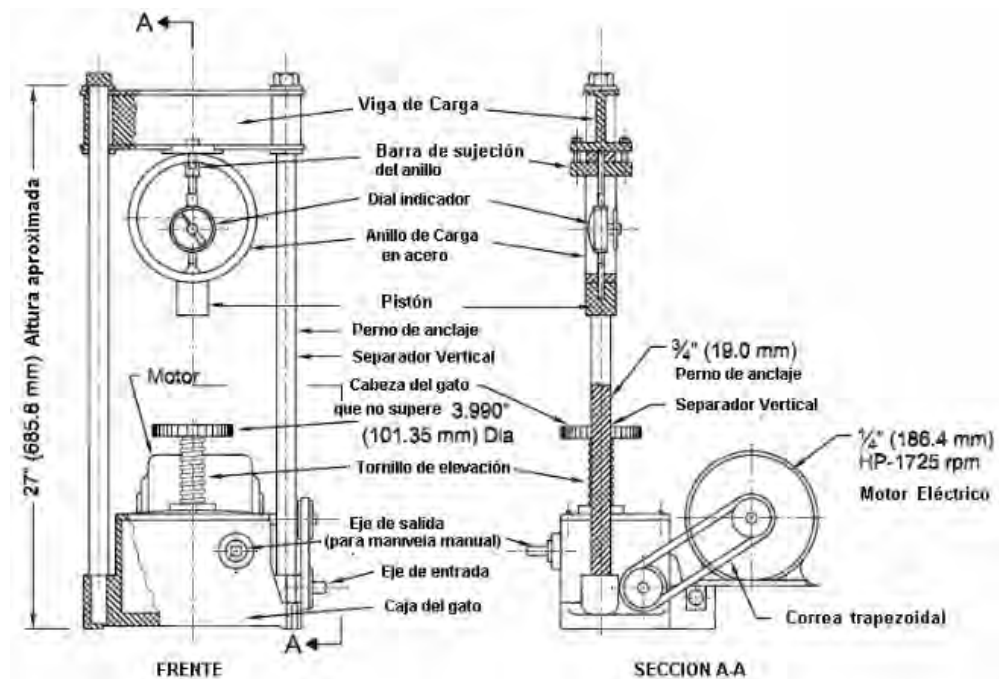


Imagen 13. Descripción máquina de compresión

3.1.3 Preparación de las briquetas. Para obtener el contenido óptimo de asfalto, para una mezcla definida por el método Marshall, se debe preparar una serie de briquetas con diferentes cantidades de ligante asfáltico para que de esta manera se tenga unos resultados más representativos y así poder determinar con mayor claridad en las curvas un valor óptimo de asfalto. El asfalto se incrementa en 0.5 % en cada muestra y se deben realizar por lo menos dos contenidos de asfalto por encima y dos por debajo del valor óptimo.

La cantidad de material pétreo para cada briketa es de 1.200 gr, por lo que se necesita una cantidad total de 22 kg de material para la realización del ensayo, y en cuanto a la cantidad de cemento asfáltico mínima es de 4 l o 4 kg aproximadamente.

Los agregados que se van a utilizar deben estar separados en las diferentes fracciones granulométricas y secos para garantizar un buen desarrollo del ensayo.

El cemento asfáltico debe ser llevado a una temperatura óptima de mezcla y compactación para que de esta manera se pueda obtener viscosidades entre 85 ± 10 segundos saybolt furol (170 ± 20 centistokes) 140 ± 15 segundos saybolt furol (280 ± 20 centistokes) respectivamente (ver ANEXO E).

ESPECIFICACIÓN ASTM	ASFALTO PROVENIENTE DE REFINERÍA		
	CARTAGENA	B/BERMEJA	APIAY
Temperatura de mezclado, Método de diseño Bruse Marshall, °C	145 - 140	147 – 152	°143 - 148
temperatura de compactación, Método de diseño Bruse Marshall, °C	135 - 151	137 – 142	134 - 138
Temperatura de mezclado, en planta, °C	145 - 132	139 – 152	135 - 148

Tabla 21. Temperaturas óptimas de los asfaltos colombianos.

Los agregados se deben calentar a una temperatura por encima del asfalto en 27 °C. Se procede a la mezcla y luego su compactación de las briquetas aplicando una cantidad determinada de golpes por cada cara de la briketa, esto depende del tránsito que se espere.

TRANSITO	EJES EQUIVALENTES A 8.2 TON .N	NÚMERO DE GOLPES POR CARA
Liviano	Menor o igual a 10^4	35
Mediano	$10^4 - 10^6$	50
Pesado	Mayor de 10^6	75

Tabla 22. Número de golpes por cara según la intensidad del transito



Fotografía 22. Calentamiento material pétreo para realización de briquetas



Fotografía 23. Calentamiento cemento asfáltico para realización de briquetas



Fotografía 24. Cantidad de material pétreo para cada briqueta



Fotografía 25. Incorporación del cemento asfáltico al agregado pétreo



Fotografía 26. Mezcla de material pétreo y cemento asfáltico



**Fotografía 27. Molde de compactación con la mezcla densa en caliente de
asfalto convencional**



Fotografía 28. Toma de temperatura para la compactación



Fotografía 29. Compactación de la briqueta



Fotografía 30. Briqueta terminada

3.1.4 Determinación del peso específico “bulk”. La densidad se debe realizar cuando las briquetas hayan alcanzado la temperatura ambiente, existen tres métodos para la realización de este ensayo, recubriendo las briquetas con parafina, sin parafina y midiendo las dimensiones de la briqueta.

