

**CARACTERIZACIÓN FÍSICO MECÁNICA Y MINERALÓGICA DE LOS
AGREGADOS EXTRAÍDOS DEL DEPÓSITO ACOPIOS EN SOPÓ
CUNDINAMARCA PARA SU USO EN PAVIMENTOS**

**ANDRÉS MATEO SUÁREZ PIÑEROS
JONATHAN ANDRÉS VERA CASTRO**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

BOGOTÁ

2017

**CARACTERIZACIÓN FÍSICO MECÁNICA Y MINERALÓGICA DE LOS
AGREGADOS EXTRAÍDOS DEL DEPÓSITO ACOPIOS EN SOPÓ
CUNDINAMARCA PARA SU USO EN PAVIMENTOS**

**ANDRÉS MATEO SUÁREZ PIÑEROS
JONATHAN ANDRÉS VERA CASTRO**

Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero civil

Director

**JAVIER EDUARDO BECERRA BECERRA
Doctor en Geología Económica y Aplicada**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ
2017**

CONTENIDO

	pág.
LISTA DE TABLAS	15
LISTA DE ILUSTRACIONES.....	17
GLOSARIO	19
RESUMEN	23
INTRODUCCIÓN	15
1. ANTECEDENTES NACIONALES E INTERNACIONALES.....	16
1.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES.....	16
1.2. ANTECEDENTES NACIONALES	17
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	22
1.4. OBJETIVOS.....	23
1.4.1 OBJETIVO GENERAL.....	23
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	23
2. MARCO TEÓRICO	24
2.1. MUESTREO DE AGREGADOS PARA CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS	26
2.1.1 CONFIABILIDAD DE LAS MUESTRAS.....	27
2.1.2 INSPECCIÓN.....	27
2.1.3 PROCEDIMIENTOS DE MUESTREO	27
2.1.4 NÚMERO Y TAMAÑO DE LAS MUESTRAS DE CAMPO	28
2.2. CARACTERIZACIÓN TECNOLÓGICA	29
• FORMA DE LOS FRAGMENTOS	33
• DESGASTE A LA ABRASIÓN	35
2.3. DIFRACCIÓN DE RAYOS X.....	35
2.4. FLUORESCENCIA DE RAYOS X	36
2.5. REACTIVIDAD ÁLCALI AGREGADO.....	37
3. LOCALIZACIÓN.....	39

(continuación)

pág

4. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS	40
4.1. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LOS MATERIALES	41
4.2. LÍMITES DE ATTERBERG	63
4.2.1 LÍMITE LÍQUIDO	63
4.3. EQUIVALENTE DE ARENA DE SUELOS Y AGREGADOS FINOS	68
4.4. CONTENIDO DE TERRONES DE ARCILLA Y PARTÍCULAS DELEZNABLES	74
4.5. SOLIDEZ DE LOS AGREGADOS FRENTE A LA ACCIÓN DE SOLUCIONES DE SULFATO DE SODIO O DE MAGNESIO	79
4.6. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DEL AGREGADO GRUESO A LA DEGRADACIÓN POR ABRASIÓN, UTILIZANDO EL APARATO MICRO-DEVAL	87
4.7. RESISTENCIA A LA DEGRADACIÓN DE LOS AGREGADOS DE TAMAÑOS MENORES DE 37,5 MM (1½") POR MEDIO DE LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES.	89
5. CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA DE LOS AGREGADOS	92
5.1. TRITURADO DE CARMEN DE CARUPA	97
5.2. ARENA DE RÍO	103
5.3. ARENA DE PEÑA	113
6. IDENTIFICACIÓN DE MINERALES	117
6.1. ARENA DE RÍO	117
6.2. TRITURADO	120
6.3. ARENA DE PEÑA	122
7. INCIDENCIA DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS AGREGADOS EN EL COMPORTAMIENTO DEL PAVIMENTO	123
8. CONCLUSIONES	128
9. RECOMENDACIONES	130
BIBLIOGRAFÍA	131

LISTA DE TABLAS

	pág
Tabla 1. Ensayos de resistencia y limpieza.....	25
Tabla 2. Tamaño de muestras tentativo	28
Tabla 3. Solicitaciones de comportamiento. Resistencia	31
Tabla 4. Especificaciones de interés	32
Tabla 5. Dimensionamiento de partículas	34
Tabla 6. Franjas granulométricas para el material de afirmado.....	42
Tabla 7. Franjas granulométricas para el material de subbase.....	42
Tabla 8. Franjas granulométricas para el material de base.....	43
Tabla 9. Masa mínima para muestra de ensayo	44
Tabla 10. Triturado de pulgada, según especificaciones para subbase	45
Tabla 11. Triturado de tres cuartos, según especificación para subbase.....	46
Tabla 12. Arena de peña según especificación para subbase	46
Tabla 13. Arena de río para subbase	47
Tabla 14. Granulometría triturado de una pulgada según especificación para base	53
Tabla 15. Granulometría triturado de tres cuartos según especificación para base	54
Tabla 16. Granulometría triturado de una pulgada para afirmados	59
Tabla 17. Granulometría triturado de tres cuartos para afirmado.....	59
Tabla 18. Tamices utilizados luego del remojo.....	77
Tabla 19. Juego de tamices para agregado fino	80
Tabla 20. Especificaciones agregado grueso.....	81
Tabla 21. Resultados por fracción.....	85
Tabla 22. Cantidad de material para ensayo micro deval	87
Tabla 23. Gradación sugerida	87
Tabla 24. Resultados del ensayo de micro deval	88
Tabla 25. Límites referenciales para diferentes aplicaciones de agregados	88
Tabla 26. Granulometría necesaria para el ensayo.....	89
Tabla 27. Distribución granulométrica del agregado para ensayo.....	90
Tabla 28. Carga abrasiva según granulometría	90
Tabla 29. Especificación de dureza para sub-bases.	91
Tabla 30. Proporción de tamaños arena de río	103
Tabla 32. Descripción muestras de arena de río.....	111
Tabla 33. Frecuencia de tamaños arena de peña	114
Tabla 34. Forma de granos arena de peña	115
Tabla 35. Proporción mineralógica arena de río.....	119
Tabla 37. Proporción mineralógica triturado.....	121

(Continuación) pag.

Tabla 38. Proporción mineralógica arena de peña.....	122
Tabla 39. Minerales presentes en los áridos	127

LISTA DE ILUSTRACIONES

Pag

Ilustración 1. Caliza, arenisca y cuarcita	21
Ilustración 2. Granitos	22
Ilustración 3. Ubicación del acopio	39
Ilustración 4. Distribución granulométrica Triturado de una pulgada según especificaciones para subbase	48
Ilustración 5. Distribución granulométrica Triturado de tres cuartos de pulgada según especificaciones para subbase.....	48
Ilustración 6. Distribución granulométrica arena de peña según especificaciones para subbase.....	49
Ilustración 7. Arena de río según especificación subbase.....	49
Ilustración 8. Mezcla para subbase	51
Ilustración 9. Triturado de una pulgada según especificación para base	55
Ilustración 10. Triturado de tres cuartos de pulgada según especificación para base	55
Ilustración 11. Mezcla para base.....	57
Ilustración 12. Granulometría de una pulgada para afirmado	60
Ilustración 13. Granulometría de tres cuartos para afirmado.....	61
Ilustración 14. Mezcla para afirmado.....	62
Ilustración 15. Masa arena de río Ilustración 16. Masa arena de peña	64
Ilustración 17. Muestra de arena de peña Ilustración 18. Muestra de arena de río	65
Ilustración 19. Arena de peña en cazuela Ilustración 20. Arena de río en cazuela	65
Ilustración 21. Arena de peña ranura Ilustración 22. Arena de río ranura.....	66
Ilustración 23. Cierre arena de peña Ilustración 24. Cierre arena de río	66
Ilustración 25. Mayor contenido de humedad en arena de peña.....	67
Ilustración 26. Arena de peña para ensayo Ilustración 27. Arena de peña	69
Ilustración 28. Proceso de cuarteo, arena de peña Ilustración 29. Muestra de arena	69
Ilustración 30. Montaje final para ensayo	70
Ilustración 31. Materiales en solución	71
Ilustración 32. Materiales luego del lavado	72
Ilustración 33. Materiales luego del reposo	72

Ilustración 34. Muestra arena de peña antes del ensayo	75
Ilustración 35. Muestra arena de río antes del ensayo	75
Ilustración 36. Triturado sumergido en agua	76
Ilustración 37. Agregado fino sumergido	76
Ilustración 38. Materia indeseable en arena de río.....	78
Ilustración 39. Solución de sal de Epsom.....	80
Ilustración 40. Fracciones de arena de peña.....	82
Ilustración 41. Fracciones de arena de peña.....	82
Ilustración 42. Fracciones de triturado	83
Ilustración 43. Arena de peña sumergida en sulfatos.....	83
Ilustración 44. Arena de río sumergida en sulfatos	84
Ilustración 45. Agregado grueso sumergido en sulfato	84
Ilustración 46. Forma de los granos	94
Ilustración 47. Grado de empaquetamiento	96
Ilustración 48. Contenido mineralógico en el triturado analizado	102
Ilustración 49. Ilustración 51. Distribución granulométrica arena de río	110
Ilustración 50. Contenido mineralógico arena de río	111
Ilustración 51. Arena de río, microscopio digital	113
Ilustración 52. Distribución de tamaños arena de peña.....	114
Ilustración 53. Mineralogía arena de peña	116
Ilustración 54. Arena de peña, microscopio digital	116
Ilustración 55. Agregado de arenisca	117
Ilustración 56. Muestra de zircón.....	118
Ilustración 57. Cristal grano de horblenda	118
Ilustración 58. Matriz arcillosa y cuarzo.....	118
Ilustración 59. Cuarzo ondulante.....	119
Ilustración 60. Biotita	119
Ilustración 61. Agregado de arenisca	120
Ilustración 62. Zircón	120
Ilustración 63. Moscovita.....	121
Ilustración 64. Agregado de arenisca	121

GLOSARIO

MINERAL: es una sustancia de origen natural, inorgánica, sólida, con composición química y estructura interna definida¹.

ESTRUCTURA CRISTALINA: es la forma sólida de empaquetamiento de átomos, moléculas o iones, de forma ordenada y con patrones de repetición que se extienden en el espacio.².

PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS MINERALES: existen aproximadamente cuatro mil diferentes combinaciones de propiedades definidas como color, raya, dureza, brillo, gravedad específica, clivaje, magnetismo, solubilidad, entre otras³.

CUARZO: es uno de los minerales que más abunda en la naturaleza. Se encuentra especialmente en las rocas ígneas ácidas, pero también en rocas sedimentarias y metamórficas por su alta resistencia⁴.

Generalmente se presenta incoloro o coloreado por impurezas, su color de raya es blanco y su brillo es vítreo, es característica su alta dureza.

FELDESPATO: “los feldespatos conforman un grupo de minerales denominados aluminosilicatos. Estos minerales conforman el 60% de la corteza terrestre y son el componente esencial de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias. Las características de los feldespatos están vinculadas al proceso de constitución, dado por el enfriamiento rápido de lava volcánica. Los feldespatos presentan una morfología de una red tetraédrica de grupos de SiO₂ con incorporaciones de Al”⁵.

En cuanto a su color, los feldespatos se pueden presentar blancos o incoloros y en ocasiones amarillo, rosado, gris, verdoso o negro, lo que indica que están vinculados con la presencia de otros minerales.

MOSCOVITA: “es una mica que por su aspecto en general y en particular su excelente exfoliación en finas y flexibles láminas lo distinguen del resto de minerales, salvo de otras micas de las que se diferencia por la ausencia de color o por ser levemente plateado; la biotita es oscura, casi negra y la clorita es verde.

¹ HOBART T, King. What are minerals [en línea]. [citado en 04 de abril de 2017]. Disponible en internet <<http://geology.com/minerals/what-is-a-mineral.shtml>>

² MARTÍNEZ, Martín. CSIC. Departamento de cristalografía y biología estructural. [en línea]. [citado en 1 de mayo de 2017]. Disponible en internet en <<http://www.xtal.iqfr.csic.es/Cristalografia/>>

³ Ibid.

⁴ UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA. Cuarzo. [en línea]. [citado en 04 de abril de 2017]. Disponible en internet.< <http://www2.uned.es/cristamine/fichas/cuarzo/cuarzo.htm>>

⁵ ROCAS Y MINERALES. LOS FELDESPATOS. [en línea]. [citado en 04 de abril de 2017]. Disponible en internet < <http://www.rocasyminales.net/los-feldespatos/>>

Algunas moscovitas tienen nombres particulares dependiendo de su composición química. Por ejemplo la que contiene cromo que se denomina fuchsita. Se denomina ferocita a la variedad degradada que ha perdido potasio⁶.

PAVIMENTO: según Arenas. H un pavimento es una estructura compuesta por varias capas de materiales seleccionados, cuyo propósito es permitir el tránsito de vehículos de manera rápida, cómoda y segura que resulte a su vez eficiente y económica⁷.

FILLER: también conocido como polvo mineral es la fracción que pasa el tamiz de 0,063 mm. Este desempeña un papel fundamental en las mezclas bituminosas en función de su naturaleza, finura, actividad y proporción en la que entra a formar parte en la mezcla⁸.

MÁSTICO: unión de ligante asfáltico y polvo minera⁹.

SUB-BASE: de acuerdo con el artículo 300 de INVÍAS “se denomina subbase granular a la capa granular localizada entre la subrasante y la base granular en los pavimentos asfálticos o la que sirve de soporte a los pavimentos de concreto hidráulico”¹⁰.

AGREGADOS: “la palabra agregados se refiere a cualquier combinación de arena, grava o roca triturada en su estado natural o procesado. Son minerales comunes, resultado de las fuerzas geológicas erosivas del agua y del viento. Son generalmente encontrados en ríos y valles, donde han sido depositados por las corrientes de agua.”¹¹.

ROCA: según el departamento de geología de la Universidad de Chile “Las rocas son agregados de minerales sólidos de origen natural, cuyos componentes son definidos y se encuentran ordenados en su interior formando cristales. Los minerales y, por lo tanto, las rocas, tienen un origen muy diverso. Según este

⁶ REGIÓN DE MURCIA DIGITAL. Moscovita. [en línea]. [citado en 05 de abril]. Disponible en internet < http://www.regmurcia.com/servlet/s.SI?sit=c,365,m,108&r=ReP-26748-DETALLE_REPORTAJESABUELO>

⁷ ARENAS: Hugo. Teoría de pavimentos. Conceptos fundamentales. [s.n]. pág. 7

⁸ UNIVERSIDAD DE ALICANTE. Mezclas bituminosas [en línea] [citado en 03 de agosto de 2017]. Disponible en internet < ftp://ceres.udc.es/ITS_Caminos/2_Ciclo/Caminos_y_Aeropuertos/Tema_6/6.7__MEZCLAS_BITUMINOSAS.pdf>.

⁹ Ibid.

¹⁰ INVÍAS. ESPECIFICACIONES GENERALES DE CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS. CAPÍTULO 3. Artículo 300. [en línea]. [citado en 04 de abril de 2017]. Disponible en internet < <https://www.INVÍAS.gov.co/index.php/documentos-tecnicos-izq/139-documento-tecnicos/1988-especificaciones-generales-de-construcción-de-carreteras-y-normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras>

¹¹ ASOGRAVAS. ¿Qué son los agregados?. [en línea]. [citado en 04 de abril de 2017]. Disponible en internet < <http://www.asogravas.org/Inicio/Agregados.aspx>>

parámetro, existen tres categorías, cuyos procesos de formación son bien distintivos: las rocas pueden ser ígneas, sedimentarias o metamórficas.”¹².

Villalobos¹³ también sostiene que, las rocas ígneas se originan a partir de un líquido que se denomina magma el cual está compuesto por roca fundida, gases disueltos y cristales en suspensión.

Las rocas sedimentarias, constituidas por fragmentos de roca previamente existentes, deben su origen al efecto del agua, viento, hielo, entre otros factores, que permitieron transportar y alterar la roca madre.

Las rocas sedimentarias muchas veces pueden albergar fósiles, restos de organismos del pasado que permiten conocer la historia y evolución de la vida y los ambientes de la Tierra.

Cuando una roca de cualquier tipo es sometida a altas presiones y temperaturas se da lugar a las llamadas rocas metamórficas, cambiando sus componentes, pudiéndose generar nuevos minerales o sufriendo un proceso de recristalización

La roca es heterogénea y puede ser simple o compuesta.

Simple: está compuesta por un solo tipo de mineral: monominerálica, los ejemplos más claros son la Caliza (ver ilustración 1) compuesta de calcita, arenisca y cuarcita puras compuesta de cuarzo¹⁴.

Ilustración 1. Caliza, arenisca y cuarcita



MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN. Materiales pétreos naturales

¹² JAVIERA VILLALOBOS ORCHARD. Las rocas y sus procesos de formación [en línea]. [citado en 03 de abril de 2017]. Disponible en internet < <http://www.geologia.uchile.cl/las-rocas-y-sus-procesos-de-formacion>>

¹³ ibid

¹⁴ MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN. Tema 3 MATERIALES PÉTREOS NATURALES. [en línea]. [citado en 25 de abril de 2017]. Disponible en internet < <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Tema3.MaterialesCONSTRUCCION.PETREOSNATURALES.pdf>>

Compuesta: conformada por varios tipos de mineral. Poliminerática, por ejemplo el granito (ver ilustración 2), compuesto de cuarzo, feldespato y mica entre otros. Son materiales naturales que constituyen la corteza de la Tierra. Algunas son relativamente blandas, es decir, débiles y fácilmente deformables. Otras, sin embargo, son duras, fuertes y resistentes.¹⁵

Ilustración 2. Granitos



ELEMENTO PIEDRA. Acabados residenciales. Granito

IDENTIFICACIÓN DE ROCAS: según Griem¹⁶ Generalmente existen tres maneras de investigar un mineral o una roca, los cuales son el reconocimiento macroscópico, microscópico y geoquímico.

El reconocimiento macroscópico permite describir textura, color, dureza, brillo, morfología, exfoliación, tipo de minerales, entre otras características.

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LAS ROCAS: aquí se puede encontrar elementos como:

- Textura: forma, tamaño y modo de conglomeración de los elementos que conforman la roca, la textura puede ser apreciada al microscopio.
- Estructura: Disposición de sus elementos observados a simple vista,
- Fábrica: forma, situación y densidad de su sistema cristalográfico.
- Yacimiento: disposición en la que se encuentra las formaciones de las distintas rocas.¹⁷

¹⁵ MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN. Tema 3 MATERIALES PÉTREOS NATURALES. [en línea]. [citado en 25 de abril de 2017]. Disponible en internet < <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Tema3.MaterialesCONSTRUCCION.PETREOSNATURALES.pdf> >

¹⁶ MUSEO VIRTUAL GEOLOGÍA. Introducción. Métodos del reconocimiento de rocas. [en línea]. [Citado en 03 de abril de 2017]. < <http://www.geovirtual2.cl/geologiageneral/gg.cap03b.htm> >

RESUMEN

Aquí se consigna el desarrollo de la caracterización físico mecánica y mineralógica de un conjunto de muestras tomadas del depósito llamado Acopios en Sopó, con el fin de establecer su pertinencia como material destinado a la construcción de carreteras.

La investigación efectuada busca establecer condiciones de durabilidad, dureza, resistencia y limpieza de los materiales, realizar descripciones mineralógicas de los agregados que permitan establecer una correlación entre la composición y características de los materiales y el comportamiento que pueden manifestar los materiales al ser puestos en uso.

Los materiales analizados corresponden a cuatro muestras de agregados provenientes de Carmen de Carupa y Guateque, los cuales pueden clasificarse como triturado tamaño grava y arena. Dado que ninguno de los materiales puede cumplir a cabalidad los requerimientos esenciales en cuanto a distribución de tamaños para uso en capas granulares de pavimentos, se sugiere la realización de una mezcla de áridos. Bajo la cual pueden cumplirse los requerimientos granulométricos solicitados para la capa sub base.

De esta manera se efectúa el análisis mecánico a los materiales constituyentes de la mezcla y se realiza la caracterización mineralógica por medio de métodos como la observación de sección delgada en microscopio electrónico. Con lo cual es posible determinar componentes deletéreos en los agregados y las posibles implicaciones de estas, como también consecuencias extrapolables que puede manifestar los materiales al propender por su utilidad dentro de otros contextos.

¹⁷ UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID. Procesos sedimentarios y clasificación de rocas sedimentarias. [en línea]. [citado en 04 de abril de 2017]. Disponible en internet. < https://www.ugr.es/~agcasco/msecgeol/secciones/petro/pet_sed.htm>

INTRODUCCIÓN

Debido al mal estado e ineficiencia que presentan las capas que componen la estructura del pavimento, en la ciudad de Bogotá, existe la necesidad de estudiar las propiedades de los agregados que constituyen el mismo, con el fin de lograr una adecuada elección y disposición del material pertinente; con lo cual se busca determinar los factores característicos de este material, bajo condiciones normales, para el casco urbano de Bogotá.

La caracterización físico-mecánica y mineralógica efectuada a cuatro muestras de agregado denominadas "grava de una pulgada de Carmen de Carupa", "grava de tres cuartos de pulgada de Carmen de Carupa", "arena de peña" y "arena de río".

Los ensayos de laboratorio para la caracterización se ejecutan en la universidad Santo Tomás y atienden a procesos conjuntos de los campos de ingeniería civil y geología. Permitiendo correlación la composición mineralógica con el desempeño mecánico que presenta el material y estableciendo un uso adecuado para el pavimento según el material estudiado.

1. ANTECEDENTES NACIONALES E INTERNACIONALES

1.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES

Mendes F¹⁸ presenta un documento investigativo en el que se detalla las características del agregado para la utilización en las estructuras del pavimento, el artículo estima además la producción cuantitativa de agregado que se utilizó en países como Estados Unidos, Francia y Brasil finalizando la década de los 90.