En este trabajo el método que se utilizó fue el segundo, sin parafina, ya que era una mezcla cerrada las partículas están muy unidas y no existen grandes vacíos para que pueda penetrar el agua de tal manera que no era necesario finarlas.

Método A. Briquetas cubiertas con parafina.

Densidad Real = Peso al aire/Volumen de la briqueta $DR = A/V$

Peso específico Bulk de la briqueta (P.E) = Densidad Real / Densidad del agua

$$P.E = A / (B-C) - (B-A)/PE_p$$

DR: Densidad real, peso unitario, g/cm^3

V: volumen de la briqueta, cm^3

A: Peso de la briqueta en el aire, g

B: Peso de la briqueta en el Aire, g

C: peso de la briqueta en el agua, g

P.Ep: Peso específico de la parafina (0.90)

Método B. Briquetas sin ser cubiertas de parafina

Densidad Real = Peso al aire/Volumen de la briqueta. $DR = A/V$

Peso específico Bulk de la briqueta (P.E) = Densidad Real / Densidad del agua.
 $P.E = A / A-C$

DR: Densidad Real, peso unitario, g/cm^3

V: volumen de la briqueta, cm^3

A: Peso de la briqueta en el aire, g

C: peso de la briqueta en el agua, g

Método C. Briquetas sin parafina y con Dimensiones uniformes

Densidad Real = Peso al aire/Volumen de la briqueta. $DR= A/V$

Peso específico Bulk de la briqueta (P.E) = Densidad Real / Densidad del agua

$$P.E = A / 0.785 (d)^2(a)$$

DR: Densidad Real, peso unitario, g/cm^3

V: volumen de la briqueta, cm^3

A: Peso de la briqueta en el aire, g

d: Diámetro de la briqueta, cm

a: Altura de la briqueta, cm, $0.785 = \pi/4$



Fotografía 31. Peso de la muestra en el aire para densidad bulk



Fotografía 32. Peso de la muestra sumergida en el agua para densidad bulk

3.1.5 Ensayo de estabilidad y flujo. Una vez determinada la densidad de las briquetas, se realiza el ensayo de estabilidad y flujo. Se introducen la briquetas a baño maría a unos 60 °C durante un tiempo no menor a 30 min ni superior a 40 min, se coloca el equipo Marshall para aplicar carga a las briquetas a una velocidad constante de 50.8 mm/mto, hasta que la briketa se rompa, la carga máxima que tiene la briketa al momento de romperse se denomina como estabilidad Marshall y la deformación que se presenta se denomina flujo Marshall, esta se mide desde el inicio de la carga (fotografía 25).



Fotografía 33. Ensayo de estabilidad y flujo

3.1.6 Análisis de densidad y vacíos. Una vez determinada la Estabilidad y el Flujo Marshall se evaluará las características de los diferentes casos de

compactación obtenidos con cada uno de los porcentajes de asfalto estudiados, para lo cual se sigue el siguiente procedimiento:

Se promedia la densidad de todas las probetas con el mismo contenido de asfalto.

Utilizando el peso específico bulk de los agregados, el peso específico máximo teórico de la mezcla y peso específico del asfalto, se deduce.

El peso del cemento asfáltico absorbido por el agregado seco

El porcentaje de vacíos en la mezcla total Vv.

El porcentaje de vacíos en el agregado mineral V.A.M.

El porcentaje de vacíos llenos de asfalto.

FÓRMULA DE TRABAJO PARA MEZCLA ASFALTICA - METODO MARSHALL

FUENTE DE MATERIAL Río Telléz

M D C - 2(INV-2007)

Peso específico de Agregados: 2,536

Peso específico del asfalto: 1,016

Muestra No.	% Asfalto	PESO EN GRAMOS			Volumen (cm³)	Peso	Peso específico		Asfalto absorbido (%)	VOLUMEN % TOTAL				Vacíos en Agregados Minerales	% de Asfalto Efectivo	Llenante/Ligante	Lectura Dial Carga (Lb)	ESTABILIDAD		Flujo (mm)
		Seca en aire (g)	SSS en aire (g)	En agua (g)		unitario "Bulk" (g/cm³)	Máximo Teórico	Máximo Medido		Agregado	Vacíos llenos con asfalto	Vacíos con aire	Asfalto efectivo					Medida (kg)	Corregida (kg)	
a	b	c	d	f	g	h	i	j	k	l		m	n	o	p		q	r	s	
						d/(e-f)			(i-h)*10⁴/(j-h*100-b)	(100-b)*g/Gagr		(1-g/i)*100	100-k-l	100-k	(j*(100-b)/100)					
1		1198,40	1206,50	678,30	528,2	2,269											1852,00	840,05	809	2,00
2		1191,00	1201,30	689,50	511,8	2,327											1852,00	840,05	850	2,00
3		1197,00	1207,60	671,20	536,4	2,232											1833,00	831,43	782	2,00
PROMEDIO	4,5					2,276	2,376	2,520	2,53	85,7	32,7	9,7	4,6	14,30	2,09	3,48			814	2,0
4		1190,50	1201,00	679,30	521,7	2,282											2037,20	924,06	908	2,40
5		1192,00	1193,70	676,80	516,9	2,306											2129,80	966,06	963	2,30
6		1195,10	1196,30	677,90	518,4	2,305											1944,60	882,06	875	2,00
PROMEDIO	5,0					2,298	2,360	2,501	2,52	86,1	42,4	8,1	5,8	13,92	2,61	2,77			915	2,2
7		1185,00	1193,70	676,80	516,9	2,293											2315,00	1050,07	1047	2,50
8		1196,00	1204,60	683,80	520,8	2,296											2361,30	1071,07	1055	3,00
9		1190,30	1199,80	691,40	508,4	2,341											2407,60	1092,07	1117	2,80
PROMEDIO	5,5					2,310	2,343	2,482	2,53	86,1	50,8	6,9	7,0	13,92	3,11	2,31			1073	2,8
10		1189,50	1195,00	679,30	515,7	2,307											2268,70	1029,06	1029	3,00
11		1189,00	1196,00	677,30	518,7	2,292											2129,80	966,06	958	3,60
12		1185,50	1196,10	678,50	517,6	2,290											2222,40	1008,06	1003	3,30
PROMEDIO	6,0					2,296	2,327	2,463	2,53	85,1	55,0	6,8	8,1	14,88	3,62	1,97			997	3,3
13		1188,60	1196,20	671,30	524,9	2,264											2037,20	924,06	899	3,60
14		1190,20	1198,20	679,50	518,7	2,295											1944,60	882,06	874	3,80
15		1185,30	1192,30	681,20	511,1	2,319											1898,30	861,05	873	3,80
PROMEDIO	6,5					2,293	2,311	2,433	2,32	84,5	63,2	5,8	9,7	15,47	4,33	1,64			882	3,7
F. TRAB.	6,1					2,310	2,324	2,482	2,92	85,5	52,7	6,9	7,5	14,47	3,35	2,13			1122	3,2
F.T. ENRIQ.	5,8					2,250	2,334	2,346	0,24	83,6	75,1	4,1	12,3	16,42	5,57	1,28			1124	3,3

Tabla 23.Resultados método Marshall

3.1.7 Representación gráfica Marshall convencional. Se promedian los valores de pesos unitarios de las briquetas para cada contenido de cemento asfáltico, también la estabilidad y el flujo Marshall, con la diferencia que el flujo debe hacerse una corrección de la altura o del volumen de cada biqueta.

Uno de las primeras gráficas que se debe realizar es la de los pesos unitarios o densidad real de las briquetas compactada contra los diversos contenidos de asfalto empleados durante el diseño.

Los gráficos se complementan el resultado del ensayo Marshall, son:

- Estabilidad Marshall
- Flujo Marshall
- Vacíos totales
- Vacíos en el agregado mineral
- Vacíos llenos con asfalto(no se incluye en las normas actuales)

- Curva de estabilidad¹.

La curva representa una rama ascendente, conocida como “Rama Seca” que crece a medida que se incrementa el porcentaje de asfalto, hasta llegar a un máximo y luego comienza decrecer con incrementos sucesivos de ligante, esta rama se la conoce como “rama rica en asfalto” esta curva de forma convexa hacia arriba, está íntimamente relacionada con la curva de densidad. Para contenidos bajos de asfaltos y ante un esfuerzo dado de compactación, para una granulometría dada, los esfuerzos que se le suministran son absorbidos prácticamente por las partículas por lo que la resistencia se debe casi que exclusivamente a la fricción interna de las partículas del agregado. A medida que se incrementa el asfalto, el aporte de cohesión es mayor complementándose con el aporte de fricción de las partículas del agregado. Esto sucede hasta un punto en el cual ante un exceso de asfalto se comienza a perder contacto interarticular y la estabilidad comienza a decrecer y es aportada por el ligante y la fracción fina del agregado. A medida que se aumenta la cantidad de asfalto, se sigue perdiendo aporte de fricción, el de cohesión tiende a estabilizarse y la estabilidad¹ continúa descendiendo.

- Curva de Densidad².

Presenta la misma tendencia que la anterior, aún cuando el porcentaje de ligante para la máxima densidad normalmente ocurre en valores de asfalto ligeramente superiores que para la máxima estabilidad.

¹ Tomado de TEORIA DE LOS PAVIMENTOS ing. Mg. Hugo León Arenas Lozano

² Ibíd.

- Curva de Flujo¹.

El flujo aumenta con el incremento del asfalto, siendo una consecuencia lógica de que las mezclas más ricas en asfalto son más flexibles y deformables que las mezclas secas.

- Curva de Vacíos Totales¹.

A medida que se incrementa el contenido de asfalto se van llenando los vacíos ocupados por el aire y como consecuencia su porcentaje respecto al volumen de la briqueta, se hace menor.