Hace referencia a las propiedades que adquiere el concreto por la utilización de diferentes tipos de agregado, es decir, en un cuadro comparativo resalta las propiedades mecánicas del concreto, tales como la resistencia a la compresión y resistencia al desgaste; en una contraparte describe las propiedades que debe tener el agregado para cada ítem expuesto, resistencia mecánica, textura superficial, limpieza y forma de los agregados entre otras cualidades. De esta manera se puede inferir el comportamiento de los materiales según la naturaleza de sus agregados constituyentes.

El artículo resalta las cualidades mecánicas de los agregados y lo relaciona con la producción por periodos de tiempo en los países mencionados anteriormente, la cantidad monetaria invertida y la evolución de la inversión para los agregados de 1988 al año 2000.

Solminihac H y Echaveguren T¹⁹ en su artículo titulado “antecedentes para la inspección y diseño de especificaciones de textura, resistencia al deslizamiento y fricción en pavimentos” hacen la recopilación y análisis de información para considerar la incorporación de indicadores de fricción en la gestión vial, analizando conceptos de los agregados tales como textura, resistencia al deslizamiento y fricción, resistencia a la abrasión además de los procesos de instalación del material.

¹⁸ MENDES F et al. AGREGADOS PARA CONSTRUCCIÓN CIVIL.[en línea]. [citado en 03 de agosto de 2017]. Disponible en internet < file:///C:/Users/Ingenieria/Downloads/Agregados%20para%20Contru%C3%A7%C3%A3o%20Civil.pdf >

¹⁹ Solminihac Y ECHAVEGUREN antecedentes para la inspección y diseño de especificaciones de textura, resistencia al deslizamiento y fricción en pavimentos.[en línea]. [citado en 03 de agosto de 2017]. Disponible en internet < http://www2.udec.cl/~provial/trabajos_pdf/35HernandeSolminihacResistenciaadeslizamiento.pdf >

El artículo hace énfasis en los mecanismos de control y las tecnologías que se emplean para la modificación de la textura de los pavimentos, encontrando que la textura del pavimento y por tanto la oferta de fricción, se ve modificada al pasar el tiempo por factores climáticos, de tránsito y de superficie, analizando además que las magnitudes de las variaciones ocurren en periodos de tiempo diferentes considerando entre otras cosas la maquinaria utilizada para los procesos constructivos.

1.2. ANTECEDENTES NACIONALES

Rangel C., y Sarmiento M²⁰. Tienen como objetivo principal estudiar el comportamiento del poder rigidizante del filler en las mezclas asfálticas, según la variación de sus características granulométricas y mineralógicas. Evalúan los conceptos de mezcla asfáltica, su composición y los requerimientos que debe cumplir, la noción de llenante mineral también se expresa, señalando su función, sus propiedades a cumplir y los ensayos que determinan la idoneidad del material, luego se establece el papel de la granulometría y mineralogía de la llenante.

El documento clasifica el material en siete grupos que son silicatos, óxidos, carbonatos, sulfatos, sulfuros, fosfatos y materiales de alteración. Para estudiar la incidencia de la granulometría y mineralogía de estos en la rigidez de la capa asfáltica se eligieron tres materiales de análisis: cenizas volantes extraídas de la central termoeléctrica Termopaipa, arena del río Chicamocha extraída en el municipio de Aratoca, Santander y calizas provenientes de la Mesa de los Santos en el departamento de Santander.

Estas muestras se dividieron en tres tamaños, material retenido en tamiz No 325, material retenido en tamiz No 400 y material pasa tamiz No 400. Seguido a esto se determinó la forma de las partículas mediante un estereomicroscopio y se establece la densidad y concentración necesaria del filler para cumplir la especificación. Con lo cual finalmente es evaluado el poder rigidizante de las mezclas.

Los ensayos concluyen que para las calizas y el material fino de arena de río las densidades disminuyen a medida que el tamaño de partícula también disminuye,

²⁰ RANGEL. Leidy y SARMIENTO. Mayra. INFLUENCIA DE LAS CARACTERÍSTICAS GRANULOMÉTRICAS Y MINERALÓGICAS DEL FILLER SOBRE LA RIGIDEZ DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS. UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. [en línea]. [consultado en 17 de enero de 2017]. Disponible en internet <<http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2010/136235.pdf>>

contrario a lo que sucede en las cenizas volantes que su densidad aumenta cuando su tamaño disminuye.

El comportamiento de las cenizas volantes y la arena de río indica que a mayor tamaño de partículas se rigidiza más el mástico, caso contrario sucede en las calizas donde el que más rigidiza es el tamaño pequeño.

Los resultados obtenidos a partir de los ensayos de la caliza muestran que no todos los llenantes minerales se comportan de igual manera al variar el tamaño de sus partículas, las características químicas influyen generando adherencias entre las fracciones de menor tamaño creando flóculos, que modifican el comportamiento del mástico, la forma de las partículas también es incidente en el poder rigidizante, esta variable depende tanto de la mineralogía del material, como de su proceso de extracción.

Enríquez J., y Moncayo C ²¹ estudian los materiales pétreos provenientes de la cantera Agresur para la elaboración de la mezcla asfáltica con el objetivo de determinar el contenido óptimo de asfalto para un tipo de mezcla densa en caliente, de tal manera que se cumplan con las especificaciones exigidas por el INVÍAS.

El asfalto utilizado para el desarrollo del proyecto fue sometido a diversos ensayos, como el ensayo de penetración, viscosidad a 60°C, ductilidad, contenido de agua, punto de ignición y llama en la copa abierta de Cleveland, punto de ablandamiento, entre otros.

Sumados a los anteriores también se encuentran el análisis granulométrico, ensayos de dureza, durabilidad, limpieza, geometría de partículas, gravedad específica, entre otros.

²¹ BRAVO. Javier y MONCAYO. Carlos. CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS PÉTREOS DE LA CANTERA AGRESUR VEREDA SAN JOSÉ MUNICIPIO FUNES, DEPARTAMENTO DE NARIÑO Y OBTENCIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE ASFALTO PARA EL DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA MEDIANTE EL “MÉTODO MARSHALL”. [en línea]. [consultado en 17 de enero de 2017]. Disponible en internet < <http://biblioteca.udenar.edu.co:8085/atenea/biblioteca/89748.pdf>>

En el desarrollo del trabajo se fabricaron treinta y seis briquetas con los porcentajes o combinación de agregados de la fórmula de trabajo, siguiendo las especificaciones para mezclas asfálticas densas en caliente.

Una vez elaboradas estas briquetas se prueban las mismas, en criterios como el cálculo de densidades, la toma de alturas y el cálculo de la estabilidad y el flujo, para por último llevar a cabo el ensayo Marshall, evaluando criterios de estabilidad, flujo, porcentaje de vacíos del agregado mineral, porcentaje de vacíos llenos de asfalto, según granulometrías y porcentajes variables de asfalto y unas propiedades mecánicas constantes para el material granular.

Los resultados obtenidos señalan que en las diferentes composiciones granulométricas, aquellas con mayor contenido de finos otorgan una mayor densidad a la mezcla en el momento de la compactación.

En cuanto a la estabilidad los agregados gruesos se destacan, pues la fricción interna y su uniformidad de tamaño y la rugosidad de sus caras garantizan un aporte importante para el diseño de mezclas asfálticas.

Beltrán G.²² presenta la idea de evaluar los materiales y mezclas asfálticas mediante aplicaciones de técnicas petrográficas y mineralógicas, realizadas a muestras de bloques pulidos y secciones delgadas, estudiados bajo microscopía óptica y electrónica incluyendo forma y análisis de imágenes, como también mediante fluorescencia de rayos X. Con el fin de obtener una caracterización química-mineralógica de los agregados y la caracterización de mezclas asfálticas desde el punto de vista de sus rasgos estructurales identificables.

Los agregados utilizados para las muestras asfálticas proceden de dos fuentes de materiales que producen cuatro tipos de agregados, como son arenas finas y de

²² BELTRÁN. Gloria. Técnicas de microscopía y petrografía para caracterizar materiales de carreteras. Universidad Nacional de Colombia. [en línea]. [consultado en 17 de enero de 2017]. Disponible en internet <http://geoserver.ing.puc.cl/info/conferences/PanAm2011/panam2011/pdfs/GEO11Paper299.pdf> <

trituration de origen ígneo y metamórfico y arenas de trituración y gravas de origen sedimentario.

De cada uno de los agregados se elabora un conjunto de secciones delgadas, de las que a partir de la observación con microscopios ópticos se determinan propiedades como fracturas, tamaño de poro y textura.

La utilización del espectroscopio de fluorescencia de rayos X brinda un análisis semicualitativo de la composición elemental de los materiales. A partir de ello se puede establecer que un agregado se puede clasificar como ígneo de tipo volcánico con composición básica, pequeñas cantidades de roca metamórfica y una menor proporción de roca sedimentaria.

Otro agregado proveniente de distinta fuente, está compuesto por sedimentos en su mayoría, con una menor proporción de contenido metamórfico. Identificando aquí una alta proporción de cuarzo.

Los resultados obtenidos a partir de las técnicas petrográficas y mineralógicas con microscopía óptica, electrónica y fluorescencia de rayos X, realizadas sobre secciones delgadas y bloques pulidos permiten observar y caracterizar de forma directa la estructura interna de las mezclas asfálticas. Ello permite concluir que las cuatro fuentes de agregados utilizados para la elaboración de las mezclas de asfalto en el laboratorio están compuestas por granos de origen sedimentario, ígneo y metamórfico en menor proporción.

En general los agregados presentan formas angulares a subangulares y microfisuras, principalmente en aquellos de tamaños mayores y en los de origen ígneo. En el análisis petrográfico de las mezclas asfálticas se identificaron varios tipos y configuraciones de microfisuras. Estas fisuras pueden estar interconectadas y en cantidad suficiente para fragmentar el material, llegando a desintegrar completamente un grano.

Londoño. M²³ presenta mediante ensayos de laboratorio tales como resistencia a la tracción indirecta, resistencia conservada y módulo resiliente, el comportamiento de la estructura del pavimento, específicamente de la capa asfáltica.

La caracterización de materiales extraídos del río Coello – Tolima y de la fuente aluvial del río Tunjuelito en Cundinamarca, son sometidas a ensayos en estado seco, húmedo y envejecido, con el fin de determinar si el origen del material influye o no en relación al comportamiento de la estructura.

Se busca profundizar en el conocimiento de la influencia del origen y gradación del agregado pétreo sobre el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas, con granulometría del Instituto de Desarrollo Urbano (md12 y md20), el porcentaje óptimo de asfalto de las mezclas asfálticas se determinó mediante metodología Marshall.

La comparación de los materiales obtenidos en el departamento de Tolima y los extraídos en Cundinamarca, arrojan que las mezclas asfálticas de agregado con origen en Tolima, presentan mayor densidad que las muestras del río Tunjuelito.

Al aumentar la densidad, aumenta proporcionalmente la resistencia a la tracción directa (RTI) de las probetas, con muestra del mismo estado, origen o tamaño granular.

Al comparar las probetas en estado seco y húmedo, se concluye que en el primer caso los resultados de ensayos de RTI son más altos que en el segundo caso, debido al efecto que tiene el agua sobre el espécimen.

²³ LONDOÑO. Milena. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FUNCIÓN DE SU ORIGEN Y GRADACIÓN DE AGREGADO PÉTREO. [en línea]. [consultado en 17 de enero de 2017]. Disponible en internet <
<http://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/10654/9351/2/LondonoLeonAngieMilena2012.pdf>>

1.3. JUSTIFICACIÓN

La tecnología y recursos actuales posibilitan establecer un proceso de investigación científica, que basado en la caracterización de materiales pétreos, genera en la ingeniería y arquitectura un campo de acción, determinando propiedades en los agregados y su posible uso en concretos, pavimentos flexibles y/o rígidos y material de recebo, entre otros.

La ejecución de la investigación comprende la recopilación de información del material extraído del acopio ubicado en Sopó, material que proviene de canteras también ubicadas en Sopó, Gachetá, Carmen de Carupa en Cundinamarca y Guateque en el departamento de Boyacá.

Es de mayor importancia identificar el uso idóneo de los agregados naturales como materiales de construcción, en este caso los pavimentos. Determinando sus propiedades mecánicas, físicas, texturales y mineralógicas, que sirvan además como referencia a futuras investigaciones y de guía para el constructor.

En esta investigación se muestran los resultados obtenidos a partir de los ensayos de laboratorio y con esto se determina la viabilidad del material en la construcción de estructuras de pavimento, las conclusiones estarán dirigidas a un reconocimiento del agregado y la incidencia de su composición mineralógica en su desempeño físico mecánico.

Por estas razones se establece el proyecto de grado como una guía, de la cual pueda extraerse una descripción detallada de los materiales existentes en el depósito. Es así como se da origen al trabajo de grado titulado “CARACTERIZACIÓN FÍSICO MECÁNICA Y MINERALÓGICA DE LOS AGREGADOS EXTRAÍDOS DEL DEPÓSITO ACOPIOS EN SOPÓ CUNDINAMARCA PARA SU USO EN PAVIMENTOS”.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar una investigación detallada que permita conocer las propiedades intrínsecas de los agregados, grava y arena extraídas del depósito Acopios, bajo diferentes ensayos de caracterización petrográfica, mineralógica y físico mecánica, identificando así el comportamiento e idoneidad de los materiales en la construcción de la capas del pavimento.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar los ensayos macroscópicos de los agregados extraídos del acopio, para la identificación general de los minerales que constituyen el material tratado, entendiendo las bases fundamentales de la caracterización petrográfica como color, textura, redondeamiento y dureza, entre otros
- Llevar a cabo los ensayos de laboratorio para la resistencia, durabilidad y limpieza de agregados, bajo métodos de estudio que permitan obtener un aprendizaje detallado del comportamiento de los agregados, grava, arena y roca en las estructuras del pavimento
- Aprender nuevas técnicas analíticas utilizadas en la caracterización de materiales, identificando su utilidad en el campo de la Ingeniería Civil.
- Establecer una relación de la caracterización mineralógica, el análisis de difracción de rayos X para muestras de agregados gruesos y agregados finos, con las propiedades de dureza, resistencia y geometría de las partículas y su incidencia en la utilización del material en las vías de la capital y el casco urbano

2. MARCO TEÓRICO

Las propiedades más importantes que deben tener los materiales para la construcción de vías son el tamaño y gradación de las partículas, la resistencia al desgaste, la durabilidad o resistencia al intemperismo, la densidad relativa, la estabilidad química, la forma de las partículas y la presencia de sustancias nocivas. Por esta razón se procede a determinar la idoneidad técnica de los materiales tomados para análisis, mediante la realización de los ensayos, mostrados en la tabla 1²⁴

²⁴ INVÍAS. ESPECIFICACIONES GENERALES DE CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS. CAPÍTULO 3. Artículo 300. [en línea]. [citado en 04 de abril de 2017]. Disponible en internet <<https://www.INVÍAS.gov.co/index.php/documentos-tecnicos-izq/139-documento-tecnicos/1988-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-y-normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras>>

Tabla 1. Ensayos de resistencia y limpieza

Ensayo	Objeto	Fracción material que pasa	Tipo de ensayo
Limite Líquido	determinar el contenido de humedad correspondiente a la frontera entre los estados plástico y líquido del suelo	pasa tamiz No 40 (<0,425mm)	Limpieza
Limite Plástico / Índice de Plasticidad	determinar el contenido de humedad más bajo que puede tener un suelo mientras permanece en estado plástico (LP)	pasa tamiz No 40 (<0,425mm)	Limpieza
Equivalente de arena	Determinar la proporción relativa del contenido de material arcilloso en los agregados	pasa tamiz No 4 agregado fino	Limpieza
Solidez en sulfatos	Determinar la resistencia a la acción de sulfatos	Tamiz No 4 hasta de 1 1/2 "	Durabilidad
DMA (desgaste en la Máquina de los Ángeles)	Evaluar calidad del agregado (resistencia al desgaste)	pasa tamiz desde No 8 hasta 1 1/2"	Dureza
Desgaste en Micro – Deval	Resistencia al desgaste para agregados finos	entre 3/8" y No 4	Dureza
Angularidad	Determinar la angularidad de las arenas	Agregado fino pasa No 4 hasta No 100	Geometría de las partículas

Fuente. INVÍAS. ESPECIFICACIONES GENERALES DE CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS

Los ensayos de caracterización química y mineralógica, realizados para determinar la composición de los diferentes agregados son los siguientes:

- Mineralogía por difracción de rayos x.
- Identificación de minerales condicionantes del comportamiento de agregados en pavimentos por medio del microscopio petrográfico.

Los dos primeros ensayos se realizan en laboratorios externos a la universidad, mientras que la petrografía se hace en la Universidad Santo Tomás. Como actividad generadora de productos de investigación del proyecto “CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA, MECÁNICA Y MINERALÓGICA DE ARENISCAS UTILIZADAS PARA CONSTRUCCIÓN DE LA ZONA FRANCA DE TOCANCIPÁ, EN LA CANTERA RODEB Y ACOPIOS. SECTOR HATO GRANDE SOPÓ”. Aprovechando el equipo que para tal fin tiene la Facultad de Ingeniería Civil.

La interpretación de todos los resultados es realizada por el docente asesor, junto con el equipo de geólogos de la facultad de ingeniería civil de la universidad y el análisis específico para el trabajo de grado se realiza conjuntamente entre los estudiantes auxiliares de investigación y el docente director de proyecto y del trabajo de grado.

2.1. MUESTREO DE AGREGADOS PARA CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS

El material destinado para la construcción de estructuras de pavimento debe cumplir una serie de requisitos técnicos, como tamaño, dureza y limpieza.

Por ello el muestreo o toma del material resulta ser imperativo, tanto o más que los mismos ensayos de laboratorio, por esta razón la persona encargada de tal labor debe tomar todas las precauciones necesarias y garantizar que las muestras indiquen su verdadera naturaleza y las características reales presentes en ellas

Las muestras para los ensayos de investigación preliminar deben ser obtenidas por la parte responsable de la explotación de la fuente. Las muestras de materiales para el control de producción en la fuente o para el control del trabajo en el sitio de utilización deben ser obtenidas por el proveedor, el contratista o cualquier otro responsable por la ejecución de los trabajos. Las muestras destinadas a ensayos cuya finalidad sea la aceptación o el rechazo por parte del comprador, deberán ser tomadas por este o por quien él designe²⁵.

²⁵ INVÍAS. NORMAS Y ESPECIFICACIONES 2012. [en línea]. [citado en 04 de abril de 2017]. Disponible en internet <<https://www.INVÍAS.gov.co/index.php/documentos-tecnicos-izq/139>> documento-tecnicos/1988-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-y-normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras>

2.1.1 CONFIABILIDAD DE LAS MUESTRAS

Toda muestra obtenida y que después deba ser ensayada para determinar sus características, debe ser obtenida de productos terminados, es decir no será sometida a procesos intermediarios que alteren la muestra.

Cuando el material deba someterse a la verificación de pérdidas por abrasión, no se deberá someter a procesos intermedios de trituración o de reducción de tamaño, a menos de que los tamaños de los productos terminados sean tales, que requiera de dicha reducción de tamaño para poderlos ensayar²⁶.

2.1.2 INSPECCIÓN

Toda muestra deberá ser analizada bajo detallada inspección para asegurarse de que sean perceptibles las variaciones del mismo. El proveedor deberá poner a disposición del comprador, todo el equipo necesario para una adecuada inspección y un correcto muestreo²⁷.

2.1.3 PROCEDIMIENTOS DE MUESTREO

Muestreo en flujo de descarga de agregados: la selección de las unidades que se deberán ensayar se hará por métodos al azar. Se deberán obtener por lo menos tres (3) porciones aproximadas iguales, elegidas al azar, de las unidades que se estén muestreando, combinándolas para formar una muestra de campo, cuya masa sea igual o mayor al valor mínimo que se recomienda. Cada porción se deberá tomar directamente de toda la sección transversal de flujo de material que se está descargando. Generalmente en cada planta de producción es necesario tener un recipiente especial para la toma de las muestras, fabricado para su uso específico.

Muestreo en banda transportadora: la selección de unidades que se vayan a ensayar deber hacerse como en muestreo en flujo. La banda transportadora se deberá detener mientras se recogen las porciones del material. Detenida la banda se deberán insertar en el material que se encuentra sobre ella, dos elementos cuya forma se ajuste a la de la

²⁶ ibid

²⁷ INVÍAS. NORMAS Y ESPECIFICACIONES 2012. [en línea]. [citado en 04 de abril de 2017]. Disponible en internet <https://www.INVÍAS.gov.co/index.php/documentos-tecnicos-izg/139_documento-tecnicos/1988-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-y-normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras>

banda, elementos que se colocaran separados entre sí de tal manera, que el material contenido en el espacio entre ellos proporcione una porción que tenga la masa requerida²⁸

2.1.4 NÚMERO Y TAMAÑO DE LAS MUESTRAS DE CAMPO

Depende de las características que se deseen conocer y de las condiciones en las que se va a emplear en obra. Antes de proceder al muestreo, se deben elegir las unidades de las cuales se van a tomar las muestras. El número de muestras de la producción deberá ser el necesario y suficiente para que los resultados de los ensayos que se realicen con ellas sea confiable²⁹, la cantidad de material requerida se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Tamaño de muestras tentativo

TAMAÑO DEL AGREGADO	MASA MÍNIMA DE LA MUESTRA DE CAMPO Kg (lb)	VOLUMEN DE LA MUESTRA DE CAMPO LITROS (GALONES)
Agregado fino		
2.36 mm (No. 8)	10 (22)	8 (2)
4.75 mm (No. 4)	10 (22)	8 (2)
Agregado grueso		
9.5 mm (3/8")	10 (22)	8 (2)
12.5 mm (1/2")	15 (35)	12 (3)
19 mm (3/4")	25 (55)	20 (5)
25 mm (1")	50 (110)	40 (10)
37.5 mm (1 1/2")	75 (165)	60 (15)
50 mm (2")	100 (250)	80 (21)
63 mm (2 1/2")	125 (275)	100 (26)
75 mm (3")	150 (330)	120 (32)
90 mm (3 1/2")	175 (385)	140 (37)

Fuente. INVÍAS. ESPECIFICACIONES GENERALES DE CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS

²⁸ ibid

²⁹ INVÍAS. NORMAS Y ESPECIFICACIONES 2012. [en línea]. [citado en 04 de abril de 2017]. Disponible en internet < <https://www.INVÍAS.gov.co/index.php/documentos-tecnicos-izq/139-documento-tecnicos/1988-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-y-normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras>>

2.2. CARACTERIZACIÓN TECNOLÓGICA

Afortunadamente la tecnología actual posibilita el uso de métodos para la clasificación y obtención de materiales que cumplan con los requerimientos de resistencia, durabilidad, pureza, gradación, entre otras.