Curva de vacíos en el agregado mineral. Las mezclas de agregado sin ligante logran su mayor grado de densidad ante un esfuerzo de compactación. A medida que se incrementa el contenido de ligante, este cubre las partículas y hace que ellas comiencen a separarse, perdiendo el contacto grano a grano, y por lo tanto los espacios no ocupados por los agregados, que es el VAM, comienza a crecer.

A medida que comienza a aumentar el contenido de asfalto, este comienza a actuar como agente lubricante las partículas vuelven a buscar un mejor acomodo y los espacios entre los granos, nuevamente el VAM, tiende a disminuir. De este punto en adelante, nuevos incrementos del contenido de ligante continúan mejorando el acomodo y mejorando su densidad y disminuyendo los vacíos no ocupados por los agregados. Cuando los vacíos se llenan con el máximo de asfalto, cantidades adicionales de ligante comienzan a causar una separación entre las partículas de agregado y en consecuencia, los valores de VAM, comienzan a aumentar con cada incremento de asfalto.

Gráficas para determinación del contenido óptimo de asfalto:

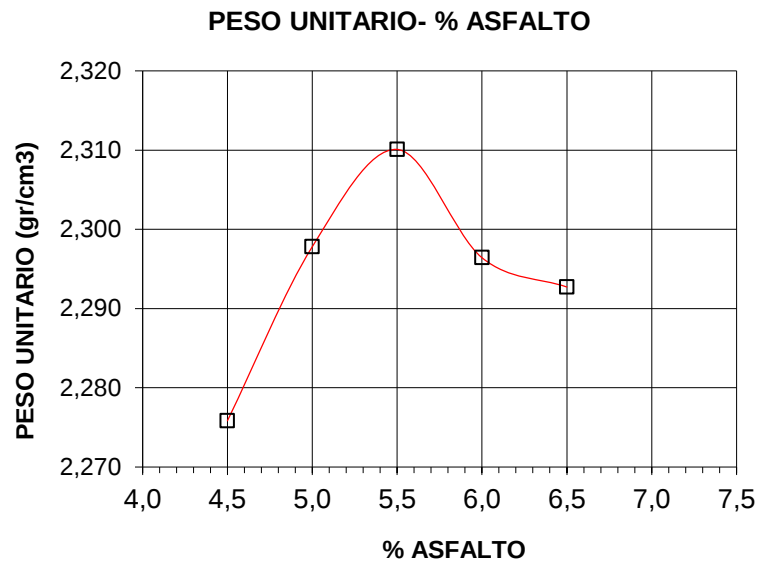


Imagen 14. Grafica peso unitario

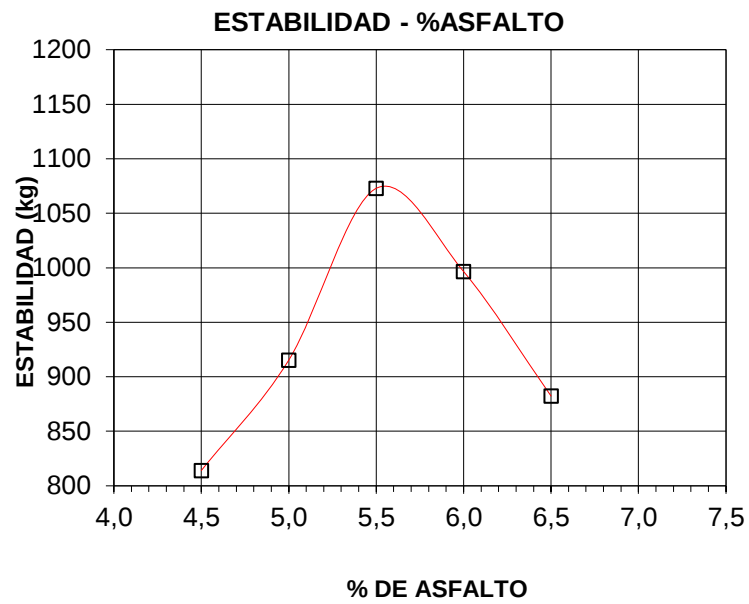


Imagen 15. Grafica de estabilidad

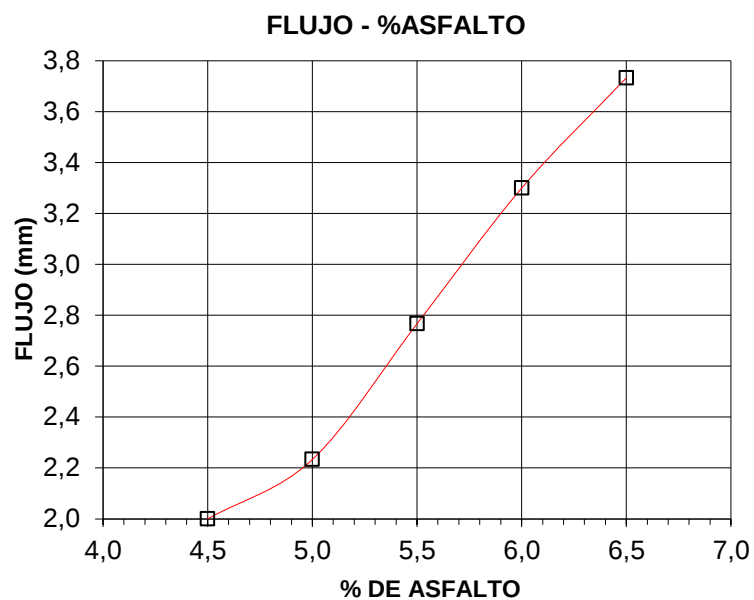


Imagen 16. Grafica de flujo

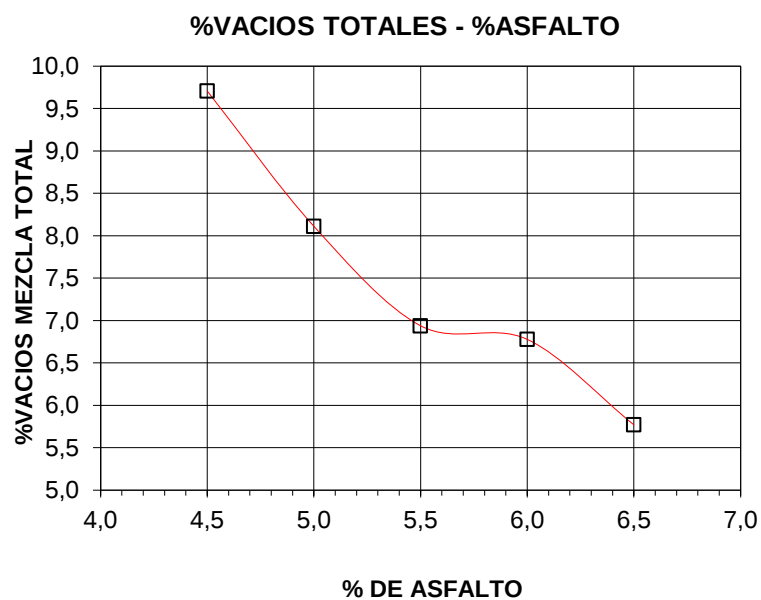


Imagen 16. Gráfica porcentaje vacíos totales muestra

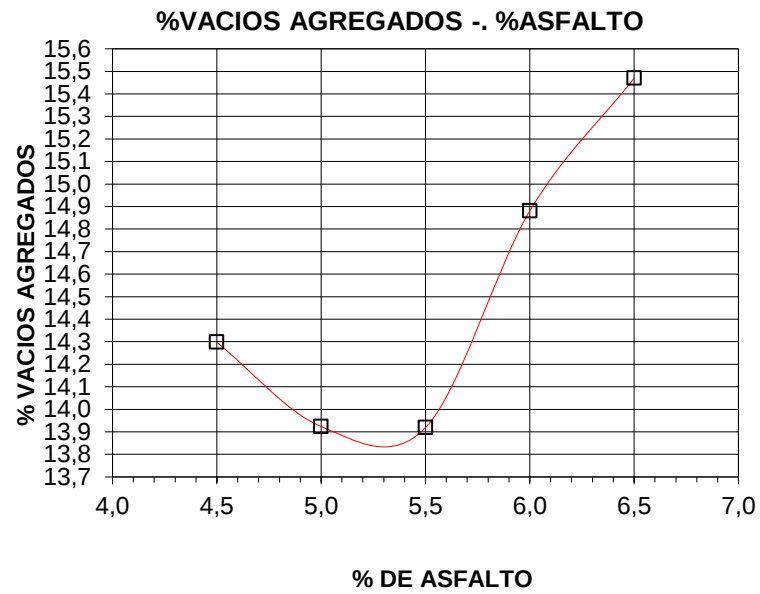


Imagen 17. Vacíos en el agregado.

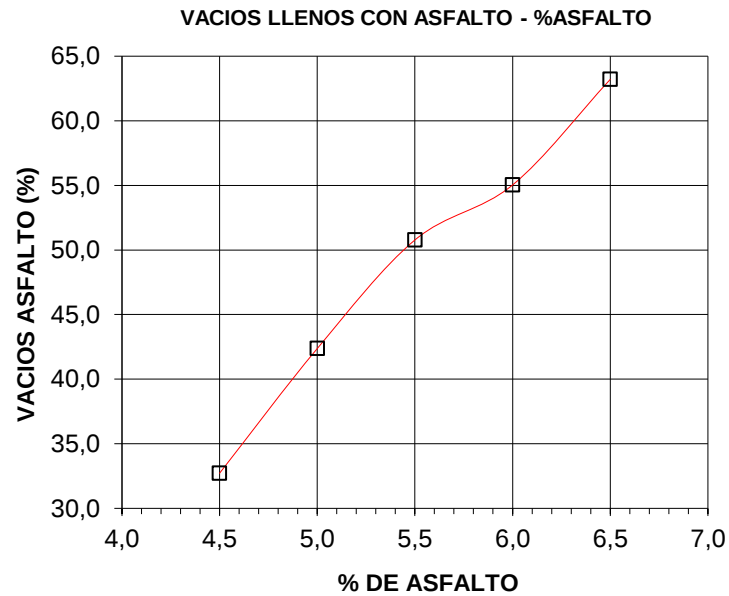


Imagen 18. Vacíos llenos de asfalto en el agregado.

RESUMEN:	Especificación
	General
Contenido de Asfalto (%):	5.5
Peso Unitario (gr/cm ³):	2.310
Estabilidad (Libras):	1075
Flujo (mm):	2.8
Vacíos con aire (%):	7.0
Vacíos de Agregados Minerales (%):	13.90
Vacíos Llenos con asfalto (%):	51.0
Temperatura de compactación (°C):	130

Tabla 24. Resumen ensayo Marshall

3.1.8 Contenido óptimo de asfalto. Para determinar el contenido de asfalto, se debe tener en cuenta las gráficas que anteriormente se analizaron y un procedimiento ya determinado.

- De la curva de estabilidad vs % de asfalto se debe seleccionar el porcentaje de asfalto el cual corresponde a un valor máximo de la curva de estabilidad.
- De la curva de densidad vs % de asfalto se selecciona el porcentaje de asfalto el cual corresponde a un valor de la curva de densidad.
- De la curva de vacíos vs % de asfalto se selecciona el porcentaje de asfalto y se obtiene el porcentaje de vacíos totales de la muestra, este valor está entre 3% y 5%
- De esta manera se promedia los valores máximos de las curvas para obtener el valor o el contenido de asfalto óptimo, teniendo en cuenta que cumpla con los exigencias que impone las especificaciones.

3.2 CRITERIOS QUE IMPONE LAS ESPECIFICACIONES PARA EL CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO

Se debe tener en cuenta que los valores cumplan con los criterios que establece la especificación con respecto a la mezclas densas en caliente y obtención de contenido óptimo de asfalto.

CARACTERISTICAS	TRANSITO DE DISEÑO (N) Ejes equivalentes de 80 kN		
	$>5 * 10^6$	$5 * 10^5 - 5 * 10^6$	$>5 * 10^5$
Compactación, golpes/cara	75	75	75
Estabilidad mínima kg	900	750	600
Flujo 0.01 in	8-14	8-16	8-16
Capa de rodadura %	4-6	3-5	3-5
Base asfáltica %	4-8	4-8	4-8
Gradación MDC- 0 %	14	14	14
Gradación MDC- 1 %	14	14	14
Gradación MDC- 2 %	15	15	15
Gradación MDC- 3 %	16	16	16
Vacíos llenos de asfalto %	65-75	65-78	65-80

Tabla 25. Criterios de diseño para mezclas asfálticas en caliente según el método Marshall (Instituto del asfalto- Art 400.2.4)

4. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DE ENSAYO CON EL MÉTODO MARSHALL CON ASFÁLTO NORMAL Y MODIFICADO

En la tabla 28, se presentan en primera instancia los resultados de los ensayos realizados con las briquetas con asfalto convencional, seguido por los resultados de las muestras con el asfalto modificado con fibras de polipropileno, es de mucha importancia saber que las briquetas tanto del asfalto convencional y modificado se realizaron con el mismo agregado pétreo de la cantera rio Téllez y cemento asfáltico de Barrancabermeja.

El porcentaje óptimo de asfalto es de (5.5%) para una mezcla convencional y para una mezcla con asfalto modificado el porcentaje óptimo es (5.12%) esto demuestra que al adicionarle el polipropileno el contenido de asfalto se reduce en un (0.38%).

Se encontró que la estabilidad se incrementa, este valor en la mezcla con asfalto convencional es de (1075 kg) y mezcla con asfalto modificado es de (1395 kg), encontrando un incremento de (320kg), demostrando que la briqueta aumento su rigidez, lo cual es obvio ya que el contenido de asfalto ha bajado en (0.38%) y se ha incorporado las fibras de polipropileno, sin embargo sigue cumpliendo los requisitos mínimos exigidos por las especificaciones INVIAS 2007.

Los valores de flujo que se lograron en la mezcla con cemento asfáltico modificado son menores en (0.4 mm) que el de mezcla convencional, esto se representa que la mezcla con mejor comportamiento en cuanto a resistencia a las deformaciones es la modificada, ya que esta puede ser más flexible para condiciones de tránsito pesado NT3, evitando que la mezcla se torne quebradiza en climas fríos y bajo acción de cargas.

En cuanto al peso unitario y al porcentaje de vacíos en la mezcla, la muestra que presenta los mejores comportamientos es la muestra que se le incorporó el 0.38% de polipropileno.

5. ANÁLISIS DE COSTOS

El análisis de precios se realizó para poder comparar el costo de la mezcla convencional como la de la mezcla con asfalto modificada. Observando que el costo de la mezcla modificada se ve incrementado su valor debido a que se le adiciona el polipropileno, además se necesita mano de obra para realizar la combinación del asfalto con el polímero y los agregados en la mezcla.

Existe una relación costo beneficio de una mezcla con asfalto convencional con respecto a la mezcla con asfalto modificado. Se sabe que la mezcla modificada es más costosa que la mezcla con asfalto convencional, pero el valor del modificado se ve compensado con los beneficios que esta puede traer en cuanto a espesores de carpeta más pequeños a las propiedades y a la vida útil del pavimento reduciendo los costos.