Es por ello que es de primera necesidad la aplicación de ensayos que permitan caracterizar adecuadamente el material pétreo a utilizar, para así conocer su idoneidad para el diseño y construcción de estructuras de pavimento.

La caracterización tecnológica permite conocer las características geológicas y petrográficas (como son composición mineralógica, estructura y textura así como sus propiedades físico químicas. Estas cualidades inherentes a los materiales posibilitan un gran número de comportamientos mecánicos, como dureza, ductilidad o resistencia; por ello es importante establecer las reacciones o el desempeño que tendrán los materiales ante ciertos estímulos externos, mediante ensayos mecánicos que permitan identificar y señalar un adecuado uso en el pavimento según sea la naturaleza del agregado.

2.2.1 CARACTERIZACIÓN TECNOLÓGICA DE MATERIALES

Corresponde a la aplicación de diversas técnicas normalizadas, con el objetivo de conocer las características de los materiales rocosos para ser utilizados en la construcción u otros usos.

- **ANÁLISIS PETROGRÁFICO MINERALÓGICO**

Este análisis busca conocer las características petrográficas y mineralógicas de arenas y gravas, determinando así minerales esenciales, secundarios y sus cantidades, la textura forma o arreglo de los minerales, su estado de alteración, cómo fueron alteradas y qué tipo de alteraciones presentan. Permite conocer su estructura, refiriéndose a su arreglo macroscópico, el grado y tipo de microfisuración sea intergranular, intracristalina o grietas abiertas, como también posibilita notar la presencia de minerales que pueden interactuar con los factores climáticos o sustancias presentes en el ambiente donde se aplicará la roca y que puedan generar fenómenos adversos a los esperados

El análisis petrográfico puede ser ejecutado por vía directa, con base en las observaciones macroscópicas a simple vista o por las observaciones realizadas en secciones de roca, conocidas como láminas petrográficas o también puede ser completado por vía indirecta, mediante el análisis de difracción de rayos x y química térmica diferencial, para aquellos minerales cuyas características no permiten que sean identificados a través de pruebas selectivas ópticas. En cuyo caso algunos colorantes minerales complementan el método cuando el análisis petrográfico cuantitativo es necesario.³⁰

- **INFLUENCIA DE LA PETROLOGÍA EN EL COMPORTAMIENTO DE LOS PAVIMENTOS**

La estabilidad y durabilidad de los pavimentos se deben a la funcionalidad de factores profundamente relacionados, algunos íntimamente ligados a las características petrográficas, otros a las condiciones normales del terreno.

Los factores más relevantes son:

- Condiciones normales del comportamiento de la sub-rasante.
- Las fuentes de drenaje en el sitio de fundación y en las diferentes estructuras del pavimento.
- Características de resistencia y deformabilidad de los agregados incorporados en las capas estructurales.
- Las características de adhesividad del agregado pétreo que se liga con el asfalto en la carpeta asfáltica.
- El uso idóneo de los materiales que estructuran las diferentes carpetas del suelo y pavimento.
- La durabilidad de los agregados escogidos.
- La erradicación o restricción de agregados pétreos que tienen dentro de su composición mineralógica aditivos reactivos. :

³⁰ BORGES. Ely Frazao. ASSOCIACAO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL Tecnologia de rochas na contrucao civil. [Sao Paulo],[s.n]. 2002. p 40

- **RESISTENCIA**

Los agregados pétreos comprenden entre el 80 % y el 90% de los materiales usados en la consolidación de la estructura del pavimento, los cuales deben atender a parámetros de comportamiento físico mecánico, como se pueden apreciar en la tabla 3

Tabla 3. Solicitaciones de comportamiento. Resistencia

AGREGADOS PÉTREOS: CORRELACIÓN DE LAS SOLICITACIONES DE CALIDAD CON LA LITOLÓGÍA Y LOS ENSAYOS ÍNDICE		
SOLICITACIONES DE COMPORTAMIENTO	PETROLOGÍA	ENSAYOS ÍNDICE
Resistencia y deformabilidad de los agregados	Textura (fábrica) grado de meteorización rasgos de esfuerzos	Desgaste (DMA)
Durabilidad de los agregados	Mineralogía Clima	Solidez en sulfatos
Reactividad mineral	Mineralogía Clima	Análisis petrológico
Adherencia pétreo-asfalto	Contenido de cuarzo textura superficial	Adherencia (f/b) análisis petrográfico
Drenaje	Mineralogía Clima	Gradación

Fuente. MONTERO. Olarte. ASPECTOS PETROLÓGICOS DE LOS AGREGADOS PÉTREOS EN COLOMBIA

Los agregados y en su conjunto las capas constitutivas del pavimento deben soportar y transmitir en forma adecuada las cargas estáticas y dinámicas impuestas por el tráfico, para lo cual deben cumplir ciertos requisitos de resistencia, deformabilidad, tenacidad y abrasión.

Las rocas con fábrica cristalina masiva, sean ígneas, sedimentarias o metamórficas, como diabasa, cuarcita o caliza, son las más resistentes y menos deformables de todas y en su condición de roca fresca y sana, cumplen satisfactoriamente las solicitaciones de calidad citadas. Solo un 30% de las rocas metamórficas foliadas (filitas y esquistos por ejemplo) y el 10% al 15% de las sedimentarias clásticas (areniscas bien cementadas, limolitas silíceas,) satisfacen esta calidad.³¹.

Es conveniente además que los agregados pétreos posean ciertas características de forma, angularidad y rugosidad, y que dentro de la capa donde se usen, cumplan además requisitos especiales de gradación. En la Tabla 4 se complementan los factores y correlaciones contenidas en la Tabla 3, respecto de estos últimos aspectos, los cuales influyen en parte, en que los agregados se puedan acomodar en la forma más compacta posible durante la construcción y en parte, en que se optimice la resistencia del conjunto.

Tabla 4. Especificaciones de interés

PETROLOGÍA DE PAVIMENTOS: CARACTERÍSTICAS DE LAS PARTÍCULAS			
CARACTERÍSTICAS DE INTERÉS		PETROLOGÍA	ENSAYOS
Forma	Elongación - angularidad	Textura y fabrica	Índices alargamiento y aplanamiento
Textura superficial	Rugosidad	Textura y desgaste natural	Descripción física
Gradación	Tamaño y distribución de tamaños	Litología - proceso de trituración y métodos constructivos	Descripción física y especificaciones

Fuente. MONTERO. Olarte. ASPECTOS PETROLÓGICOS DE LOS AGREGADOS PÉTREOS EN COLOMBIA

³¹ MONTERO. Olarte. ASPECTOS PETROLÓGICOS DE LOS AGREGADOS PÉTREOS EN COLOMBIA. Cap 9. [en línea]. {citado en 04 abril de 2017}. Disponible en internet <ftp://ftp.unicauca.edu.co/cuentas/harenas/docs/MATERIALES%20I/DOCUMENTOS%20DE%20CONSU LTA/ASPECTOS%20PETROL-GICOS%20P-TREOS%20PAVIMENTOS.pdf>

- **CANTIDAD DE MATERIA ORGÁNICA**

Puede encontrarse materia orgánica proveniente de la descomposición vegetal, como humus o lodo orgánico especialmente en la arena natural.

La materia orgánica influye retardando el proceso de fraguado en el caso del concreto, provocando una disminución de la resistencia inicial y en ocasiones también una disminución de la resistencia final del mismo.³²

La acción de los ácidos húmicos se da por la combinación con el hidróxido de calcio del cemento, perdiendo humedad y reduciéndose el pH, lo que dificulta la humedad óptima del concreto. Por otro lado esto no constituye un problema en las gravas pues fácilmente se retiran los restos orgánicos con aire o con lavado.³³

- **FORMA DE LOS FRAGMENTOS**

La forma de los fragmentos es una propiedad importante en los agregados. Los agregados con un mayor grado de cubicidad presentan resistencias más elevadas, permiten una mayor trabajabilidad del concreto, ofrecen un menor índice de vacíos, dentro de otras ventajas.³⁴

Un agregado grueso con muchos ángulos, presentará un mayor número de vacíos, lo cual exige una mayor cantidad de arena para dar lugar a un hormigón trabajable. Sin embargo, tendrá una mayor trabazón. Inversamente, el agregado grueso bien redondeado que tiende hacia las partículas esféricas requerirá menos arena y tendrá mayor trabajabilidad, pero tendrá una menor trabazón.

Las formas delgadas y alargadas dan lugar a capas de pavimento de peor calidad. Disminuyen la trabajabilidad de la misma, lo que también puede incidir en una disminución de la resistencia. Además las formas planas tienden a orientarse en un

³² BORGES. Ely Frazao. ASSOCIACAO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL Tecnologia de rochas na contrucao civil. [Sao Paulo].[s.n]. 2002. p 34

³³ Ibid p 34

³⁴ ibid. p 44

plano horizontal, acumulando agua y aire debajo de ellas, lo que repercute desfavorablemente en la durabilidad del material.³⁵

Los agregados triturados resultan en hormigones con alta resistencia a la flexotracción, por lo que son preferidos para pavimentos en carreteras

El método más usual para determinar la forma de los fragmentos consiste en la medición efectuada a partir de líneas imaginarias que definen sus dimensiones de alto, ancho y largo. La relación entre el alto y el ancho establece un valor de esbeltez, de igual manera cuando se relaciona el ancho con el grosor, se define un grado de anchura, cuando se establecen relaciones entre las tres dimensiones pueden definirse las siguientes cuatro categorías³⁶ (ver tabla 5).

Tabla 5. Dimensionamiento de partículas

relación entre las dimensiones		Clasificación de forma
R/A	C/B	
>0.5	>0.5	Cúbica
<0.5	>0.5	Elongada
>0.5	<0.5	Laminar
<0.5	<0.5	Elongada-laminar

Fuente. BORGES. Ely Frazao. ASSOCIACAO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL Tecnologia de rochas na contrucao civil

Los resultados pueden ser expresados por el promedio de las formas, por una frecuencia de distribución o por un número que indique el grado de esfericidad, las medidas pueden ser realizadas por vía directa o indirecta.

³⁵ UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN SIMÓN. Facultad de ciencias y tecnologías. [en línea]. [consultado en 02 de febrero de 2017. <Disponible en internet <http://civilgeeks.com/2012/06/28/descargar-libro-completo-de-pavimentos/>>

³⁶ BORGES. Ely Frazao. ASSOCIACAO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL Tecnologia de rochas na contrucao civil. [Sao Paulo],[s.n]. 2002. p 45

- **DESGASTE A LA ABRASIÓN**

Las rocas usadas en construcción están sujetas al desgaste ya sea en un proceso de producción de concreto, la elaboración de una superficie acabada, la disposición en un pavimento o el suelo de fundación de algunas estructuras. Una roca será más vulnerable al desgaste en cuanto menor sea su dureza, la cual es el resultado de la dureza de los minerales constituyentes de la roca y del grado de consistencia de la misma, propiedad que se define como la capacidad de la roca para oponerse a la penetración de un cuerpo extraño de mayor dureza³⁷.

La determinación de forma directa de la dureza de una roca resulta ser un proceso complejo, donde los resultados pueden no reflejar la realidad del comportamiento de la roca ante el desgaste. Esto ocurre debido a que los propios minerales constituyentes de la roca presentan grados variables de dureza, además está influenciada por el clivaje, por la dirección del eje cristalográfico, como también por la estructura y textura de la roca y por la dirección de las sollicitaciones de desgaste con respecto a estas características³⁸.

2.3. DIFRACCIÓN DE RAYOS X.

La difracción de rayos x está basada en las interferencias ópticas que se producen cuando una radiación monocromática atraviesa una rendija de espesor comparable a la longitud de onda de la radiación. Los rayos x tienen longitudes de onda de angstroms, del mismo orden que las distancias interatómicas de los componentes de las redes cristalinas, al ser irradiados sobre la muestra a analizar, los rayos x se difractan con ángulos que dependen de las distancias interatómicas. El método analítico del polvo al azar consiste en irradiar con rayos x sobre una muestra formada por multitud de cristales colocados al azar en todas las direcciones posibles.³⁹

Es un método de análisis instrumental que permite la identificación cuantitativa y cualitativa de la composición mineralógica. Para determinar la identidad de una especie mineral, la difracción de rayos x muchas veces se muestra superior a otros métodos, debido a la rapidez, irreductibilidad y su carácter no destructivo. Sin embargo, para la

³⁷ Ibid. p 56

³⁸ BORGES. Ely Frazao. ASSOCIACAO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL Tecnologia de rochas na contrucao civil. [Sao Paulo].[s.n]. 2002. p 56

³⁹ UNIVERSIDAD DE ALICANTE. Servicios técnicos de investigación. [en línea].[Citado el 03 de agosto de 2017]. Disponible en internet < <https://sstti.ua.es/es/instrumentacion-cientifica/unidad-de-rayos-x/difraccion-de-rayos-x.html>>

interpretación correcta de los datos arrojados por el ensayo, es necesario disponer de una colección de datos de referencia.

En síntesis se trata de un método comparativo, por lo cual encontrándose un mineral en una mezcla de otros, aumenta la dificultad para la identificación, tanto por posibles coincidencias entre las interferencias de diferentes materiales, como por la ambigüedad de formar los conjuntos de espaciados e intensidades que correspondan a cada uno de los minerales presentes.

Por estos motivos es recomendable buscar la separación del conjunto de minerales⁴⁰.

Esta técnica permite la identificación mineralógica de los agregados, ayudando así a evidenciar posibles componentes patógenos dependiendo del uso que se le dará a los áridos.

2.4. FLUORESCENCIA DE RAYOS X

Consiste en analizar la radiación x característica generada por una muestra al ser esta irradiada con rayos x. Con esta técnica es posible obtener un análisis químico de manera rápida y no destructiva⁴¹.

El fundamento de la FRX consiste en una técnica micro- analítica, puesto que permite analizar solo pequeñas cantidades de muestra, del orden de 0.1 a 100 microgramos, dispuestas previamente en un reflector. La muestra se deposita en forma de capa delgada con un grosor comprendido entre 0.1 y 10 μm de grosor dependiendo del tipo de matriz analizada.⁴²

La FRX tiene como finalidad principal el análisis químico elemental, tanto cualitativo como cuantitativo, de los elementos comprendidos entre el flúor y el uranio de muestras sólidas (filtros, metales, rocas, muestras en polvo, tejidos, etc.) y líquidas porque

⁴⁰ WOLF. Dieter. LA DIFRACTOMETRÍA DE RAYOS X Y SU APLICACIÓN EN LA GEOLOGÍA Y EL ESTUDIO DE MATERIAS PRIMAS. [en línea].[citado en 04 de abril de 2017]. Disponible en internet <http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/ing_geologo/n17_1980/a01.pdf>

⁴¹ DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA UNIVERSIDAD DE CHILE. Laboratorio de espectrometría de fluorescencia de rayos x. [En línea]. [citado en 04 de abril de 2017]. Disponible en internet <<http://www.geologia.uchile.cl/laboratorio-de-espectrometria-de-fluorescencia-de-rayos-x-edx-xrf>>

⁴² FERNÁNDEZ RAMÓN. FLUORESCENCIA DE RAYOS X POR REFLEXIÓN TOTAL [En línea]. [citado en 05 de julio de 2017]. Disponible en internet <<http://analesde-cp22.webjoomla.es/index.php/AnalesQuimica/article/viewFile/319/312>>

permite hacerlos sin preparación de la muestra. El único requisito es que ésta tenga un tamaño inferior al del portamuestras⁴³.

2.5. REACTIVIDAD ÁLCALI AGREGADO

“Constituye uno de los más serios problemas constructivos en el concreto, pues contribuye a la destrucción de su masa. El fenómeno que se produce es una reacción de la sílice reactiva, presente en algunos agregados, con los álcalis del cemento (hidróxido de sodio, hidróxido de potasio). Generándose un gel expansivo que termina por agrietar y finalmente destruir la masa de concreto.”⁴⁴.

“Se manifiesta en su forma externa como una red de agrietamientos o fisuras cerradas en forma de “piel de cocodrilo”, en ocasiones con exudación de gel producto de la reacción, juntas cerradas, o la simple dislocación de las estructuras hechas de concreto.”⁴⁵

La Reactividad Álcali Agregado se divide en Reactividad Álcali Sílice y Reactividad Álcali Carbonato. Dependiendo de los componentes químicos de los agregados; se obtiene un comportamiento físico-químico con el cemento, de ahí que sea importante previamente caracterizar las fuentes de los materiales pétreos y definir la posible reacción a la hora de construir cualquier estructura.⁴⁶.

Este fenómeno tiene lugar cuando alguna de las partículas de los agregados (arena como agregado fino y grava como agregado grueso), está compuesta con un alto

⁴³ UNIVERSIDAD DE ALICANTE. ESPECTROSCOPIA DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X. [en línea]. [citado en 04 de abril de 2017]. Disponible en internet <<https://ssti.ua.es/es/instrumentacion-cientifica/unidad-de-rayos-x/espectroscopia-de-fluorescencia-de-rayos-x.html>>

⁴⁴ MELO JIMÉNEZ. Leydi Johanna. REACTIVIDAD ÁLCALI-AGREGADO (RAA) EXPERIENCIAS EN PRESAS COLOMBIANAS, ANÁLISIS COMPARATIVO DE PRINCIPALES VARIABLES QUE INTERVIENEN EN EL FENÓMENO. [En línea]. [citado en 19 de abril de 2017]. Disponible en internet <<http://www.bdigital.unal.edu.co/47230/1/leidyjohannamelojimenez.2014>>

⁴⁵ *ibid*

⁴⁶ MELO JIMÉNEZ. Leydi Johanna. REACTIVIDAD ÁLCALI-AGREGADO (RAA) EXPERIENCIAS EN PRESAS COLOMBIANAS, ANÁLISIS COMPARATIVO DE PRINCIPALES VARIABLES QUE INTERVIENEN EN EL FENÓMENO. [En línea]. [citado en 19 de abril de 2017]. Disponible en internet <<http://www.bdigital.unal.edu.co/47230/1/leidyjohannamelojimenez.2014>>

contenido de sílice (susceptible a reaccionar con los álcalis del cemento), las cuales reaccionan activamente ante los hidróxidos de álcalis del cemento.⁴⁷.

Las reacciones álcali- sílice son una de las causas químicas de la degradación de los hormigones de áridos pétreos que compromete su durabilidad, de igual forma, cuando se utilizan áridos reciclados se producen alteraciones en sus propiedades y diferencias en los resultados de los ensayos de evaluación del hormigón.⁴⁸.

⁴⁷ MELO JIMÉNEZ. Leydi Johanna. REACTIVIDAD ÁLCALI-AGREGADO (RAA) EXPERIENCIAS EN PRESAS COLOMBIANAS, ANÁLISIS COMPARATIVO DE PRINCIPALES VARIABLES QUE INTERVIENEN EN EL FENÓMENO. [En línea]. [citado en 19 de abril de 2017]. Disponible en internet < <http://www.bdigital.unal.edu.co/47230/1/leidyjohannamelojimenez.2014>>

⁴⁸ BARRETO. Miguel. Métodos de evaluación de las reacciones álcali-sílice en hormigones con áridos reciclados. [En línea]. [citado en 19 de abril de 2017]. Disponible en internet < http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-50732009000200002&script=sci_arttext&tlng=pt>

3. LOCALIZACIÓN

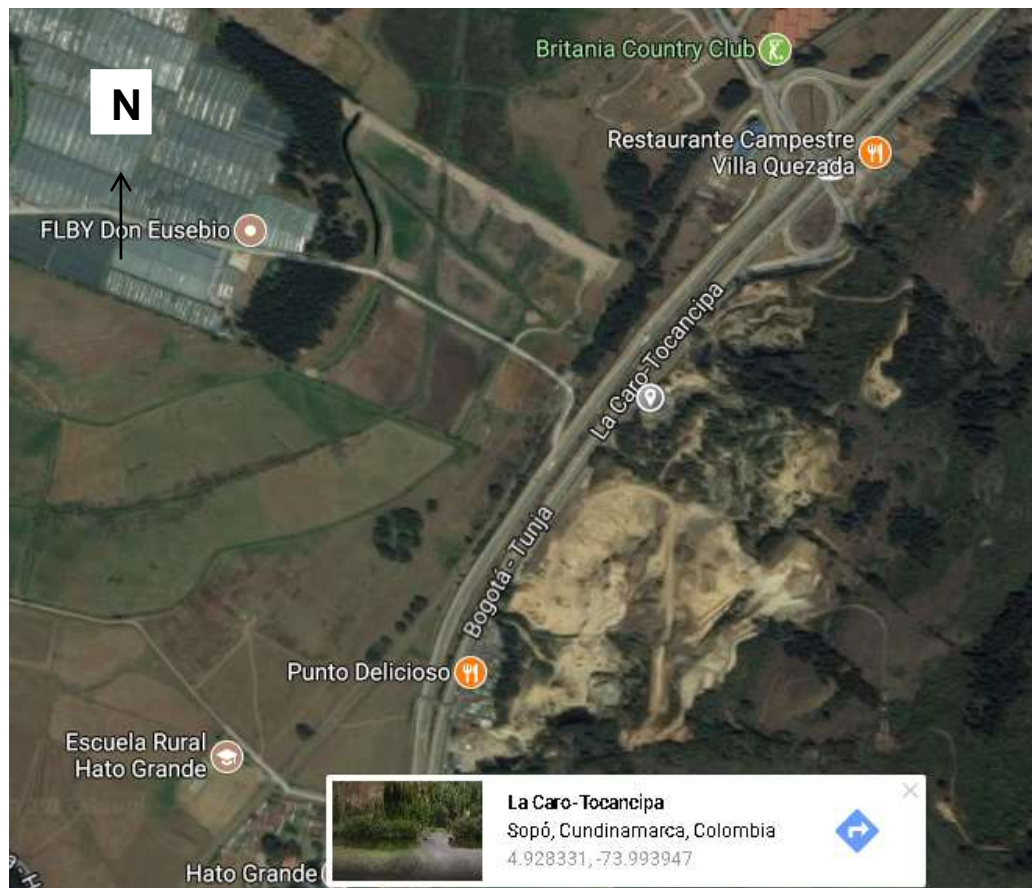
Las muestras estudiadas denominadas como “triturado de tres cuartos de pulgada de Carmen de Carupa” y “triturado de una pulgada de Carmen de Carupa”, “arena de peña” y “arena de río” son extraídas del acopio ubicado en Sopó.