PRESUPUESTO DE UNA MEZCLA Densa EN CALIENTE EN PLANTA MDC2 CONVENCIONAL (m3)					
ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UND	V. UNITARIO	CANT/RDMTO	V. PARCIAL
1	EQUIPO				
1,1	planta de asfalto	h	\$ 473.258,51	0,023	\$ 10.931,46
1,2	cargador	h	\$ 78.000,00	0,125	\$ 9.750,00
1,3	Terminadora de asfalto	h	\$ 250.000,00	0,125	\$ 31.250,00
1,4	compactador vibratorio	h	\$ 65.000,00	0,125	\$ 8.125,00
1,5	compactador neumático	h	\$ 65.000,00	0,125	\$ 8.125,00
COSTO CAPITULO					\$ 68.181,46
2	MATERIALES				
2,1	Gravilla 3/8"	m3	\$ 48.000,00	0,441	\$ 21.160,00
2,2	Arena de peña	m3	\$ 38.000,00	0,320	\$ 12.160,00
2,3	Finos	m3	\$ 31.000,00	0,230	\$ 7.130,00
2,4	Asfalto solido	Kg	\$ 1.150,00	185,000	\$ 212.750,00
2,5	Energía	KW	\$ 523,00	6,000	\$ 3.138,00
2,6	Combustible	Gal	\$ 5.650,00	7,000	\$ 39.550,00
2,7	Desperdicio	m3	\$ 177.880,27	0,038	\$ 6.827,08
COSTO CAPITULO					\$ 302.715,08

3	TRANSPORTE				
3,1	Volqueta viaje (30 Km máx.)	6 m3	\$ 117.000,00	0,167	\$ 19.500,00
COSTO CAPITULO					\$ 19.500,00
4	MANO DE OBRA				
4,1	Inspector (1)	día	\$ 25.000,00	0,025	\$ 625,00
4,2	Tornillero (1)	día	\$ 15.000,00	0,025	\$ 375,00
4,3	Rastrillero (2)	día	\$ 30.000,00	0,025	\$ 750,00
4,4	Melachero (1)	día	\$ 15.000,00	0,025	\$ 375,00
4,5	Ayudantes (4)	día	\$ 60.000,00	0,013	\$ 750,00
COSTO CAPITULO					\$ 2.875,00
TOTAL COSTOS DIRECTOS					\$ 393.271,54
COSTOS INDIRECTOS AUI 30%					\$ 117.981,46
COSTO TOTAL POR M3 MEZCLA DENSA EN CALIENTE EN PLANTA MDC2 CONVENCIONAL					\$ 511.253,00

Tabla 239. Precios m³ de mezcla densa en caliente con asfalto convencional

PRESUPUESTO DE UNA MEZCLA DENSA EN CALIENTE EN PLANTA MDC2 MODIFICADA CON POLIMERO (m3)					
ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UND	V. UNITARIO	CANT/RDMTO	V. PARCIAL
1	EQUIPO				
1,1	planta de asfalto	h	\$ 473.258,51	0,023	\$ 10.931,46
1,2	cargador	h	\$ 78.000,00	0,125	\$ 9.750,00
1,3	Terminadora de asfalto	h	\$ 250.000,00	0,125	\$ 31.250,00
1,4	compactador vibratorio	h	\$ 65.000,00	0,125	\$ 8.125,00
1,5	compactador neumático	h	\$ 65.000,00	0,125	\$ 8.125,00
COSTO CAPITULO					\$ 68.181,46

2	MATERIALES					
2,1	Gravilla 3/8"	m3	\$ 48.000,00	0,450	\$ 21.600,00	
2,2	Arena de peña	m3	\$ 38.000,00	0,320	\$ 12.160,00	
2,3	Finos	m3	\$ 31.000,00	0,230	\$ 7.130,00	
2,4	Polipropileno	Kg	\$ 800,00	11,544	\$ 9.235,20	
2,5	Asfalto solido	Kg	\$ 1.150,00	173,456	\$ 199.474,00	
2,6	Energía	KW	\$ 523,00	6,000	\$ 3.138,00	
2,7	Combustible	Gal	\$ 5.650,00	7,000	\$ 39.550,00	
2,8	Desperdicio	m3	\$ 177.880,27	0,038	\$ 6.827,08	
					COSTO	\$
					CAPITULO	299.114,28
3	TRANSPORTE					
3,1	Volqueta viaje (30 Km máx.)	6 m3	\$ 117.000,00	0,167	\$ 19.500,00	
					COSTO	\$
					CAPITULO	19.500,00
4	MANO DE OBRA					
4,1	Inspector (1)	día	\$ 25.000,00	0,025	\$ 625,00	
4,2	Tornillero (1)	día	\$ 15.000,00	0,025	\$ 375,00	
4,3	Rastrillero (2)	día	\$ 30.000,00	0,025	\$ 750,00	
4,4	Melachero (1)	día	\$ 15.000,00	0,025	\$ 375,00	
4,5	Ayudantes (5)	día	\$ 75.000,00	0,013	\$ 937,50	
					COSTO	\$
					CAPITULO	3.062,50
TOTAL COSTOS DIRECTOS						\$ 389.858,24
COSTOS INDIRECTOS AUI						\$
30%						116.957,47
COSTO TOTAL POR M3 MEZCLA DENSA EN CALIENTE EN PLANTA MDC2						\$
MODIFICADA CON POLIPROPILENO						506.815,71

Tabla 30. Precios m³ de una mezcla densa en caliente con asfalto modificado con polipropileno.