Los agregados gruesos tienen su fuente de extracción en Carmen de Carupa.

Mientras que el agregado fino proviene del municipio de Guateque, Boyacá.

El lugar donde reposan los agregados puede ubicarse en la siguiente ilustración.

Ilustración 3. Ubicación del acopio



Fuente. Google maps

4. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS

El pavimento es considerado como una estructura conformada por varias capas de materiales seleccionados, dispuestas de tal forma que permitan el tránsito de vehículos de una manera rápida, cómoda, segura, económica y eficiente⁴⁹.

Entre los materiales que se utilizan en la construcción de las diversas estructuras de pavimento se encuentran los suelos granulares, los agregados naturales, cantos rodados o producto de la trituración parcial o total, agregados artificiales y un conjunto de mezcla de suelo, agregado y material bituminoso, entre otros ⁵⁰.

Las rocas constituyen el material hasta el momento más utilizado y necesario para la construcción de la infraestructura vial, su uso se encuentra implícito desde la capa inferior hasta la capa de rodadura en una estructura de pavimento. Como lo señala Alfonso Montejo “la calidad de los materiales que conforman una obra vial, es determinante para la selección de la estructura del pavimento más adecuada técnica y económicamente”⁵¹.

El material granular tiene como objetivo disminuir las deformaciones en una estructura vial, transmitir los esfuerzos ocasionados por los vehículos hacia la subrasante, disminuir los costos de construcción, actuar como dren, desalojando el agua que se encuentre en el pavimento y evitar la ascensión capilar y proporcionar una plataforma adecuada para los demás elementos que trabajando en conjunto van a permitir el tránsito.⁵²

Para el eficaz cumplimiento de estas condiciones la resistencia del agregado es un factor fundamental, por lo cual es imperante realizar ensayos de laboratorio que permitan determinar el comportamiento mecánico del material

El Instituto Nacional de Vías de Colombia establece los requerimientos técnicos que deben cumplir los agregados destinados a la construcción de vías en el territorio

⁴⁹. Hugo León Arenas. Teoría de Pavimentos. Universidad Nacional. 2006. p 7

⁵⁰ Ibid., p,17

⁵¹ Alfonso Montejo Fonseca. Ingeniería de Pavimentos para Carretera. Tomo 1. 2 ed. Bogotá. Universidad Católica de Colombia Ediciones y Publicaciones. 2002. p 379

⁵² León Arenas. Op,cit., p 12

nacional, en su normatividad entre otros parámetros, se establecen distribuciones granulométricas a cumplir, medidas de resistencia y de limpieza, según la capa de pavimento a tratar.

Por ello se procede a efectuar los ensayos establecidos por la norma, que permitan la identificación del material

4.1. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LOS MATERIALES

- **Objetivo** Mediante un proceso de tamizado establecer la distribución cuantitativa según el tamaño de partícula de agregados gruesos y finos.
- **Importancia** A parte de ser un requisito a cumplir, de acuerdo a las especificaciones establecidas del agregado según sea su uso, los datos aquí obtenidos son útiles para el control de la producción de mezclas y agregados fabricados.

Las especificaciones requieren una gradación específica según el tamaño máximo nominal del agregado y el uso final del mismo.

Los siguientes requisitos constituyen la norma a cumplir.

Para el material de afirmado se tiene (ver tabla 6)

Tabla 6. Franjas granulométricas para el material de afirmado

TIPO DE GRADACIÓN	TAMIZ							
	37,5	25,0	19,0	9,5	4,75	2,00	0,425	0,075
	1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	No 4	No 10	No 40	No 200
% PASA								
A - 38	100	-	80-100	60-85	40-65	30-50	13-30	9-18
A-25	-	100	90-100	65-0	45-70	35-55	15-35	10-20
Tolerancias en producción sobre fórmula de trabajo	0%	7%			6%			3%

Fuente. INVÍAS. NORMAS Y ESPECIFICACIONES INV 213-13

Tratándose del material dispuesto para la capa de subbase se tiene (ver tabla 7)

Tabla 7. Franjas granulométricas para el material de subbase

TIPO DE GRADACIÓN	TAMIZ (mm/U.S Standard)								
	50,0	37,5	25	12,5	9,5	4,75	2,00	0,425	0,075
	2"	1 1/2"	1"	1/2"	3/8"	No 4	No 10	No 40	No 200
SBG-50	100	70-95	60-90	45-75	40.70	25-55	15-20	6-25	2-15
SBG-38	-	100	75-95	55-85	45-75	30-60	20-45	8-30	2-15
tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo	0%	7%			6%			3%	

Fuente. INVÍAS. NORMAS Y ESPECIFICACIONES INV 213-13

Por último para la capa de base de pavimento se encuentra (ver tabla 8)

Tabla 8. Franjas granulométricas para el material de base

TIPO DE GRADACIÓN	TAMIZ (mm/U.S Estándar)							
	37.5	25.0	1.0	9.5	4.75	2.00	0.425	0.075
	1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	No 4	No 10	No 40	No 200
% PASA								
BASES GRANULARES DE GRADACIÓN GRUESA								
BG-40	100	75-100	65-90	45-68	30-50	15-32	7-20	0-9
BG-27	-	100	75-100	52-78	35-59	20-40	8-22	0-9
BASES GRANULARES DE GRADACIÓN FINA								
BG-38	100	70-100	60-90	45-75	30-60	20-45	10-30	5-15
BG.25	-	100	70-100	50-80	35-65	20-45	10-30	5-15
Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo (\pm)	0%	7%			6%			3%

Fuente. INVÍAS. NORMAS Y ESPECIFICACIONES INV 213-13

- **Procedimiento.** Para la realización de este ensayo se dispuso de una cantidad suficiente de material, determinada por el tamaño máximo nominal, como lo dispone la reglamentación del INVÍAS y se aprecia en la siguiente tabla (ver tabla 9)

Tabla 9. Masa mínima para muestra de ensayo

TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL TAMICES CON ABERTURAS CUADRADAS mm (pg)	MASA MÍNIMA DE LA MUESTRA DE ENSAYO Kg(lb)
9.5 (3/8)	1 (2)
12,5 (1/2)	2 (4)
19,0 (3/4)	5 (11)
25.0 (1)	10 (22)
37.5(11/2)	15 (33)
50.0 (2)	20 (44)
63.0(2 1/2)	35 (77)
75.0 (3)	60 (130)
90.0 (3 1/2)	100 (220)
100.0 (4)	150 (330)
125.0 (5)	300 (660)

Fuente. INVÍAS. NORMAS Y ESPECIFICACIONES INV 213-13

Una vez el material es secado al horno y los grumos disgregados, se efectúa el análisis por tamizado, el cual consiste en sacudir la muestra de suelo a través de un conjunto de mallas con aberturas progresivamente más pequeñas. Después del proceso de cribado se determina la masa del suelo retenida en cada malla. Los resultados del tamizaje se expresan como porcentaje del peso total que ha pasado por las diferentes mallas

Al efectuar la determinación del tamaño máximo nominal, definido según INVÍAS como “Menor abertura de tamiz a través de la cual se permite que pase la totalidad del agregado”⁵³. Se determina que el triturado proveniente de Carmen de Carupa presenta tamaños máximo nominal de una pulgada y tres cuartos de pulgada.

⁵³ INVÍAS. ESPECIFICACIONES GENERALES DE CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS. Sección 200. INV E 201-13. pag 5 [en línea]. [citado en 04 de abril de 2017]. Disponible en internet < <https://www.INVÍAS.gov.co/index.php/documentos-tecnicos-izq/139-documento-tecnicos/1988>>

Para evaluar los materiales bajo las especificaciones para subbase se toman las siguientes cantidades de material

- 5000 g de triturado de una pulgada
 - 5000 g de triturado de tres cuartos de pulgada
 - 1997.5g de arena de peña
 - 1000 g de arena de río
- **Resultados** Siguiendo la especificación exigida para material de subbase la cual se muestran en la tabla 7, anteriormente mostrada.

Y al efectuar el análisis por cribado bajo este juego de tamices se obtienen los siguientes resultados (ver tablas 10, 11, 12 y 13)

Tabla 10. Triturado de pulgada, según especificaciones para subbase

GRANULOMETRÍA TRITURADO DE PULGADA SEGÚN ESPECIFICACIÓN PARA SUBBASE				
Tamiz	abertura (cm)	porcentaje que pasa	masa retenida (g)	porcentaje retenido
1" ½	37,5	100,0%	0,00	0,0%
1"	25	100,0%	0,00	0,0%
1/2"	12,5	81,7%	915,08	18,3%
3/8"	9,5	34,2%	2373,2	47,5%
No 4	4,75	2,3%	1597,40	31,9%
No 10	2	1,3%	47,4	0,9%
No 40	0,425	1,1%	12,3	0,2%
No 200	0,075	0,1%	48,2	1,0%
Fondo		0%	15,80	0,3%

Fuente. Autor

Tabla 11. Triturado de tres cuartos, según especificación para subbase

GRANULOMETRÍA TRITURADO DE TRES CUARTOS SEGÚN ESPECIFICACIONES PARA SUBBASE				
tamiz	abertura (cm)	porcentaje que pasa	masa retenida (g)	porcentaje retenido
1" 1/2	37,5	100,0%	0,00	0,0%
1"	25	100,0%	0,00	0,0%
1/2"	12,5	77,5%	1125,02	22,5%
3/8"	9,5	31,6%	2294,64	45,9%
No 4	4,75	1,5%	1507,80	30,2%
No 10	2	0,6%	42,42	0,8%
No 40	0,425	0,4%	10,18	0,2%
No 200	0,075	0,4%	0,34	0,0%
fondo		-	0,00	0,0%

Fuente. Propia

Tabla 12. Arena de peña según especificación para subbase

GRANULOMETRÍA ARENA DE PEÑA SEGÚN ESPECIFICACIONES PARA SUBBASE				
tamiz	abertura (cm)	porcentaje que pasa	masa retenida (g)	porcentaje retenido
1" 1/2	37,5	100,0%	0,00	0,0%
1"	25	100,0%	0,00	0,0%
1/2"	12,5	100,0%	0	0,0%
3/8"	9,5	100,0%	0	0,0%
No 4	4,75	98,2%	36,49	1,8%
No 10	2,00	91,3%	137,08	6,9%
No 40	0,425	69,8%	429,38	21,5%
No 200	0,075	3,1%	1332,67	66,7%
fondo		0,0%	61,63	3,1%

Fuente. Propia

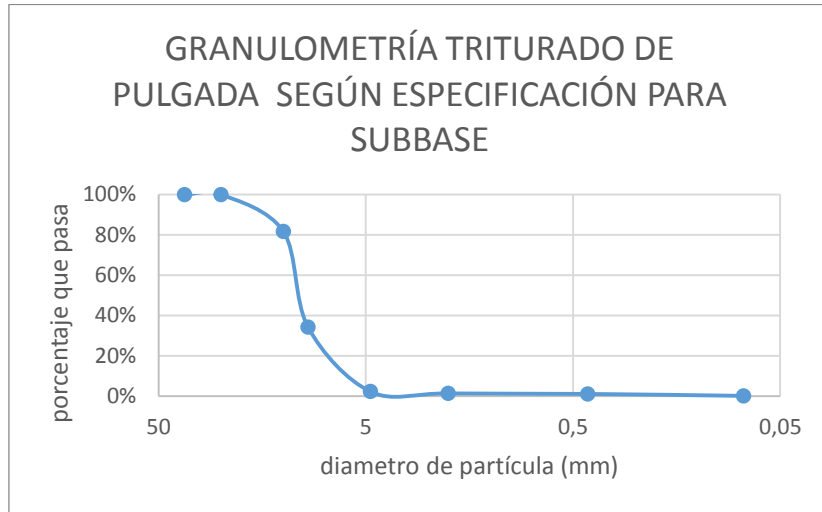
Tabla 13. Arena de río para subbase

GRANULOMETRÍA ARENA DE RIO SEGÚN ESPECIFICACIONES PARA SUBBASE				
tamiz	abertura (cm)	porcentaje que pasa	masa retenida (g)	porcentaje retenido
1" 1/2	37,5	100,0%	0,00	0,0%
1"	25	100,0%	0,00	0,0%
1/2"	12,5	100,0%	0	0,0%
3/8"	9,5	100,0%	0	0,0%
No 4	4,75	96,5%	35,15	3,5%
No 10	2,00	79,3%	172,16	17,2%
No 40	0,425	37,4%	419,15	41,9%
No 200	0,075	0,3%	371	37,1%
fondo		0,1%	1,63	0,2%

Fuente. Propia

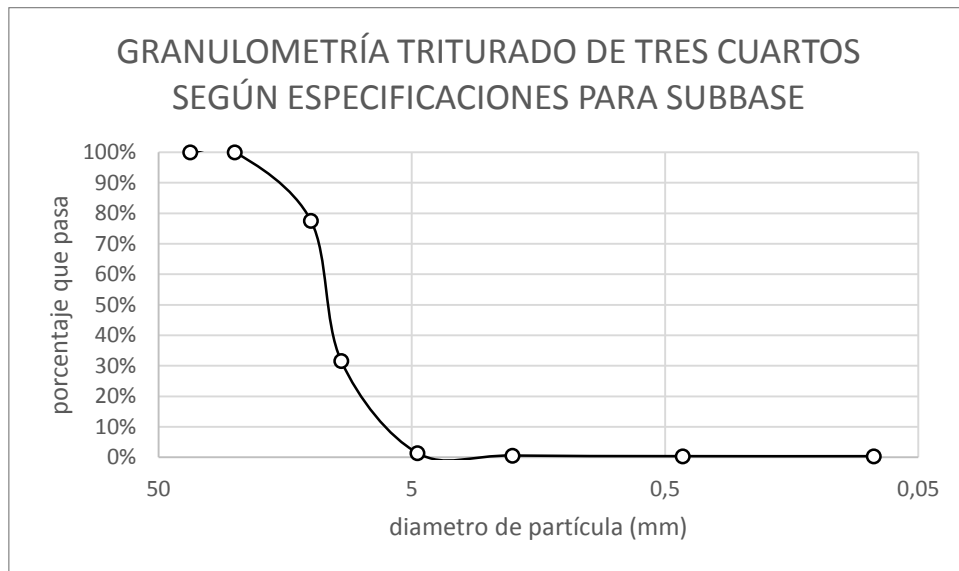
A partir de esta información se obtuvieron las siguientes curvas granulométricas, que se muestran a continuación (ver ilustraciones 3, 4, 5 y 6)

Ilustración 4 Distribución granulométrica Triturado de una pulgada según especificaciones para subbase



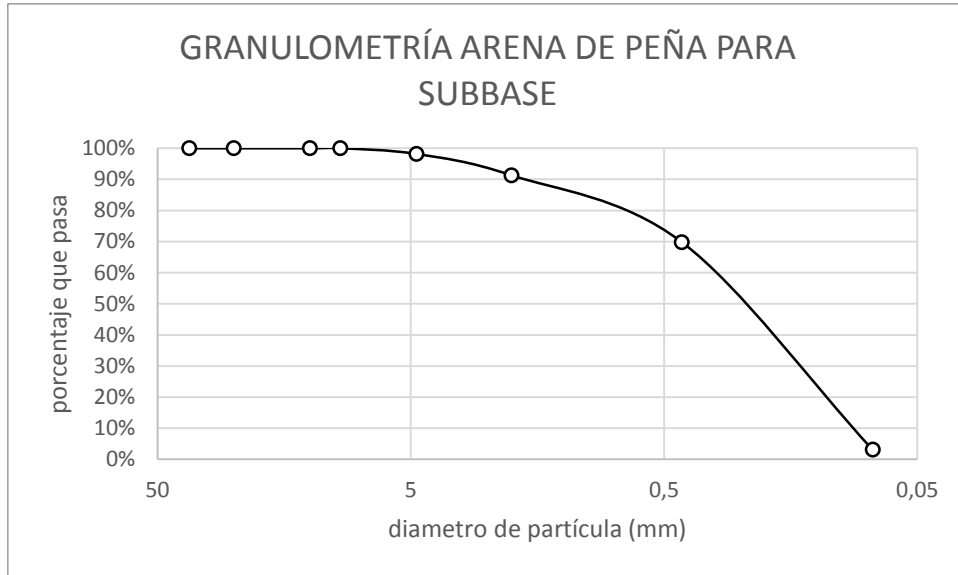
Fuente. Propia

Ilustración 5. Distribución granulométrica Triturado de tres cuartos de pulgada según especificaciones para subbase



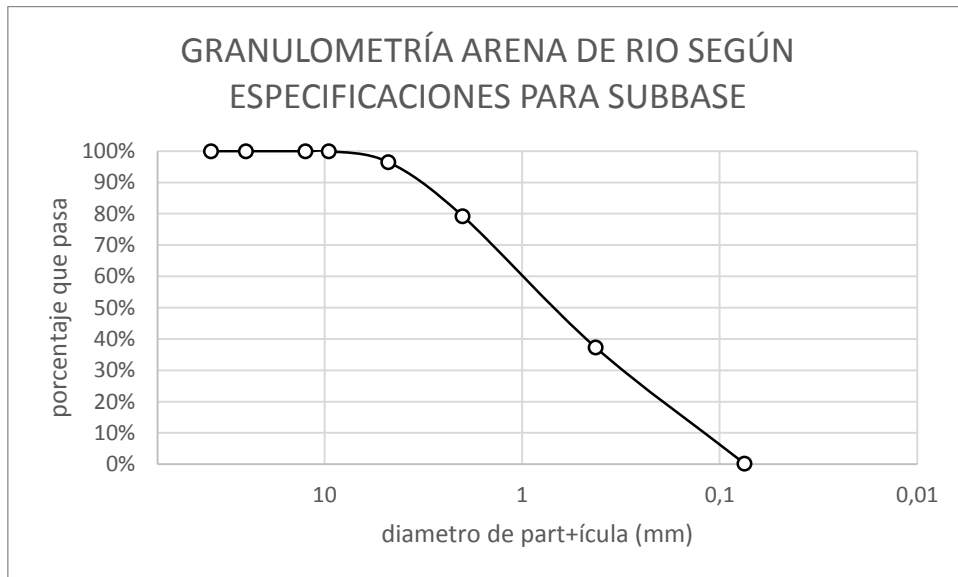
Fuente. Propia

Ilustración 6. Distribución granulométrica arena de peña según especificaciones para subbase



Fuente. Propia

Ilustración 7. Arena de río según especificación subbase



Fuente. Propia

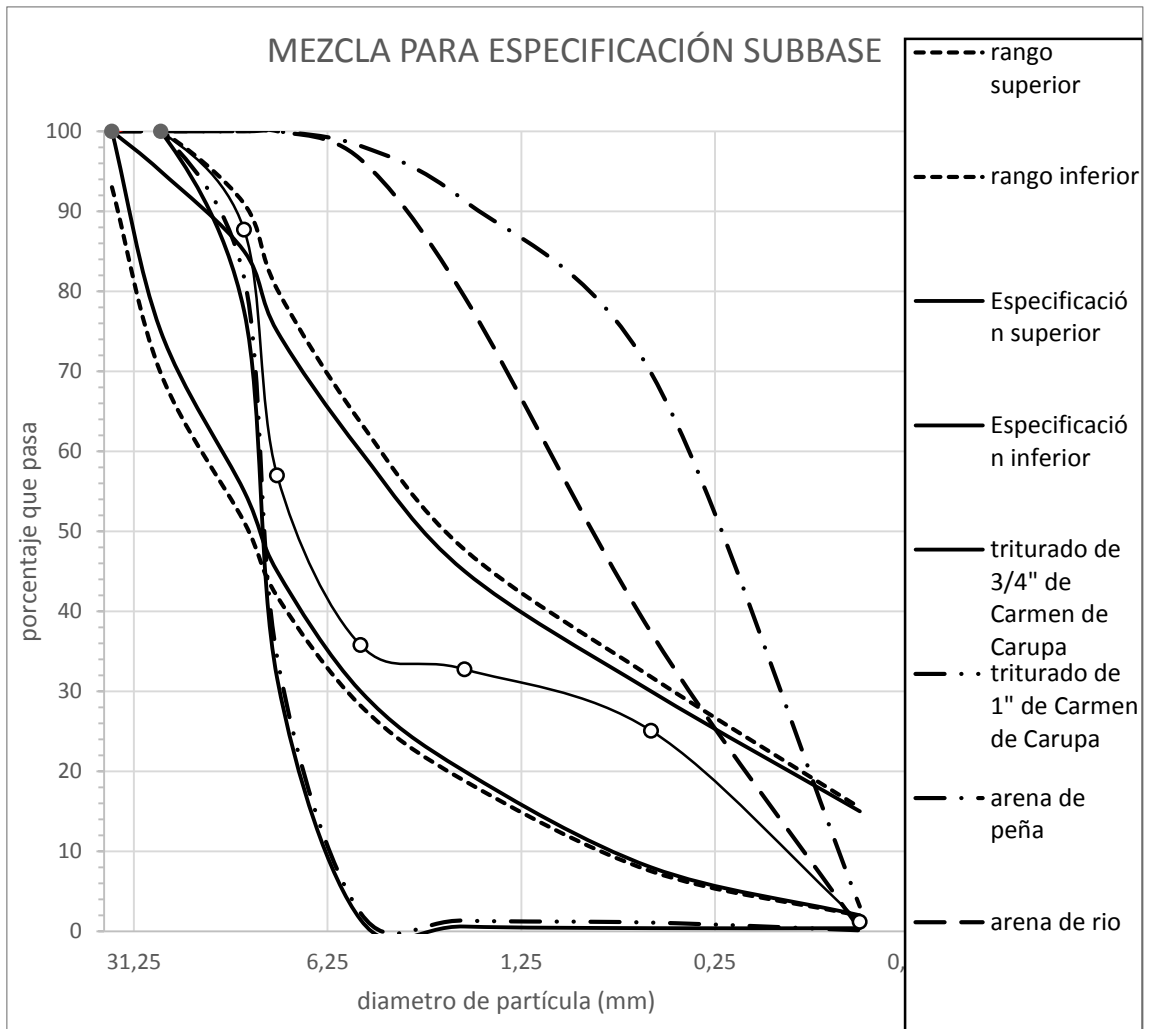
Evidentemente al presentarse tamaños predominantes, ningún material cumple con la especificación granulométrica requerida, por lo cual, es necesario realizar una mezcla con los materiales de estudio, para cumplir los mínimos requerimientos granulométricos.

Por ello se propone la siguiente mezcla:

- Triturado de una pulgada 10% de masa total de la mezcla.
- Triturado de tres cuartos de pulgada 55% de masa total de la muestra.
- Arena de peña 35% de masa total de la muestra.
- Arena de río 0% de masa total de la muestra, es prescindible para la mezcla.

Al seguir estas proporciones se obtiene la siguiente gradación (ver ilustración 8).

Ilustración 8. Mezcla para subbase



Fuente. Propia

Un material obtenido con estas proporciones acataría la gradación requerida, Se puede establecer el coeficiente de uniformidad y curvatura de este material según las siguientes fórmulas

Ecuación (1)

$$Cu = D_{60}/D_{10}$$

Ecuación (2)

$$Cc = (D30)^2/D60 * D10$$

Donde Cu es el coeficiente de uniformidad y Cc el coeficiente de curvatura.

Para este material Cu obtiene un valor de $9.5/0.125 = 76$

Mientras que Cc corresponde a $\frac{1^2}{9.5*0.125} = 0.84$

Esta mezcla genera un material producto de la combinación de tres materiales uniformemente graduados. Constituyendo así un tipo de suelo mal gradado, con granulometría discontinua.

Según el sistema unificado de clasificación de suelos la mezcla corresponde a una grava mal gradada (GP).

Según Banon⁵⁴, las gravas mal gradadas ofrecen una capacidad de drenaje excelente y un CBR in situ entre 25 y 60.

Esto implica que los poros pueden no verse en grandes cantidades llenados por áridos, lo que facilitaría el drenaje y disminuiría los efectos de la ascensión capilar, cumpliendo así las funciones de la capa subbase, buenas capacidades para el drenaje y soporte que proteja la sub rasante, además del aspecto económico que propende por la reducción de costos.

Tratándose de las especificaciones granulométricas necesarias para material de base (ver tabla 8) y tras efectuar el tamizado de las siguientes cantidades de material se obtienen las distribuciones que se muestran en las tablas 14 y 15.

- 4000 g de triturado de una pulgada
- 5000 g de triturado de tres cuartos de pulgada

⁵⁴ BANON. Luis. MANUAL DE CARRETERAS. CONSTRUCCIÓN Y MANTENIMIENTO.. [en línea]. [citado en 20 de junio de 2017]. Disponible en internet <<https://www.scribd.com/document/338783310/MANUAL-DE-CARRETERAS-LUIS-BANON-BLAZQUEZ-pdf>>

Tabla 14. Granulometría triturado de una pulgada según especificación para base

GRANULOMETRÍA MATERIAL DE UNA PULGADA PARA BASE				
tamiz	abertura de tamiz	porcentaje que pasa	masa retenida (g)	porcentaje retenido
1				
1/2"	37,5	100,0%	0	0,0%
1"	25,4	100,0%	0	0,0%
3/4"	19	70,7%	1168,9	29,3%
3/8"	9,51	0,3%	2816,6	70,5%
No 4	4,76	0,2%	3,4	0,1%
No 10	2	0,2%	0	0,0%
No 40	0,42	0,2%	0,5	0,0%
No 200	0,074	0,1%	3,5	0,1%
fondo		0,0%	1,2	0,0%

Fuente. Propia

Tabla 15. Granulometría triturado de tres cuartos según especificación para base

GRANULOMETRÍA MATERIAL DE TRES CUARTOS DE PULGADA PARA BASE				
tamiz	abertura de tamiz	porcentaje que pasa	masa retenida (g)	porcentaje retenido
1 1/2"	37,5	100,0%	0,00	0,0%
1"	25,4	100,0%	0,00	0,0%
3/4"	19	100,0%	0,00	0,0%
3/8"	9,51	0,3%	4987,24	99,7%
No 4	4,76	0,2%	4,25	0,1%
No 10	2	0,2%	0,00	0,0%
No 40	0,42	0,2%	0,63	0,0%
No 200	0,074	0,1%	4,38	0,1%
fondo		0,0%	1,50	0,0%

Fuente. Propia

En cuanto a los materiales llamados como “arena de peña” y “arena de río” las proporciones que se obtienen son iguales, pues los materiales solo presentan tamaños de agregado fino y escasos finos. Estos materiales son tamizados por el mismo conjunto de tamices que en la subbase (ver tablas 12 y 13 respectivamente)

De los anteriores resultados pueden generarse las siguientes curvas granulométricas

Ilustración 9. Triturado de una pulgada según especificación para base

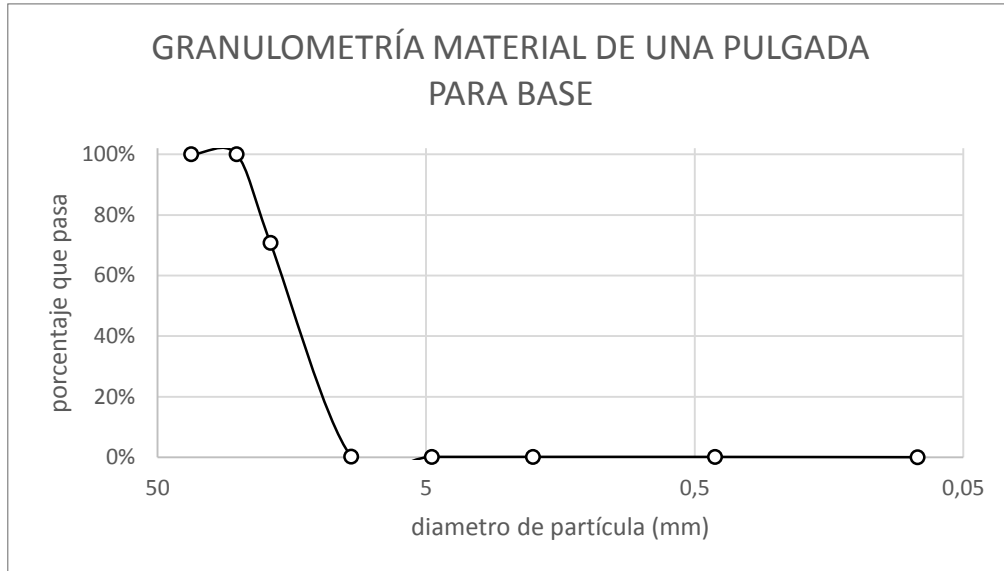
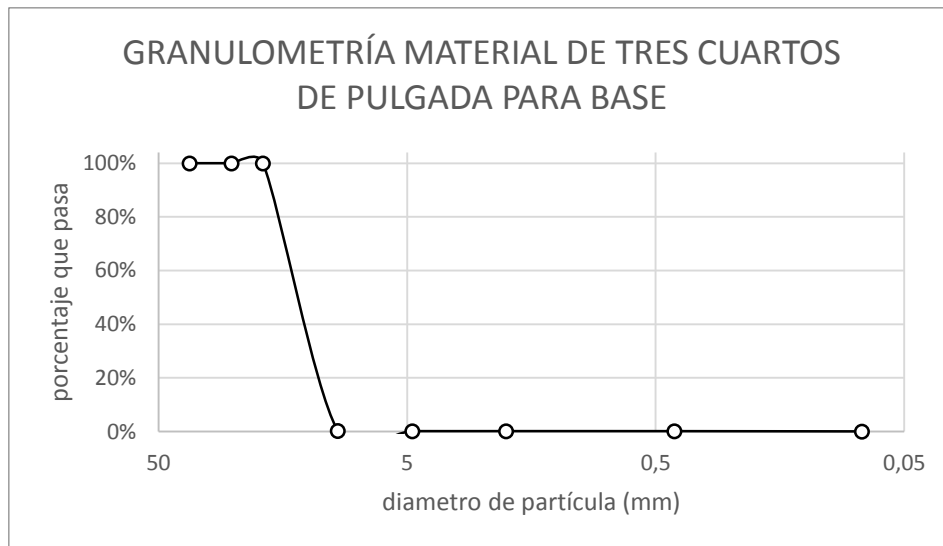


Ilustración 10. Triturado de tres cuartos de pulgada según especificación para base



De igual manera las curvas granulométricas para los agregados finos, “arena de peña” y “arena de río” tendrán la misma forma que en las ilustraciones 5 y 6 respectivamente.

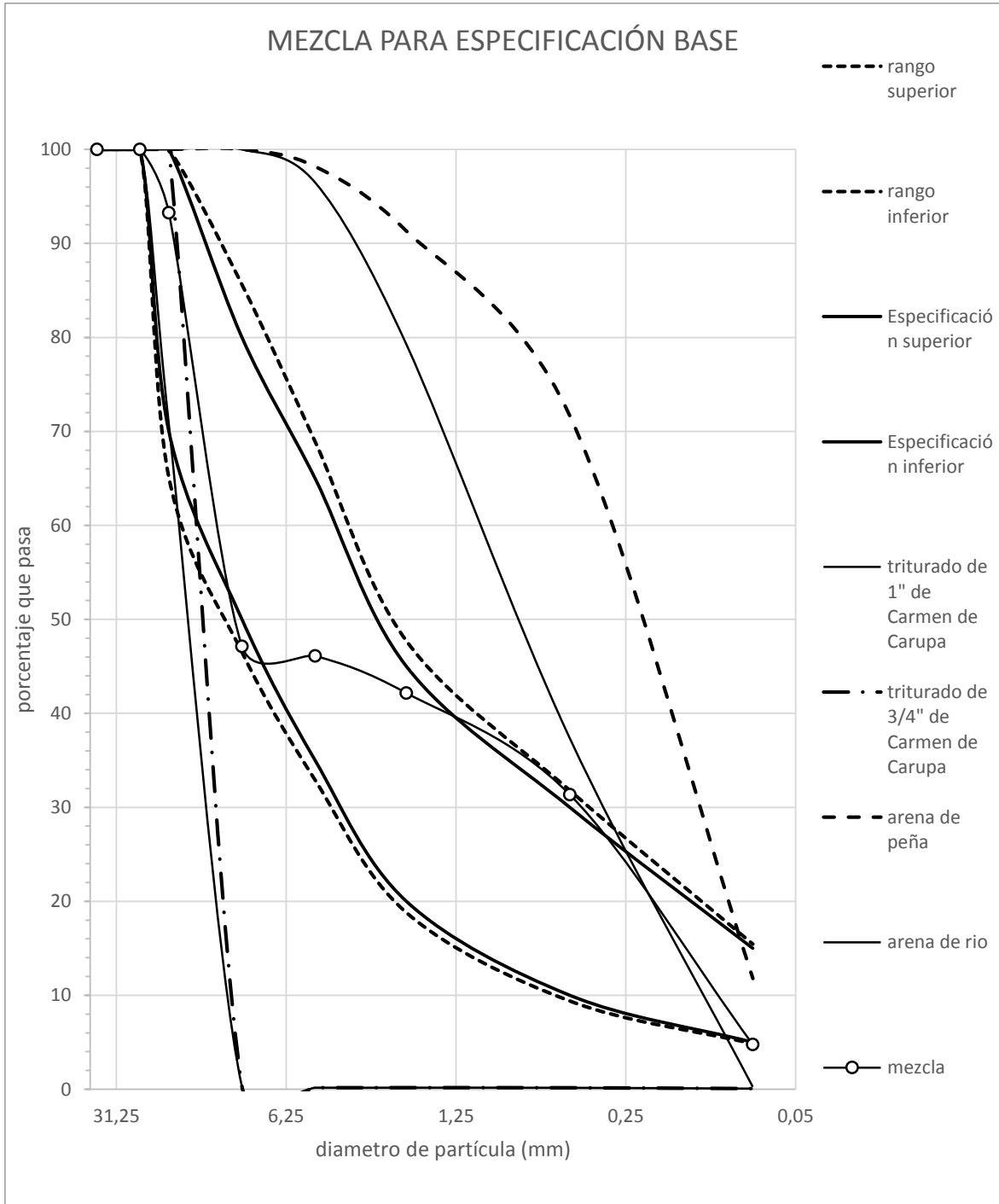
Nuevamente aquí ningún material cumple a cabalidad las especificaciones, por lo cual puede sugerirse una mezcla.

Se propone una proporción de materiales como sigue:

- Triturado de una pulgada 23% de masa total de la mezcla
- Triturado de tres cuartos de pulgada 30% de masa total de la mezcla
- Arena de peña 40% de masa total de la mezcla
- Arena de río 7% de masa total de la mezcla

Al seguir estas proporciones se obtiene la granulometría que se muestra en la siguiente ilustración.

Ilustración 11. Mezcla para base



Fuente. Propia

La mezcla resultante cumple los requerimientos dentro de las tolerancias permitidas. A pesar de ser un material mal graduado con granulometría discontinua.

Este material tiene un coeficiente de uniformidad de

$$Cu = 16.65/0.095 = 175$$

y un coeficiente de curvatura de

$$Cc = 0.4252^2/(16.65 * 0.095) = 0.11$$

Bajo estas condiciones y el resultado de los límites de Atterberg la mezcla propuesta puede clasificarse como Grava mal gradada con finos limosos (GP-GM).

Este suelo según Banon⁵⁵ puede ser catalogado como de comportamiento mecánico bueno, pues presenta un CBR in situ entre 20 y 40, a su vez que ofrece una baja capacidad de drenaje o resulta impermeable.

La impermeabilidad puede constituir un problema pues el agua de ascensión capilar, el aumento del nivel freático o los vapores emitidos producto de los cambios de temperatura, podría encontrar una barrera que impida su desplazamiento y ello conlleve a la deformación o deterioro de la estructura.

En lo que se refiere al análisis de las muestras, bajo las especificaciones granulométricas para afirmado (ver tabla 9). Se obtienen las siguientes distribuciones. (Ver tablas 16 y 17).

⁵⁵ BANON. Luis. MANUAL DE CARRETERAS. CONSTRUCCIÓN Y MANETENIMIENTO.. [en línea]. [citado en 20 de junio de 2017]. Disponible en internet <<https://www.scribd.com/document/338783310/MANUAL-DE-CARRETERAS-LUIS-BANON-BLAZQUEZ-pdf>>

Tabla 16. Granulometría triturado de una pulgada para afirmados

GRANULOMETRÍA TRITURADO DE 1 PULGADA PARA AFIRMADO				
tamiz	abertura de tamiz	porcentaje que pasa	masa retenida (g)	porcentaje retenido
1 1/2"	37,5	100,0%	0,00	0,0%
1"	25,0	100,0%	0,00	0,0%
3/4"	19,0	78,9%	511,00	21,1%
3/8"	9,5	17,9%	1479,7	61,0%
No 4	4,75	0,7%	417,92	17,2%
No 10	2,00	0,2%	13,5	0,6%
No 40	0,425	0,1%	2,62	0,1%
No 200	0,075	0,0%	0,13	0,0%
fondo		0,0%	1,02	0,0%

Fuente. Propia

Tabla 17. Granulometría triturado de tres cuartos para afirmado

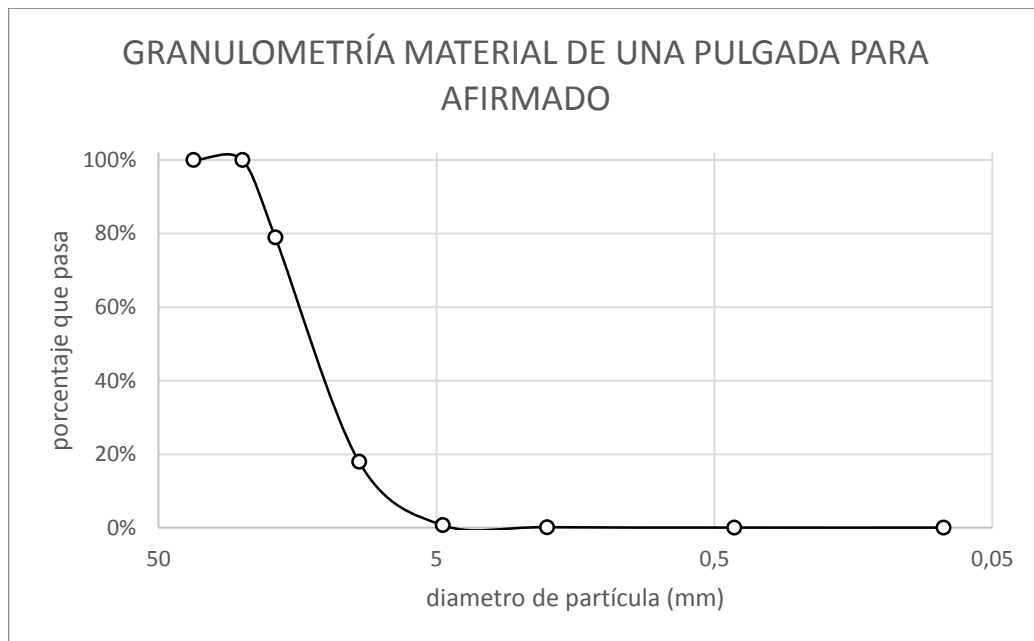
GRANULOMETRÍA TRITURADO DE TRES CUARTOS DE PULGADA PARA AFIRMADO				
tamiz	abertura de tamiz	porcentaje que pasa	masa retenida (g)	porcentaje retenido
1 1/2"	37,5	100,0%	0,00	0,0%
1"	25,0	100,0%	0,00	0,0%
3/4"	19,0	100,0%	0,00	0,0%
3/8"	9,5	75,6%	489,07	24,4%
No 4	4,75	10,0%	1310,96	65,5%
No 10	2,00	1,2%	176,4	8,8%
No 40	0,425	0,9%	6,66	0,3%
No 200	0,075	0,5%	7,53	0,4%
fondo		0,1%	6,71	0,3%

Fuente. Propia

De igual manera las proporciones para los agregados finos aquí tratados se mantienen iguales, pues están analizadas bajo el mismo conjunto de tamices. Dicha granulometría puede encontrarse en las tablas 12 y 13.

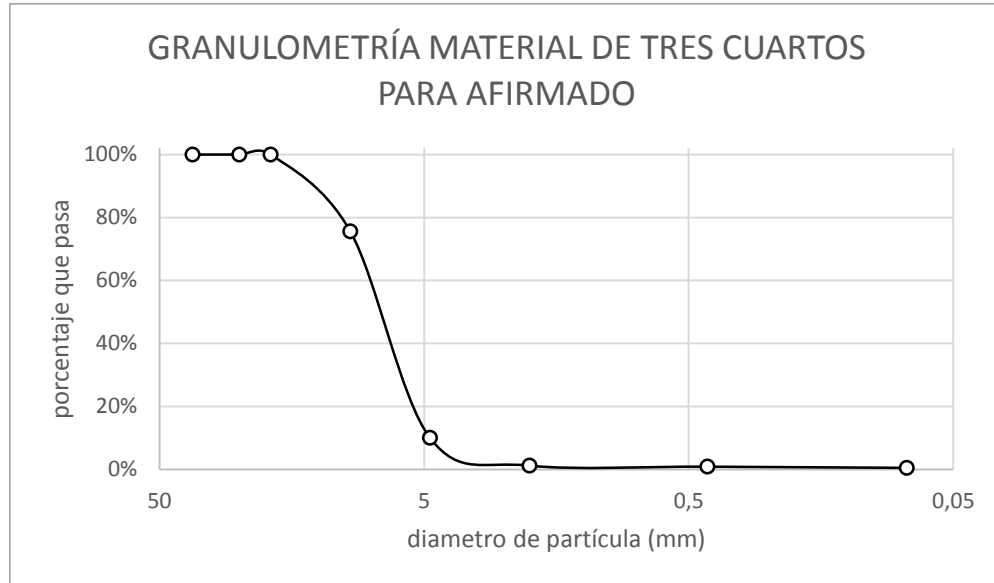
De los resultados anteriormente pueden establecerse las curvas granulométricas mostradas a continuación (ilustraciones 11 y 12)

Ilustración 12. Granulometría de una pulgada para afirmado



Fuente. Propia

Ilustración 13. Granulometría de tres cuartos para afirmado



Fuente. Propia

Las curvas granulométricas de los agregados finos pueden encontrarse en las ilustraciones 5 y 6, anteriormente mostradas.

Una vez más los materiales no cumplen la gradación exigida.