7. CONCLUSIONES

En la investigación realizada en este trabajo de grado después de manipular cada 0.2% en adelante, se logró establecer que la adición óptima de fibras de polipropileno es del 0.38%, con respecto al peso total de la briqueta utilizada para el ensayo Marshall, el cual representa un incremento relativamente considerable de la estabilidad con respecto a una mezcla con asfalto convencional, además se observa una disminución teóricamente baja del flujo, el cual indica que tendrá una mejor comportamiento ante la exigencia de las cargas, sin afectar su flexibilidad.

La selección de la fuente de material cantera río Téllez, vereda san José municipio de Funes, departamento de Nariño, fue un aporte importante para la calidad final de la mezcla ya que los materiales ensayados (agregado pétreo grueso y fino) cumplieron con las exigencias de la norma INV 2007 en cuanto a su composición, dureza, durabilidad y geometría.

Se verificó la calibración de la prensa Marshall, determinando que esta, se encuentra en óptimas condiciones para brindar resultados confiables y satisfactorios para el normal desarrollo de la investigación en el laboratorio de suelos de la Universidad de Nariño.

En general en esta investigación, se pudo apreciar que en las mezclas asfálticas modificadas con polipropileno tienden a tener una reducción en su contenido de asfalto en un 0.38%, una reducción de flujo que hace que las mezclas sean menos deformables, pero que con respecto a la estabilidad que incremento su valor, se podrán soportar las cargas sin agrietarse, garantizando la resistencia de la muestra.

Según los resultados obtenidos en esta investigación se podría asegurar que si se analiza y se estudia el agregar diferentes productos plásticos de desechos industriales reciclables a la mezcla asfáltica, como plástico reciclado o caucho de llantas usadas y desechadas, las propiedades de la mezcla asfáltica, podría mejorar sus características y también se estaría contribuyendo a una reducción en el impacto ambiental que producen estos desechos ya que se los estaría reutilizando.

8. RECOMENDACIONES

Verificar en cuanto a los ensayos realizados a los agregados pétreos provenientes de la cantera del río Téllez el proceso de lavado después de la trituración y separación del material, ya que en el ensayo de contenido de impurezas se debió lavar nuevamente la muestra proveniente de la cantera con anterioridad al ensayo, para que así cumpla con lo exigido en la norma.

Evaluar las propiedades de los materiales de diferentes canteras para lograr determinar cuál se obtiene un mejor desempeño en cuanto a las propiedades físico- mecánicas de los agregados de la región.

Incluir la utilización de diferentes materiales de desechos industriales para así determinar cuál es el más apropiado y el que mejor ayuda a modificar alguna o varias propiedades en la mezcla densa en caliente.

BIBLIOGRAFÍA

ARENAS LOZANO, Hugo León. Teoría de los Pavimentos, Universidad del Cauca
MARTÍNEZ BRINGAS, Claudia. FONSECA RODRÍGUEZ, Carlos. Empleo De Fibras En La Elaboración De Mezclas Asfálticas Para Pavimentos De Graduación Abierta – Cuadernos Fica- México 1999

BISSO FERNÁNDEZ, Ricardo E. Los Asfaltos, Tecnología y Aplicaciones. Editado por Petróleos del Perú – Petroperú S.A., Noviembre de 1998.

ELVIRA MUÑOZ, José Luis. Mezclas asfálticas en caliente y en frío. Universidad del Cauca instituto de vías, 1988.

ESSO COLOMBIA, S.A. Principios básicos para el diseño de pavimentos Flexibles. Bogotá, 1979.

GAMICA ANGUAS, Paul, DELGADO ALAMILLA, Horacio y SANDOVAL SANDOVAL, Carlos Daniel. Análisis comparativo de los métodos Marshall y Superpave para compactación de mezclas asfálticas Sanfandila, Qro, 2005.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Normas Colombianas para presentación de trabajo. Bogotá: ICONTEC, 2010.

MARIN URIBE, Carlos Rodolfo y GUZMÁN MELÉNDEZ, María Rosa. Metodología de una estructura de pavimento utilizando los Módulos dinámicos obtenidos en laboratorio aplicando los métodos Marshall y Superpave. Revista de Ingeniería Universidad de Medellín, Vol. 6, 2007.

MUÑOZ RICAURTE, Guillermo. Pavimentos de concreto asfáltico diseño y construcción. 3ª ed. Universidad de Nariño 2005.

PADILLA RODRIGUEZ, Alejandro. Ensayos de Laboratorio, Capitulo 5. Universidad Politécnica de Catalunya, 2004.

REPUBLICA DE COLOMBIA. MINISTERIO DE TRANSPORTE. Instituto nacional de vías. Especificaciones generales de construcción de carreteras, 2007.