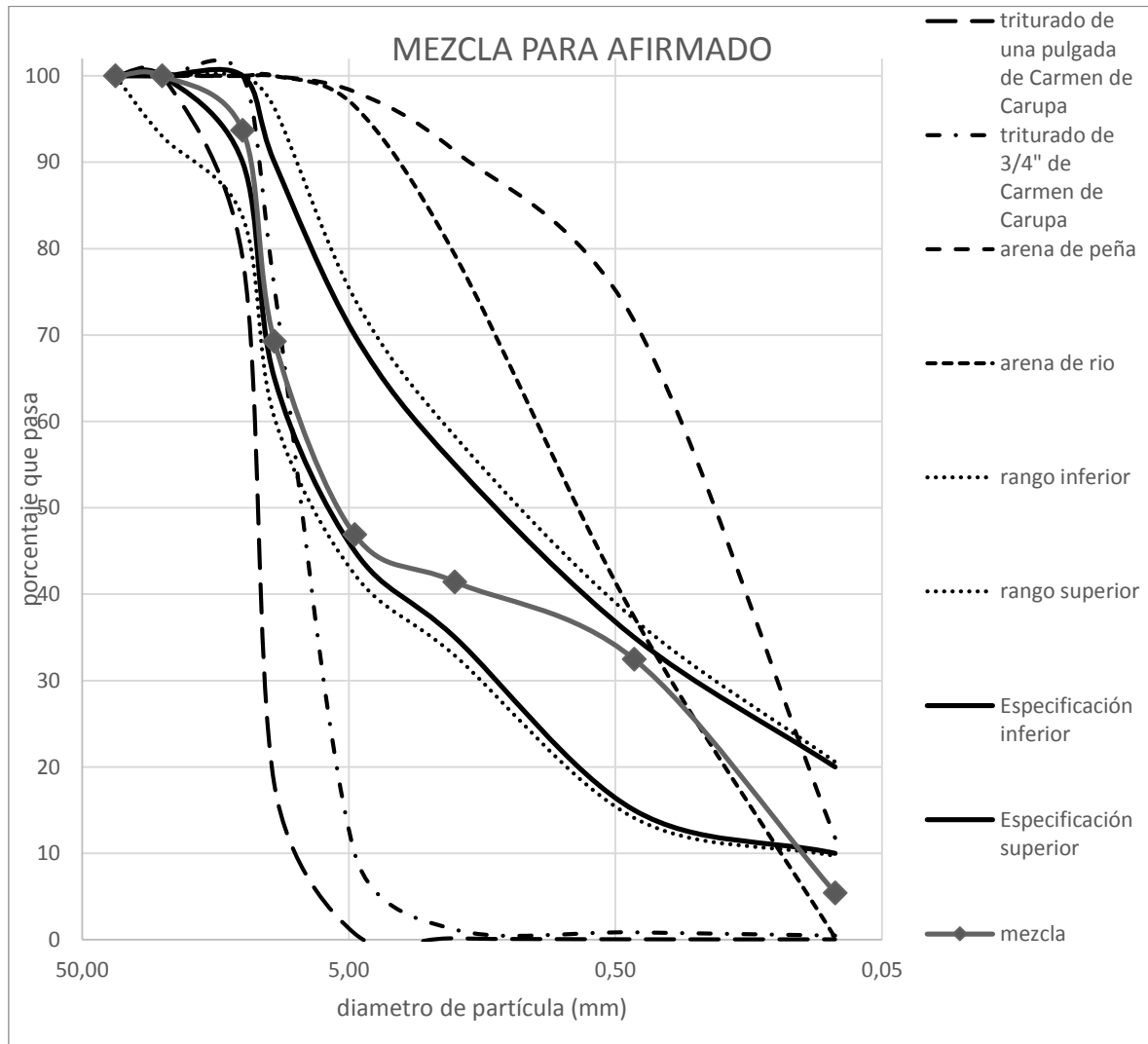
Una mezcla podría solucionar esta situación. Sin embargo no se halla una proporción que satisfaga a cabalidad la exigencia demandada.

Los materiales aquí tratados no permiten combinarse pues la sección de tamaños retenidos cercanos al tamiz No 40 sobrepasan los límites permitidos cuando se trata de buscar una proporción que sí satisfaga los límites permitidos para el material pasante por el tamiz No 200. De igual manera si se busca suplir la proporción retenida cercana al tamiz No 40, no es posible cumplir la gradación para los materiales que pasan el tamiz No 200.

Este resultado se puede apreciar en la ilustración 13, donde para efectos de demostración se toman las siguientes proporciones:

- Triturado de una pulgada 30% de masa total de la mezcla
- Triturado de tres cuartos de pulgada 25% de masa total de la mezcla
- Arena de peña 47% de masa total de la mezcla

Ilustración 14. Mezcla para afirmado



Fuente. Propia

Según los anteriores resultados se encuentra que de las tres mezclas de materiales propuestos, el que resulta más conveniente para su propósito final es la mezcla generada para el material de subbase, pues logra cumplir la gradación requerida, a la vez que por su propia distribución permite adecuadas capacidades drenantes.

La competencia en términos de resistencia, durabilidad y limpieza debe ser determinada para garantizar la idoneidad del material. Por este motivo se procede a realizar el análisis técnico del agregado propuesto como material de subbase

4.2. LÍMITES DE ATTERBERG

“Los límites de Atterberg están directamente relacionados con la cantidad de agua que contiene un material y es capaz de absorber; en otras palabras, con el tanto por ciento de partículas con dimensiones coloidales presentes en el material y su tendencia a comportarse como verdadero coloide. Está claro que debe existir una relación estrecha entre los límites y las características físicas y tecnológicas de un determinado material”⁵⁶.

Los límites de Atterberg y su interpretación por medio del diagrama de plasticidad, permiten asignar una arcilla con cierta precisión a una determinada clase de materiales y prever las características principales, anticipando algunos de los problemas y de las ventajas relacionados con su empleo, esta información incide en la determinación del lugar de extracción del material y a su vez, en el control preciso de la uniformidad de materias primas empleadas.⁵⁷

4.2.1 LÍMITE LÍQUIDO

- **Objetivo** Determinar el contenido de humedad que se halla entre el límite del estado líquido y estado plástico de un suelo.
- **Importancia** El ensayo es importante pues permite esbozar una medida de la cohesión del suelo, lo que permite predecir la capacidad portante y las posibles expansiones o asentamientos bajo contenidos de humedad variables.

Los límites de Atterberg y dentro de ellos el límite líquido, presenta una relación con la cantidad de agua que un material puede absorber, lo que establece una correlación estrecha con las características físicas y mecánicas del material.

⁵⁶ P.Sembenelli. Los límites de Atterberg y su significado en la industria cerámica y ladrillera. 1966. [en línea]. [citado en 18 de mayo de 2017]. Disponible en internet <file:///C:/Users/omar%20suarez/Downloads/1695-3772-1-PB.pdf>

⁵⁷ Ibid

- **Procedimiento** Analizando los materiales constituyentes de la muestra por separado, serán tamizados a través del tamiz número 40 (0.425 mm) y posteriormente cuarteados. Luego se toma una cantidad de masa de cada material que permita realizar el ensayo.

Para el material denominado arena de peña se toman 100.65 g.

La cantidad de material denominado arena de río analizada son 101.27 g.

En cuanto al triturado se elige una muestra de 102.5g.

Imágenes de referencia pueden apreciarse a continuación.

Ilustración 15. Masa arena de río



Fuente. Propia

Ilustración 16. Masa arena de peña



Fuente. Propia

Luego las muestras son mezcladas con 15 ml de agua.

Ilustración 17. Muestra de arena de peña



Fuente. Propia

Ilustración 18. Muestra de arena de río



Fuente. Propia

Para luego ser dispuestas en la cazuela.

Ilustración 19. Arena de peña en cazuela



Fuente. Propia

Ilustración 20. Arena de río en cazuela



Fuente. Propia

Posteriormente se divide la muestra de suelo con ayuda del ranurador.

Ilustración 21. Arena de peña ranura



Fuente. Propia

Ilustración 22. Arena de río ranura



Fuente. Propia

La ranura se cierra completados 4 golpes para la arena de peña y tan solo 3 golpes para la arena de río. Mientras que para el triturado bastaron 7 golpes para que la ranura se cerrara.

Ilustración 23. Cierre arena de peña



Fuente. Propia

Ilustración 24. Cierre arena de río



Fuente. Propia

De igual manera se aumenta el contenido de humedad en las muestras y se repite nuevamente el procedimiento, esto con el fin de constatar que evidentemente los materiales carecen de elementos cohesivos que incidan en el resultado de este ensayo.

Ilustración 25. Mayor contenido de humedad en arena de peña



Fuente. Propia

Todas las muestras necesitaron menor número de golpes en la cazuela, con respecto a la humedad anterior para que la abertura se cerrara.

- **Resultados** Terminado el ensayo se concluye que para ninguna muestra analizada es posible determinar el límite líquido, puesto que se requieren menos de 25 golpes en la cazuela para cerrar la abertura.

Esto indica la poca presencia de arcillas en los materiales, por lo cual no presentan propiedades plásticas.

Se puede inferir que a pesar de que el contenido de humedad no es un factor determinante y la resistencia mecánica de los materiales puede ser buena. Estos materiales pueden revestir una dificultad en el proceso de compactación, en el momento de ser dispuestos para como materiales de carretera.

Al no poder ser determinado el índice de plasticidad los materiales no pueden establecerse como no plásticos (NP) y se puede prescindir del ensayo para determinar el límite plástico.

La poca humedad retenida por los materiales, confirma las adecuadas capacidades drenantes de la mezcla para subbase.

4.3. EQUIVALENTE DE ARENA DE SUELOS Y AGREGADOS FINOS

- **Objetivo** Este ensayo busca determinar bajo condiciones normalizadas, las proporciones relativas de polvo y material de apariencia arcillosa o finos plásticos presentes en suelos o agregados finos inferiores a 4.75mm.⁵⁸
- **Importancia** “Asigna un valor empírico a la cantidad relativa, finura y carácter del material arcilloso o similar, presente en una muestra de suelo o agregado fino”.⁵⁹

Es importante conocer la cantidad de material arcilloso pues esta tiene propiedades plásticas, es bastante compresible, su consistencia depende de la humedad y presenta cohesión lo que puede interferir en el drenaje y capacidad portante de la subbase.⁶⁰

- **Procedimiento** Se evalúan por separado los materiales que componen la mezcla, por lo cual para el agregado fino, en este caso la arena de río y arena de peña, se disponen mínimo 1500 g de material pasa tamiz No 4, para cada uno, mediante tamizado y desmenuzado de los terrones si fuese necesario.

En cuanto al triturado es imposible obtener esta cantidad de material con el tamaño requerido, pues la gradación del agregado no lo permite.

⁵⁸ INVÍAS. EQUIVALENTE DE ARENA DE SUELOS Y AGREGADOS INV E 133-13. [en línea]. [citado en 07 de junio de 2017]. Disponible en internet < <https://www.INVÍAS.gov.co/index.php/documentos-tecnicos-izq/139-documento-tecnicos/1988-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-y-normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras>>

⁵⁹ ibid

⁶⁰ DUQUE. Escobar. GEOMECÁNICA PARA INGENIEROS. Cap 1. [s.l]. [s.n]. 22p

Una vez obtenido el agregado fino, este material se somete a cuarteo, buscando obtener una cantidad que llene el recipiente de medida para el ensayo.

El proceso a seguir para la arena de peña se puede apreciar en las procedentes ilustraciones

Ilustración 26. Arena de peña para ensayo



Fuente. Propia

Ilustración 27. Arena de peña



Fuente. Propia

Ilustración 28. Proceso de cuarteo, arena de peña Ilustración 29. Muestra de arena



Fuente. Propia



Fuente. Propia

De igual manera se procede con la arena de río, se llenan las probetas con la solución dispuesta en el laboratorio y se prepara el conjunto del sifón, hasta obtener el siguiente montaje.

Ilustración 30. Montaje final para ensayo



Fuente. Propia

Una vez se vierte la muestra y aproximadamente 4 pulgadas de solución se procede a dejar en reposo el material durante 10 minutos.

Ilustración 31. Materiales en solución



Fuente. Propia

Finalizados los 10 minutos se agitan los cilindros manualmente con ayuda de un tapón y a continuación se efectúa el proceso de irrigación, lavando el material y haciendo que el material fino que esté en el fondo pueda ponerse en suspensión sobre las partículas de arena.

El proceso de lavado se detiene hasta que en el cilindro se alcance la lectura de 15" de solución.

Alcanzado este nivel se dejan las muestras en reposo durante un periodo de 20 minutos, como se ilustra a continuación.

Ilustración 32. Materiales luego del lavado



Fuente. Propia

Culminados los 20 minutos se aprecia dentro de la probeta como el material se separa, lo cual permite proceder a realizar las lecturas de arcilla y arena.

Ilustración 33. Materiales luego del reposo



Fuente. Propia

- **Resultados** Para la muestra de arena de peña se determina una lectura de arcilla de 12.2”.

Con ayuda del dispositivo para tomar lectura se establece una altura de arena de 13.8” a la cual debe ser sustraída la corrección de 10.3” propias del instrumento del laboratorio.

Por otra parte para la muestra de arena de río se identifica una lectura de arcilla de 12.8” y un valor de lectura de arena de 11.7” de la cual debe sustraerse igualmente la corrección de 10.3”.

El equivalente de arena es calculado entonces como:

$$\text{Ecuación (4)}$$
$$EA = \frac{\text{lectura de arena}}{\text{lectura de arcilla}} * 100$$

Para la arena de peña se obtiene un valor de equivalente de arena de 29%. Mientras que para la arena de río se obtiene un valor de equivalente de arena de 11%.

La arena de peña cumple los requisitos para material de subbase, pues el valor mínimo aceptado para tal fin está establecido en 25% según INVÍAS. Lo contrario ocurre con la arena de río la cual muestra un valor de equivalente de arena que es insuficiente para la especificación para material de subbase de INVÍAS.

4.4. CONTENIDO DE TERRONES DE ARCILLA Y PARTÍCULAS DELEZNABLES

- **Objetivo.** Determinar aproximadamente los terrones de arcillas y partículas friables de los agregados⁶¹.
- **Importancia.** “Este ensayo es de importancia fundamental para aprobar el empleo de agregados destinados a la elaboración de concretos hidráulicos”⁶². Puesto que la arcilla puede constituir un agente deletéreo del concreto y las partículas friables pueden alterar la granulometría original del agregado.
- **Procedimiento.** El material de análisis es secado hasta masa constante, luego de esto se disponen mínimo 25 g de agregado fino que resulten más gruesas que el tamiz No 16.

Para el agregado grueso, luego de tener un material seco, se debe distribuir la totalidad del mismo entre los siguientes tamaños:

- 4.75-9.5 mm
- 9.5- 19 mm
- 19-37.5 mm
- Mayores de 37.5 mm⁶³

Para la ejecución de este ensayo se disponen cada uno de los materiales constituyentes de la mezcla, como también la arena de río por separado. Con el fin de evaluar las particularidades de cada uno. Así se toman:

- 27.46 g de muestra de arena de peña
- 29.80 g de muestra de arena de río
- 1000 g de triturado entre 4.75 mm y 9.5mm
- 2000 g de triturado entre 9.5 mm y 19 mm

⁶¹ INVÍAS. ESPECIFICACIONES GENERALES DE CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS. Sección 200. INV E-211-13. [en línea]. [citado en 20 de abril de 2017]. Disponible en internet <<https://www.INVÍAS.gov.co/index.php/documentos-tecnicos-izq/139-documento-tecnicos/1988-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-y-normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras>>

⁶² ibid

⁶³ ibid

- 700 g de triturado entre 19 mm y 37.5 mm

Imágenes de referencia pueden apreciarse en las siguientes ilustraciones

Ilustración 34. Muestra arena de peña antes del ensayo



Fuente. Propia

Ilustración 35. Muestra arena de río antes del ensayo



Fuente. Propia

Una vez determinada la masa de las muestras, estas se extienden en una capa sobre el fondo de un recipiente y son cubiertas con agua, dejándolas en remojo durante 24 horas.

Imágenes de referencia se muestran en las siguientes ilustraciones.

Ilustración 36. Triturado sumergido en agua



Fuente. Propia

Ilustración 37. Agregado fino sumergido



Fuente. Propia

Una vez el material ha sido remojado se procede a apretar y rodar individualmente entre el pulgar y el índice los granos, buscando romperlos.

Aquellos que logren romperse se clasifican como terrones de arcilla o partículas deleznable y serán removibles mediante tamizado en húmedo.

Luego de que el proceso manual termine se procede a determinar la cantidad de material retenido empleando el siguiente juego de tamices (ver tabla 18)

Tabla 18. Tamices utilizados luego del remojo

INTERVALOS DE LAS PARTÍCULAS QUE FORMAN LA MUESTRA	TAMAÑO DEL TAMIZ PARA REMOVER EL RESIDUO DE TERRONES DE ARCILLAS Y PARTÍCULAS DELEZNABLES
Agregado fino retenido en el tamiz de 1.18 mm (No 16)	No 20
4.75-9.5 mm (No 4- 3/8")	No 8
9.5- 19.0mm (3/8"-3/4")	No 4
19.0 mm-37.5mm (3/4"- 1 1/2")	No 4
mayor de 37.5 mm (1 1/2")	No 4

Fuente. Propia

Las partículas retenidas sobre los anteriores tamices son llevadas al horno, hasta alcanzar una masa constante, para por ultimo determinar su masa

- **Resultados.** En cuanto al triturado y la arena de peña la masa final es la misma que la inicial. En cuanto a la arena de río la masa final que se obtiene es 25.50 g

Se procede a calcular el porcentaje de arcilla y partículas deleznable de la siguiente forma

Ecuación (5)

$$P = \frac{M - R}{R} * 100$$

Donde:

P: Es el porcentaje de terrones de arcilla y partículas deleznable

M: Masa inicial de la fracción respectiva.

R: Masa de las partículas retenidas sobre el tamiz designado para remover el residuo.

Para los agregados gruesos el porcentaje de arcilla y partículas deleznablees deberá ser un promedio basado en el porcentaje obtenido en cada fracción⁶⁴

Los resultados obtenidos muestran que para el triturado y la arena de peña no se obtienen porcentajes de terrones de arcilla y partículas deleznablees. Mientras que para la arena de río se obtiene un porcentaje de 15%.

La especificación para subbase tolera un máximo de 2% de terrones de arcilla y partículas deleznablees.

Este parámetro es cumplido por todos los materiales a excepción de la arena de río. Esto puede ser el resultado de materia indeseada de aspecto orgánica presente en este material.

Este componente se puede apreciar al sumergir en agua el material, quedando este en suspensión como se aprecia en la siguiente imagen

Ilustración 38. Materia indeseable en arena de río



Fuente. Propia

⁶⁴ INVÍAS. ESPECIFICACIONES GENERALES DE CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS. Sección 200. INV E-211-13. [en línea]. [citado en 20 de abril de 2017]. Disponible en internet < <https://www.INVÍAS.gov.co/index.php/documentos-tecnicos-izq/139-documento-tecnicos/1988-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-y-normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras>>

El triturado y la arena de peña presentan buenas condiciones de limpieza, contrario a lo que ocurre con la arena de río. Como este material no fue utilizado para realizar la mezcla destinada a subbase no se presenta ningún inconveniente.

4.5. SOLIDEZ DE LOS AGREGADOS FRENTE A LA ACCIÓN DE SOLUCIONES DE SULFATO DE SODIO O DE MAGNESIO

- **Objetivo.** Determinar la resistencia de los agregados pétreos cuando deben soportar la intemperie en concretos y otras aplicaciones⁶⁵
- **Importancia.** El ensayo simula la expansión del agua por congelamiento, permitiendo obtener información útil para juzgar la resistencia de los agregados a la acción de los agentes atmosféricos, cuando no se dispone de datos sobre el comportamiento de los materiales que se van a emplear, en las condiciones climatológicas del servicio⁶⁶
- **Procedimiento.** Se prepara una solución de sulfato de magnesio cuyo volumen sea al menos cinco veces el volumen de sólidos de todas las muestras sumergidas, empleando una concentración de 1400 g de sal heptahidratada por cada litro de agua.

La solución preparada puede apreciarse en la ilustración 39.

⁶⁵ INVÍAS. ESPECIFICACIONES GENERALES DE CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS. Sección 200. INV E-220 -13. [en línea]. [citado en 20 de abril de 2017]. Disponible en internet <<https://www.INVÍAS.gov.co/index.php/documentos-tecnicos-izq/139-documento-tecnicos/1988-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-y-normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras>>

⁶⁶ ibid

Ilustración 39. Solución de sal de Epsom



Fuente. Propia

Para el agregado fino luego de lavado y secado, se disponen de 100g de cada una de las fracciones que se indican a continuación.

Tabla 19. Juego de tamices para agregado fino

PASA TAMIZ	RETENIDO EN TAMIZ
600 μm (No 30)	300 μm (No 50)
1.18 mm (No 16)	600 μm (No 30)
2.36 mm (No 8)	1.18 mm (No 16)
4.75 mm (No 4)	2.36 mm (No 8)
9.5 mm (3/8")	4.75 mm (No 4)

Fuente. INVÍAS. ESPECIFICACIONES GENERALES DE CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS. Sección 200. INV E-220 -13

El agregado grueso debe ser un material del que se han retirado todas las fracciones inferiores al tamiz de 4.75 mm (No 4) y debe cumplir las siguientes proporciones, una vez este ha sido lavado y secado, cada proporción debe tener 5% de masa como mínimo. Como se puede apreciar en la siguiente tabla.

Tabla 20. Especificaciones agregado grueso

Tamices	masa (g)	composición del material
de 4.75 mm a .5 mm (No 4 a 3/8")	300±5	de 9.5 mm a 12.5 mm (3/8" a 1/2") 330 ±5 g de 12.5 mm a 19.0 mm (1/2" a 3/4") 670 ± 10 g de 19 mm a 25.0 mm (3/4" a 1") 500 ± 30 g de 25 mm a 37.5 mm (1" a 1 1/2") 1000 ± 50 g de 37.5 mm a 50 mm (1 1/2" a 2") 2000 ± 200 g de 50 mm a 63 mm (2" a 2 1/2") 3000 ± 300 g
de 9.5 mm a 19 mm (3/8" a 3/4")	1000 ± 10	
de 19 mm a 37.5 mm (3/4" a 1 1/2")	1500 ± 50	
de 37.5 mm a 63 mm (1 1/2" a 2 1/2")	5000 ± 300	
de 63 mm a 75 mm (2 1/2" a 3")	7000 ± 1000	
de 75 mm a 90 mm (3" a 3 1/2")	7000 ± 1000	
de 90 mm a 100 mm (3 1/2" a 4")	7000 ± 1000	

Fuente. INVÍAS. ESPECIFICACIONES GENERALES DE CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS. Sección 200. INV E-220 -13

Para la ejecución de este ensayo, se disponen para los agregados finos proporciones compuestas por fracciones contenidas entre los siguientes tamices:

- Número 4 y número 8 (100 g de material tanto para arena de río como arena de peña).
- Número 8 y número 16 (100 g de material tanto para arena de río como arena de peña)
- Número 16 y número 30 (100 g de material tanto para arena de río como arena de peña).
- Número 30 y número 50 (100 g de material tanto para arena de río como arena de peña).

En cuanto al agregado grueso las proporciones que aplican según los tamaños de grano de las muestras disponibles son:

- No 4 a 3/8" (297 g de material)

- 3/8" y 3/4" (933 g de material)
- 3/4" a 1 1/2" (1460 g de material)

Los materiales dispuestos para el ensayo pueden observarse en la siguiente ilustración.

Ilustración 40. Fracciones de arena de peña



Fuente. Propia

Ilustración 41. Fracciones de arena de peña



Fuente. Propia

Ilustración 42. Fracciones de triturado



Fuente. Propia

Una vez el material es dispuesto se efectúa la inmersión de las muestras en la solución durante un periodo no menor de 16 horas ni mayor de 18 horas, manteniendo una temperatura constante al ambiente de $21 \pm 1^{\circ}\text{C}$ ⁶⁷. Condición que no se cumple en los laboratorios de la universidad, razón por la cual se presenta un error en los resultados.

Ilustraciones de referencia al proceso de inmersión pueden apreciarse a continuación.

Ilustración 43. Arena de peña sumergida en sulfatos



Fuente. Propia

⁶⁷ INVÍAS. ESPECIFICACIONES GENERALES DE CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS. Sección 200. INV E-220 -13. [en línea]. [citado en 20 de abril de 2017]. Disponible en internet <<https://www.INVÍAS.gov.co/index.php/documentos-tecnicos-izq/139-documento-tecnicos/1988-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-y-normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras>>

Ilustración 44. Arena de río sumergida en sulfatos



Fuente. Propia

Ilustración 45. Agregado grueso sumergido en sulfato



Fuente. Propia

Posterior al tiempo en inmersión se efectúa el secado en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}^{68}$, hasta masa constante.

El proceso de inmersión y secado de la muestra se repite hasta completar cinco ciclos.

Después de terminado el último ciclo, las muestras se lavan hasta remover los sulfatos, se secan y se tamizan sobre los mismos tamices en los que fueron separadas las fracciones antes del ensayo.

El porcentaje de pérdida definido por la siguiente ecuación.

⁶⁸ INVÍAS. ESPECIFICACIONES GENERALES DE CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS. Sección 200. INV E-220 -13. [en línea]. [citado en 20 de abril de 2017]. Disponible en internet < <https://www.INVÍAS.gov.co/index.php/documentos-tecnicos-izq/139-documento-tecnicos/1988-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-y-normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras>>

Ecuación (6)

$$P = \frac{mi - mf}{mi} * 100$$

Donde:

P. Porcentaje de pérdidas

Mi: masa inicial

Mf: masa final

- **Resultados.** Las masas finales y los porcentajes de pérdida de las fracciones tamizadas para los distintos materiales pueden encontrarse en la siguiente tabla.

Tabla 21. Resultados por fracción

masa final después de cinco ciclos				porcentaje de pérdida		
fracción	agregado grueso	arena de peña	arena de río	agregado grueso	arena de peña	arena de río
No 4- No 8	-	92	70	-	8	30
No 8- No 16		90	72		10	28
No 16- No 30		93	68		7	32
No 30- No 50		87	70		13	30
No 4- 3/8"	280	-	-	6	-	-
3/8"- 3/4"	885			5		
3/4"-11/2"	1412			5		

Fuente. Propia

La pérdida promedio redondeada de la arena de peña obtuvo un valor de 10%. A su vez la pérdida promedio redondeada del agregado de río tuvo un valor de 30%. Por último la pérdida promedio redondeada del agregado grueso corresponde a un valor de 5%.

Como en la mezcla propuesta para cumplir las especificaciones necesarias para subbase no se hace uso de la arena de río como material constituyente, se observa que los materiales tratados cumplen la especificación de durabilidad para todos los niveles

de tránsito. Pues el Instituto Nacional de Vías establece estos valores cuyo máximo corresponde a 18% de pérdidas.

Esto indica que el material para subbase puede otorgar buenas condiciones de durabilidad para el periodo de diseño proyectado por su adecuado comportamiento frente a la acción del cambio en la temperatura.

4.6. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DEL AGREGADO GRUESO A LA DEGRADACIÓN POR ABRASIÓN, UTILIZANDO EL APARATO MICRO-DEVAL.

- **Objetivo** Determinar la resistencia a la abrasión de una muestra de agregado grueso.
- **Importancia** Este ensayo proporciona una medida de la resistencia y durabilidad del material, como resultado de la acción combinada de abrasión y molienda con esferas de acero y presencia de agua. Al incorporar el uso del agua, se puede encontrar una reducción en la resistencia de algunos materiales.

Es útil para el control de calidad al detectar cambios en las propiedades de los materiales.

- **Procedimiento** La distribución granulométrica del agregado a evaluar depende del tamaño máximo nominal. Para el ensayo del triturado, se hace necesario cumplir la especificación mostrada en la tabla siguiente

Tabla 22. Cantidad de material para ensayo micro deval

PASA TAMIZ	RETENIDO EN EL TAMIZ	MASA
19 mm	16 mm	375 g
16 mm	12.5 mm	375 g
12.5 mm	9.5 mm	750 g

Fuente. INVÍAS. NORMAS Y ESPECIFICACIONES 238-13

Debido a que en la universidad no se cuenta con un tamiz de 16 mm, se propone el uso de tamices diferentes, por lo cual la muestra una vez secada y preparada se dispone de la siguiente manera (ver tabla 23).

Tabla 23. Gradación sugerida

pasa tamiz	retenido en	masa g
3/4"	1/2"	750,9
1/2"	3/8"	751,5

- **Resultados** Una vez terminado el ensayo y posterior al lavado sobre el tamiz de 4.75 mm y 1.18 mm se obtuvo una masa resultante de 916,4g, calculando así la pérdida del material cuyos datos se muestran a continuación (tabla 24)

Tabla 24. Resultados del ensayo de micro deval

masa total (g)	1502,4
masa luego del lavado (g)	916,4
Porcentaje de pérdidas (%)	39,0

Fuente. Propia

Infortunadamente en el laboratorio de la universidad no se cuenta con agregado de calibración con el cual se puedan cotejar los resultados. Sin embargo como se puede concluir a partir de la tabla 25 el material de análisis no es competente para ninguna capa de pavimento.

Tabla 25. Límites referenciales para diferentes aplicaciones de agregados

APLICACIÓN	MÁXIMAS PÉRDIDAS POR ABRASION EN PRUEBA MICRO - DEVAL (%)
Subbase granular	30 ^A
Base granular	25 ^A
Base de gradacion abierta	17 ^A
Concreto estructural	17 ^A 21 ^B
Pavimento rígido	13 ^A
Base de concreto asfáltico	21 ^A
Capa de rodadura asfáltica en vías secundarias	21 ^A
Capa de rodadura en concreto asfáltico	17 ^A 18 ^C

INVÍAS. NORMAS Y ESPECIFICACIONES 238-13

Cabe mencionar que el cumplimiento o no de las máximas pérdidas admisibles luego de la ejecución de este ensayo, no es un resultado definitivo pues se precisan de ensayos complementarios que señalen la pertinencia o no del material a utilizar.

4.7. RESISTENCIA A LA DEGRADACIÓN DE LOS AGREGADOS DE TAMAÑOS MENORES DE 37,5 MM (1½”) POR MEDIO DE LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES.

- **Objetivo** Determinar la resistencia a la abrasión de agregados gruesos de tamaño menor a 37.5 mm por medio del uso de la máquina de los Ángeles.
- **Importancia** Debido a que los agregados son sometidos a desgaste irreversible desde su producción, colocación y compactación hasta evidentemente la puesta en funcionamiento del mismo, la resistencia al desgaste de un agregado es utilizada como una medida de la calidad del material a utilizar.

Este ensayo es utilizado como un indicador de la competencia de agregados provenientes de diversas fuentes y similar composición mineralógica

- **Procedimiento** Una vez el agregado es secado y dispuesto para el ensayo se establece una granulometría similar a la consignada en la tabla 26.

Tabla 26. Granulometría necesaria para el ensayo

TAMAÑOS DE TAMIZ		MASAS DE LAS DIFERENTES FRACCIONES, g			
PASA TAMIZ	RETENIDO EN TAMIZ	GRANULOMETRÍAS			
		A	B	C	D
37.5 (1 1/2")	25 (1")	1250 ± 25 1250 ± 25 1250 ± 10 1250 ± 10	2500 ± 10 2500 ± 10	2500 ± 10 2500 ± 10	5000 ± 10
25 (1")	19 (3/4")				
19 (3/4")	12.5 (1/2")				
12.5 (1/2")	9.5 (3/8")				
9.5 (3/8")	6.3 (1/4")				
6.3 (1/4")	4.75 (No.4)				
4.75 (No.4)	2.36 (No.8)				
TOTAL		5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10

Fuente .INVÍAS. NORMAS Y ESPECIFICACIONES 218-13

Según la proporción sugerida de la mezcla para subbase, la granulometría que mejor represente el material objeto del ensayo es la designada por la letra B, por lo cual se dispone la muestra de la manera que muestra la tabla 27.

Tabla 27. Distribución granulométrica del agregado para ensayo

granulometría B	
Franja	masa (g)
1/2" - 3/8"	2501.04
3/8" - 1/4"	2509.21
masa total	5010.25

Fuente. Propia

El material preparado se vierte dentro de la máquina junto con una masa de esferas de 1580 g como lo define la tabla 28.

Tabla 28. Carga abrasiva según granulometría

GRANULOMETRIA	NUMERO DE ESFERAS	MASA DE LA CARGA, g
A	12	5000 ± 25
B	11	1584 ± 25
C	8	3330 ± 20
D	6	2500 ± 15

Fuente. INVÍAS. NORMAS Y ESPECIFICACIONES 218-13

Completadas las 500 revoluciones de la máquina de Los Ángeles, se procede a separar la muestra mediante un tamiz de 3/8". Aquella cantidad de material que logra pasar este tamiz es evaluada nuevamente por el tamiz de 1.70 mm.

- **Resultados** Al separar la cantidad de muestra que pasa el tamiz de 1.70 mm y luego de su lavado y secado, se obtiene una masa de 1695 g.

Con estos resultados obtenidos es posible determinar el porcentaje de pérdidas mediante la ecuación 1

Ecuación (7)

$$[(P1 - P2)/p1] * 100$$

Donde:

P1: Masa de la muestra seca antes del ensayo (g)

P2: Masa de la muestra seca después del ensayo, previo lavado sobre tamiz de 1.70 mm

Masa residual 1695 g. Obteniéndose una pérdida de 66%.

El material no ofrece la mínima resistencia requerida por INVÍAS para la capa subbase, como se puede apreciar a continuación. (Ver tabla 29).

Tabla 29. Especificación de dureza para sub-bases.

REQUISITOS DE LOS AGREGADOS PARA SUB-BASES GRANULARES				
CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV	SUB-BASE GRANULAR		
		CLASE C	CLASE B	CLASE A
DUREZA				
Desgaste en la máquina de los Ángeles máximo (%) 500 revoluciones	E-218	50	50	50

Fuente. INVÍAS. NORMAS Y ESPECIFICACIONES 218-13

Como el material no resulta aceptable para la capa de menores esfuerzos, evidentemente no es apta tampoco para las capas suprayacentes a la sub-base.

5. CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA DE LOS AGREGADOS

Conocer las propiedades mineralógicas de los agregados permite determinar la idoneidad del material, para cierto uso en particular, a su vez permite prever los problemas que pueden presentarse al combinar el agregado con otros elementos necesarios para la conformación de una vía.

Determinar los elementos constitutivos de las rocas para material de construcción, aporta una valiosa información que puede ser utilizada para determinar la competencia del material.

Por ejemplo como lo señalan Becerra y Costa⁶⁹. Las rocas ornamentales experimentan procesos de deterioro ocasionado por la contaminación atmosférica y por la acción de algunas sustancias industriales. Los ensayos de caracterización tecnológica, permiten conocer anticipadamente las características de la roca en relación con la acción del medio ambiente, ayudando a prever la existencia de problemas, pues la posibilidad de usar un material como roca ornamental, depende de factores intrínsecos de la roca, como son la intensidad y el tipo de alteración mineralógica presente, la presencia de tensiones confinadas, la heterogeneidad textural y sus propiedades físicas y químicas. Lo mismo ocurre con los agregados, los cuales provienen de distintos tipos de rocas, por lo cual su análisis se debe realizar teniendo en cuenta los mismos parámetros.

A continuación se detalla el análisis mineralógico realizado bajo la lupa a diferentes muestras de mano correspondientes a los agregados.

Las muestras elegidas, pueden ser clasificadas como un conjunto de rocas sedimentarias.

Las rocas sedimentarias son producto de la erosión de rocas preexistentes, su transporte y posterior depositación. Estas rocas también se originan a partir de la

⁶⁹ BECERRA. Javier y COSTA. Gilberto. UNIVERSIDAD FEDERAL DE MINAS GERAIS. ESPECIFICACIONES DE USO DE ROCAS ORNAMENTALES CON BASE EN ENSAYOS DE ALTERACIÓN ACELERADA. . [en línea]. [citado en 03 de agosto de 2017]. Disponible en internet <http://revistas.uptc.edu.co/revistas/index.php/ingenieria_sogamoso/article/view/871/870>

disolución de componentes en condiciones acuosas, como a su vez pueden proceder de organismos o material de precipitación que sufre un proceso de litificación.⁷⁰

La clasificación de las muestras de mano y consecuente identificación mineralógica de las mismas se realiza siguiendo el procedimiento propuesto por la dependencia de investigaciones naturales y de medio ambiente de British Geological Survey⁷¹

En primera instancia se determina la naturaleza de los componentes de las rocas ya sean clásticos, ortoquímicos o aloquímicos. Esto permite establecer que las muestras objeto de este estudio corresponden a rocas detríticas, pues están compuestas por más del cincuenta por ciento de su volumen por clastos.

La textura predominante de estas rocas está formada por clastos aglomerados en una matriz de grano más fino.

El tamaño de los granos puede establecerse como arena y grava.

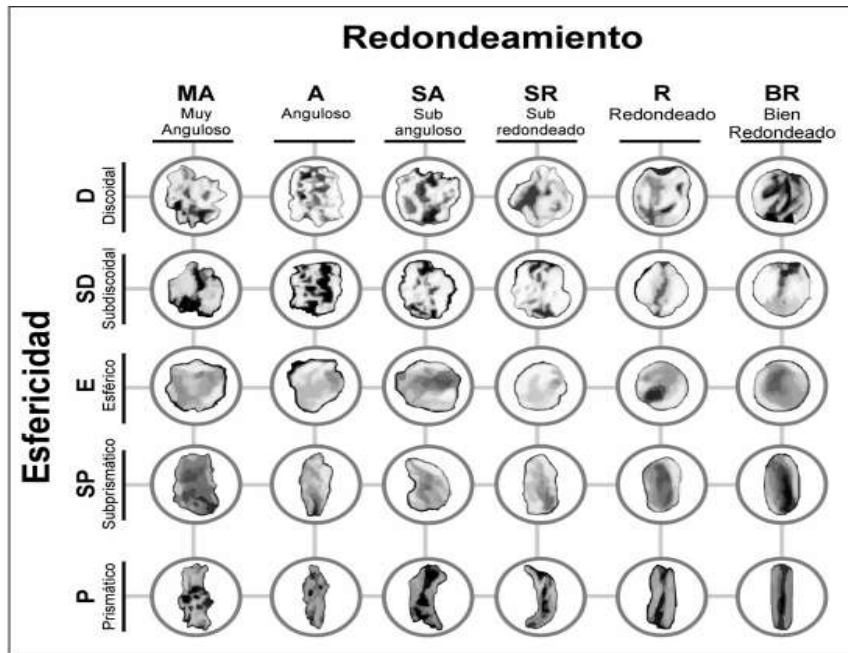
La descripción de la forma de los granos se determina según su grado de redondez y esfericidad con ayuda del siguiente esquema tomado del documento de Corbí Hugo y Martínez Javier⁷².

⁷⁰ DUQUE. Escobar Gonzalo. MANUAL DE GEOLOGÍA PARA INGENIEROS. Cap 09. [en línea]. [citado en 16 de enero de 2017]. Disponible en internet <<http://www.bdigital.unal.edu.co/1572/287/rocassedimentarias.pdf>>

⁷¹ CR. Hallsworth y R W O' B. Knox. BGS GEOLOGICAL SURVEY. Rock classification sediments and sedimentary rocks. [s.n]. 1999

⁷² CORBI. Hugo y MARTÍNEZ. Javier. Interpretando ambientes sedimentarios: taller de sedimentología con arenas como actividad didáctica de Ciencias de la tierra. [en línea]. [citado en 17 de enero de 2017]. Disponible en <<http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/54239>>

Ilustración 46. Forma de los granos



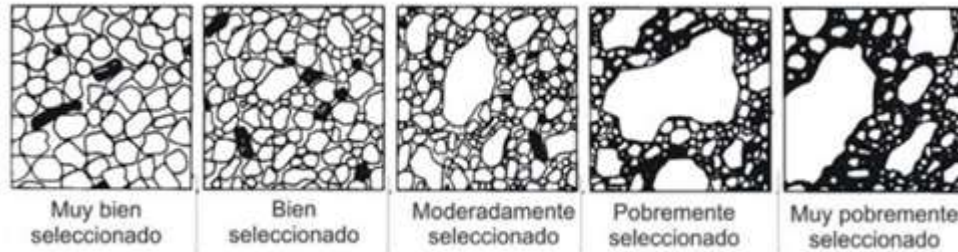
Fuente. CORBI. Hugo y MARTÍNEZ. Javier. Interpretando ambientes sedimentarios: taller de sedimentología con arenas como actividad didáctica de Ciencias de la tierra

Para determinar objetivamente la distribución de los tamaños de los granos en las rocas detríticas, se debe realizar un proceso de cribado, mediante el cual se establece un grado de desviación de tamaños encontrados a partir del máximo estadístico.

Por la insuficiencia de equipos necesarios para realizar este procedimiento se utiliza la distribución granulométrica del agregado según los requerimientos de INVÍAS para material de subbase antes señalados.

La cualificación de la dispersión en los tamaños de los clastos que componen las muestras de agregado, se estableció siguiendo la siguiente ilustración.

Ilustración 8. Grado de dispersión



Fuente. Tucker, M. E. (2009). Sedimentary petrology: an introduction to the origin of sedimentary rocks. John Wiley & Sons.

Desde la meteorización hasta la depositación final de un sedimento puede observarse que no todos los minerales se comportan de igual manera ante la destrucción química ya que algunos se mantienen inalterados mientras que otros no. Debido a ello durante el proceso de sedimentación la composición mineralógica original evoluciona hacia un producto final estable. Se pudo determinar que en general el orden de estabilidad de los minerales es inverso a la serie de Bowen, así la olivina se altera más fácilmente que la mica y que el cuarzo es un mineral muy resistente. Podemos concluir que la composición de la fracción clástica refleja entonces el grado de destrucción sufrido por la roca ya que éste estará constituido solo por aquellos minerales más estables. Generalmente se toma una relación entre la cantidad de cuarzo y feldespato como índice de madurez mineralógica de la roca.

Así una arcosa, roca compuesta por feldespato potásico mayormente, tiene un índice bajo, cercano a 1, mientras que una cuarzoarenita compuesta casi exclusivamente por cuarzo, es elevado, superior a 10. La importancia geológica radica en que indican que la composición de la fracción clástica de una sedimentita no depende solamente de la composición de la roca original sino también de la intensidad y el tiempo con que actuaron los procesos destructivos durante la sedimentación.

La textura, principalmente la redondez, evoluciona durante la sedimentación, se dice que son texturalmente maduros los clastos que están bien redondeados. Generalmente, los sedimentos con alto índice de madurez mineralógico, son también textualmente maduros.⁷³

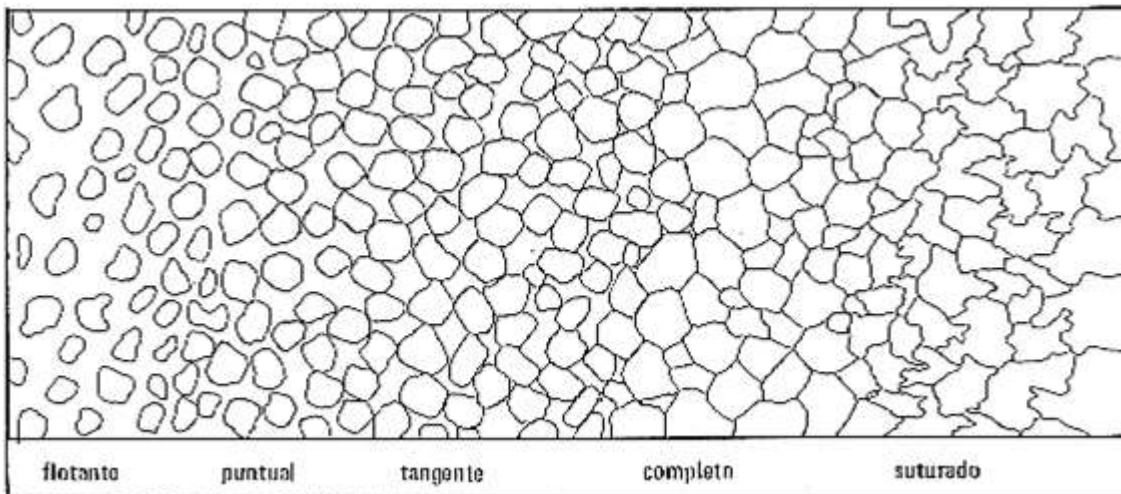
La matriz y cemento los cuales son los elementos que dan cohesión al sedimento, generalmente presentan una composición mineralógica similar a los clastos que soportan y están constituidas por un tamaño de grano menor al de los detritos presentes en la roca. La cantidad de matriz que presenta el agregado es una

⁷³ BARREDO, Silvia. ROCAS SEDIMENTARIAS. [en línea]. [citado en 17 de enero de 2017]. Disponible en <http://introgeo.gl.fcen.uba.ar/Introduccion/Tprocyestrucsedim/TProcyestrucsediment.PDF>>

característica importante pues incide bastante en el comportamiento y resistencia mecánica que tendrá el material ante acciones abrasiones o fuerzas destructivas.

El empaquetamiento de los clastos, establecido como la proporción de espacios vacíos o rellenos por matriz existente entre los clastos, es determinado de manera subjetiva según la densidad de empaquetamiento que proporciona una noción de los puntos de contacto entre los clastos. (Ver ilustración 12)

Ilustración 47. Grado de empaquetamiento



Fuente. Tucker, M. E. (2009). Sedimentary petrology: an introduction to the origin of sedimentary rocks. John Wiley & Sons.

En cuanto a la determinación de los componentes mineralógicos de los agregados se utilizan las siguientes propiedades físicas:

- **Dureza:**

Se conoce así al grado de resistencia que presenta un mineral a la deformación mecánica. Esta es determinada cualitativamente mediante el uso de la escala de Mohs⁷⁴

⁷⁴ W. Griem. Propiedades físicas de los minerales. [en línea]. [citado en 17 de enero de 2017]. Disponible en internet. < <http://www.geovirtual2.cl/geologiageneral/ggcap02a.htm>>.

- **Brillo:**

“Definido como la capacidad del mineral de reflejar la luz incidente”⁷⁵

Color, determinado según la carta de colores presentada por Munsell.⁷⁶

Siguiendo estos lineamientos se recopilan los siguientes datos para el triturado proveniente de Carmen de Carupa.

5.1. TRITURADO DE CARMEN DE CARUPA

Muestra	Tipo de roca	Descripción general	Minerales identificados
Agregado 1	Fragmento de roca	Roca bien redondeada discoidal, altamente consolidada con gran contacto intergranular, de muy buena selección, alta madurez composicional y textural. Color predominante 5Y 7/2 No presenta reacción con el ácido	Cuarzo
Agregado 2	Fragmento de roca	Roca bien redondeado subdiscoidal muy bien consolidada con gran contacto intergranular, empaquetamiento suturado, de muy buena selección, alta madurez textural y composicional. Presenta óxido. Color predominante 10YR 8/2 No reacciona con el ácido	Cuarzo

⁷⁵ Ibit

⁷⁶ MUNSELL COLOR.Geological ROCK COLOR CHART.[en línea]. [citado en 17 de enero de 2017]. Disponible en internet. < http://www.vawaterwellassociation.org/wp-content/uploads/2014/05/Munsell-sample-from-the-munsell-website-CIPA00011_599.pdf>.

Agregado 3	Fragmento de roca	Roca subdiscoidal subredondeada, pobremente consolidada . Con grado de empaquetamiento flotante. De muy buena selección, baja madurez textural y composicional. predominante.	Pirita. Cuarzo. Feldespato
Agregado 4	Fragmento de roca	Roca angulosa subprismática, muy bien consolidada con gran contacto intergranular, empaquetamiento completo. De muy buena selección, alta madurez textural y composicional. Presenta óxido. Color predominante 5Y 6/4 No reacciona con el ácido	Cuarzo
Agregado 5	Fragmento de roca	Roca muy angulosa subprismática, altamente consolidada. Con empaquetamiento suturado. De muy buena selección y gran madurez composicional y textural. Color predominante N4. no presenta reacción con el ácido	Pirita. Cuarzo
Agregado 6	Fragmento de roca	Roca subredondeada subprismática, altamente consolidada con empaquetamiento suturado, moderadamente seleccionada y baja madurez composicional y textural. Color predominante 5Y 5/2. no reacciona con el ácido	Pirita. Cuarzo

Agregado 7	Fragmento de roca	Roca subdiscoidal angulosa altamente consolidada, muy bien seleccionada de empaquetamiento suturado con alta madurez composicional y madurez textural. Color predominante 10 R 8/2. No reacciona con el ácido	Cuarzo
Agregado 8	Fragmento de roca	Roca subprismática redoneada altamente consolidada. Con empaquetamiento tangente presenta alta porosidad y oxidación. Muy bien seleccionada de baja madurez composicional y textural. Color predominante 10YR 2/2. No reacciona con el ácido	Pirita. Cuarzo
Agregado 9	Fragmento de roca	Roca subprismática redoneada altamente consolidada. Con empaquetamiento tangente presenta alta porosidad y oxidación. Muy bien seleccionada de baja madurez composicional y textural. Color predominante 10YR 2/2. No reacciona con el ácido	Pirita. Cuarzo
Agregado 10	Fragmento de roca	Roca sub angulosa sub prismática. muy bien consolidada. De alta madurez textural por su muy buena selección y poca matriz. de alta madurez composicional. Presenta empaquetamiento suturado. Color predominante 10R8/2	Cuarzo. Feldespatos. Pirita

Agregado 11	Fragmento de roca	Roca subangulosa esférica, muy bien consolidada. De muy buena selección. alta madurez textural y composicional. Poco contenido de matriz con empaquetamiento saturado. Color predominante	Cuarzo. Pirita
Agregado 12	Fragmento de roca	Roca altamente consolidada, presenta oxidación. Muy pobremente seleccionada de baja madurez composicional y textural. Forma de grano subprismático subanguloso. Color predominante 5Y 3/2	Cuarzo. Pirita
Agregado 13	Fragmento de roca	Roca subredondeada discoidal, consolidada, muy bien seleccionada de baja madurez composicional y textural. Color predominante 10 R 8/2	Cuarzo.Pirita
Agregado 14	Fragmento de roca	Roca redondeada subprismática. Alta mente consolidada, por su alto contenido de cemento. Muy bien seleccionada de alta madurez composicional y textural. Color predominante 10 YR 6/6	Cuarzo
Agregado 15	Fragmento de roca	Roca bien redondeada prismática cementada, muy bien seleccionada de baja alta madurez composicional y textural. Color predominante N1	Cuarzo

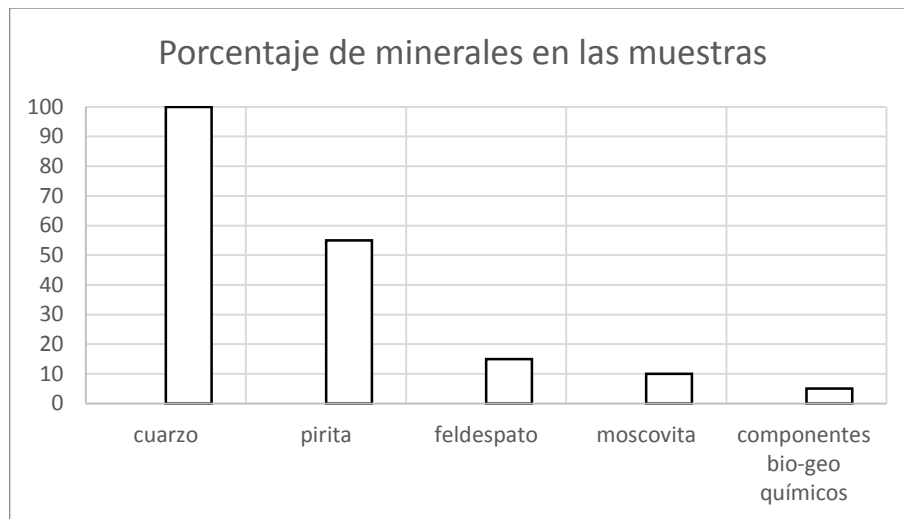
Agregado 16	Fragmento de roca	Roca subredondeada subprismática, pobremente consolidada, presenta empaquetamiento flotante y muestras de óxido. bien seleccionada de baja madurez composicional y textural. Color predominante 5Y 7/2. Esta muestra reacciona con el ácido	Cuarzo. Pirita. Componentes bio-geo químicos
Agregado 17	Fragmento de roca	Roca angulosa subdiscoidal, medianamente consolidada. con pequeñas muestras de oxidación. bien seleccionada de media madurez composicional y textural. Con empaquetamiento puntual y color predominante N4	Cuarzo. Pirita. Feldespato
Agregado 18	Fragmento de roca	Roca subredondeada discoidal, altamente consolidada, muy bien seleccionada, de empaquetamiento saturado de alta madurez composicional y textural. Color predominante N4	Moscovita.Cuarzo
Agregado 19	Fragmento de roca	Roca subangulosa. Subdiscoidal. altamente consolidada, presenta oxidación. Muy bien seleccionada de alta madurez composicional y alta madurez textural. De empaquetameinto saturado y color predominante 10 YR 6/&	Moscovita.Cuarzo

Agregado 20	Fragmento de roca	roca redondeada discoidal, altamente consolidada Muy bien seleccionada de alta madurez composicional y textural.	Cuarzo
-------------	-------------------	--	--------

Fuente. CORBI. Hugo y MARTÍNEZ. Javier. Interpretando ambientes sedimentarios: taller de sedimentología con arenas como actividad didáctica de Ciencias de la tierra

Para las descripciones realizadas a las muestras de mano los minerales pueden encontrarse en los agregados con la frecuencia que se muestra a continuación.

Ilustración 48. Contenido mineralógico en el triturado analizado



Fuente. Propia

A continuación se muestra el detalle de la descripción mineralógica del agregado fino, cuyas muestras corresponden a los nombres de “arena de peña” y “arena de río”.

El material fue analizado mediante el uso del microscopio digital y la lupa de mano, gracias a esto se establece un tamaño de grano para las muestras observadas.

Para establecer una distribución granulométrica se sugiere un parámetro que permita agrupar el tamaño de grano con el cual se pueda determinar una frecuencia asociada a

dicho tamaño. Los tamaños elegidos para el material arena de río oscilan entre 0.2 mm y 2.8 mm con intervalos de 0.2 mm.

5.2. ARENA DE RÍO

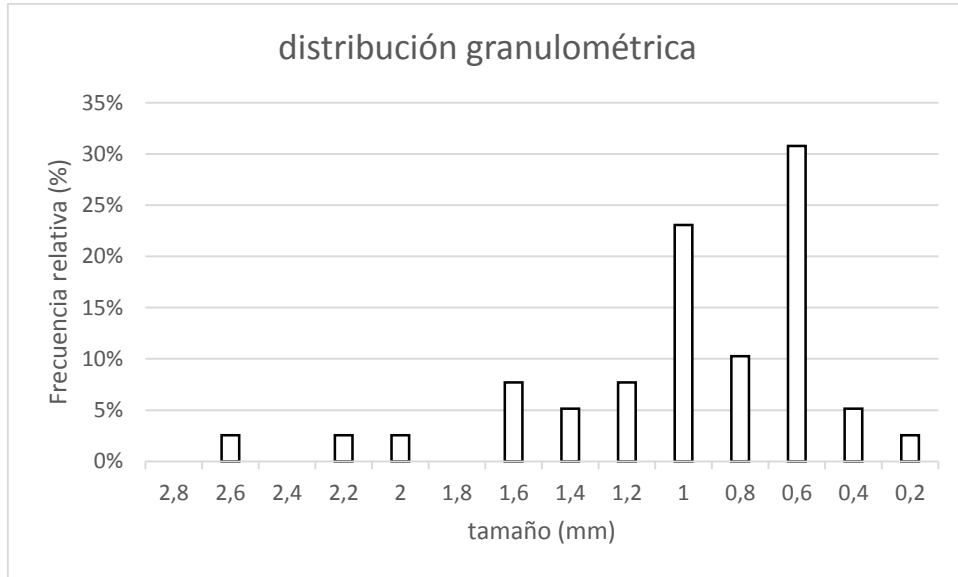
Para el material denominado “arena de río” se recopilaron los siguientes datos:

Tabla 30. Proporción de tamaños arena de río

Distribución granulométrica		
tamaño (mm)	frecuencia acumulada	Frecuencia relativa (%)
2,8	0	0%
2,6	1	3%
2,4	0	0%
2,2	1	3%
2	1	3%
1,8	0	0%
1,6	3	8%
1,4	2	5%
1,2	3	8%
1	9	23%
0,8	4	10%
0,6	12	31%
0,4	2	5%
0,2	1	3%
total de muestras	39	

Fuente. Propia

Ilustración 49. Distribución granulométrica arena de río



Fuente. Propia

La descripción mineralógica realizada con la lupa permite establecer los siguientes resultados para algunas muestras.

Muestra	Tipo de roca	Descripción general	Minerales identificados
Agregado 1	Fragmento de roca	Roca redondeada subprismática, color general 5R 4/2 pobremente consolidada con importante presencia de matriz. Moderadamente seleccionada	Contiene cuarzo y pequeñas cantidades de pirita en grado de empaquetamiento flotante

Agregado 2	Fragmento de roca	Roca muy angulosa subdiscoidal , color general 10R 4/2 Altamente consolidada con poca presencia de matriz. bien seleccionada	Contiene cuarzo y pequeñas cantidades de pirita en grado de empaquetamiento completo
Agregado 3	Fragmento de roca	Roca muy angulosa subprismática , color general 5R 3/4 Altamente consolidada con poca presencia de matriz. Muy bien seleccionada	Se observa contenido de cuarzo en grado de empaquetamiento suturado
Agregado 4	Grano de cuarzo	Roca redondeada discoidal , color general 10YR 8/2 bajamente consolidada con alta presencia de matriz. Muy bien seleccionada	Se observa gran contenido de cuarzo en grado de empaquetamiento flotante
Agregado 5	Fragmento de roca	Roca angulosa subdiscoidal, color general 10R 6/2 muy bien consolidada con baja presencia de matriz. Muy bien seleccionada	Se observa contenido de cuarzo en grado de empaquetamiento tangente

Agregado 6	Fragmento de roca	Roca redondeada subprismática, color general 5YR 8/1 moderadamente consolidada con media presencia de matriz. bien seleccionada	Se observan muestras de oxidación, contenido de pirita y cuarzo en grado de empaquetamiento tangente
Agregado 7	Fragmento de roca	Roca muy angulosa discoidal, color general 5YR 5/2 bajamente consolidada con alta presencia de matriz. Muy bien seleccionada	Se observan contenido de pirita y cuarzo en grado de empaquetamiento flotante
Agregado 8	Fragmento de roca	Roca muy angulosa discoidal, color general 5R 4/2 altamente consolidada con poca presencia de matriz. Muy bien seleccionada	Se observan pequeñas cantidades de cuarzo de empaquetamiento suturado
Agregado 9	Fragmento de roca	Roca redondeada prismática, color general 5R 6/2 altamente consolidada con poca presencia de matriz. Muy bien seleccionada	Minerales irreconocibles

Agregado 10	Fragmento de roca	Roca muy angulosa discoidal, color general 5R 2/2 altamente consolidada con poca presencia de matriz. Muy bien seleccionada	Se observa poco contenido de cuarzo en grado de empaquetamiento suturado
Agregado 11	Fragmento de roca	Roca subredondeada subdiscoidal, color general 5YR 5/2 altamente consolidada con poca presencia de matriz. Muy bien seleccionada	Minerales irreconocibles
Agregado 12	Fragmento de roca	Roca subangulosa subdiscoidal, color general 10YR 8/6 bajamente consolidada con alta presencia de matriz. Muy bien seleccionada	Minerales irreconocibles
Agregado 13	Fragmento de roca	Roca redondeada prismática, color general 5Y 7/2 altamente consolidada con poca presencia de matriz. Muy bien seleccionado	Se observa contenido de cuarzo en grado de empaquetamiento tangente

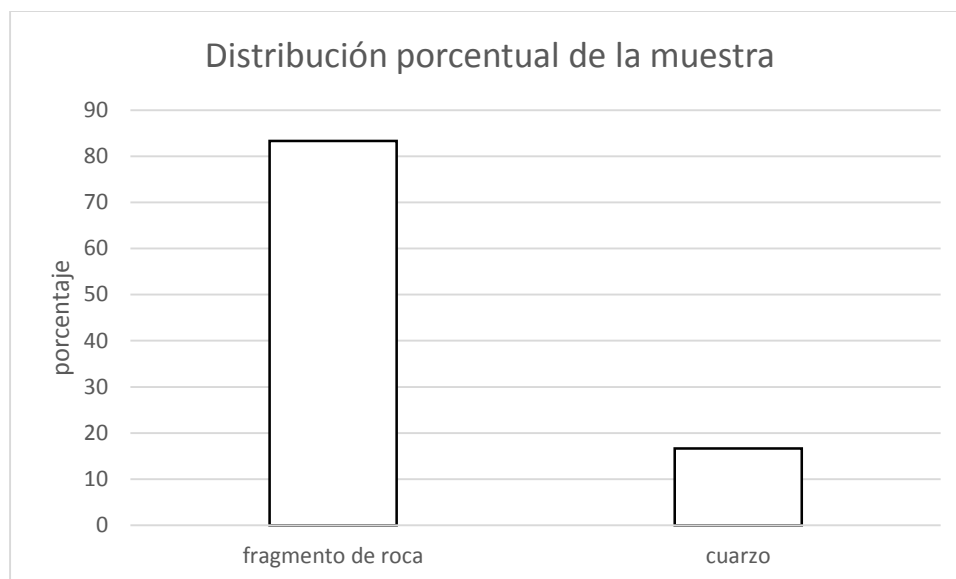
Agregado 14	Fragmento de roca	Roca subangulosa subprismática, color general 10R 4/2 altamente consolidada con poca presencia de matriz. Muy bien seleccionada	Minerales irreconocibles
Agregado 15	Grano de cuarzo	Roca subangulosa subdiscoidal, color general 10YR 8/6 bajamente consolidada con alta presencia de matriz. Muy bien seleccionada	Gran contenido de cuarzo en empaquetamiento flotante
Agregado 16	Fragmento de roca	Roca redondeada subprismática, color general 10YR 8/6 bajamente consolidada con alta presencia de matriz. pobremente seleccionada	Minerales irreconocibles

Agregado 17	Fragmento de roca	Roca subredondeada discoidal, color general 10YR 7/4 altamente consolidada con poca presencia de matriz. Muy bien seleccionada	Minerales irreconocibles
Agregado 18	Grano de cuarzo	Roca subangulosa subdiscoidal, color general 10YR 8/6 altamente consolidada con baja presencia de matriz. Muy bien seleccionada	Gran contenido de cuarzo en empaquetamiento suturado

Fuente. CORBI. Hugo y MARTÍNEZ. Javier. Interpretando ambientes sedimentarios: taller de sedimentología con arenas como actividad didáctica de Ciencias de la tierra

Tratándose de la composición mineralógica de las muestras anteriormente mencionadas se puede establecer la siguiente distribución, mediante la observación de las muestras de mano mediante la lupa.

Ilustración 50. Contenido mineralógico arena de río



Fuente. Propia

La forma de grano observado con la ayuda del microscopio se detalla a continuación.

Tabla 31. Descripción muestras de arena de río

	forma	Color
muestra 1	Muy anguloso. Subdiscoidal	10YR8/2
muestra 2	subredondeado subprismático	N1
muestra 3	redondeado subdiscoidal	5BG 6/6
muestra 4	redondeado subdiscoidal	5BG 6/7
muestra 5	redondeado esférico	5Y 4/4
muestra 6	redondeado subprismático	10Y4/2
muestra 7	subangulosos esférico	5BG4/6
muestra 8	redondeado subdiscoidal	5BG4/6
muestra 9	subanaguloso subdiscoidal	5BG4/6
muestra 10	subredondeado discoidal	5BG4/6
muestra 11	redondeado esférico	5BG4/6
muestra 12	redondeado subdiscoidal	5BG4/6
muestra 13	subredondeado esférico	5BG4/6

Tabla 32. Descripción de muestras de arena de río (continuación)

muestra 14	subredondeado subprismático	5BG4/6
muestra 15	subredondeado subprismático	5BG4/6
muestra 16	subredondeado subprismático	N1
muestra 17	subanaguloso subprismático	5PB3/2
muestra 18	subanaguloso subprismático	N1
muestra 19	angulosos subdiscoidal	5PB3/2
muestra 20	subredondeado subesférico	N1
muestra 21	subredondeado subesférico	5BG6/6
muestra 22	anguloso subdiscoidal	5BG6/6
muestra 23	anguloso subprismático	5BG6/6
muestra 24	subanguloso subdiscoidal	5BG6/6
muestra 25	redondeado esférico	5BG6/6
muestra 26	redondeado subesférico	5BG6/6
muestra 27	subredondeado prismático	5BG6/6
muestra 28	subredondeado subprismático	N1
muestra 29	redondeado subdiscoidal	5BG6/6
muestra 30	redondeado subprismático	5BG6/7
muestra 31	redondeado subprismático	5PB5/2
muestra 32	redondeado esférico	5BG6/7
muestra 33	subredondeado esférico	5PB5/2
muestra 34	subredondeado subdiscoidal	5PB5/2
muestra 35	subdiscoidal anguloso	5PB5/2
muestra 36	redondeado esférico	10YR8/2
muestra 37	redondeado discoidal	N1
muestra 38	redondeado subdiscoidal	N1
muestra 39	subangulosos subdiscoidal	N1

En la imagen siguiente se puede apreciar una ilustración general de la muestra analizada

Ilustración 51. Arena de río, microscopio digital



Fuente. Propia

5.3. ARENA DE PEÑA

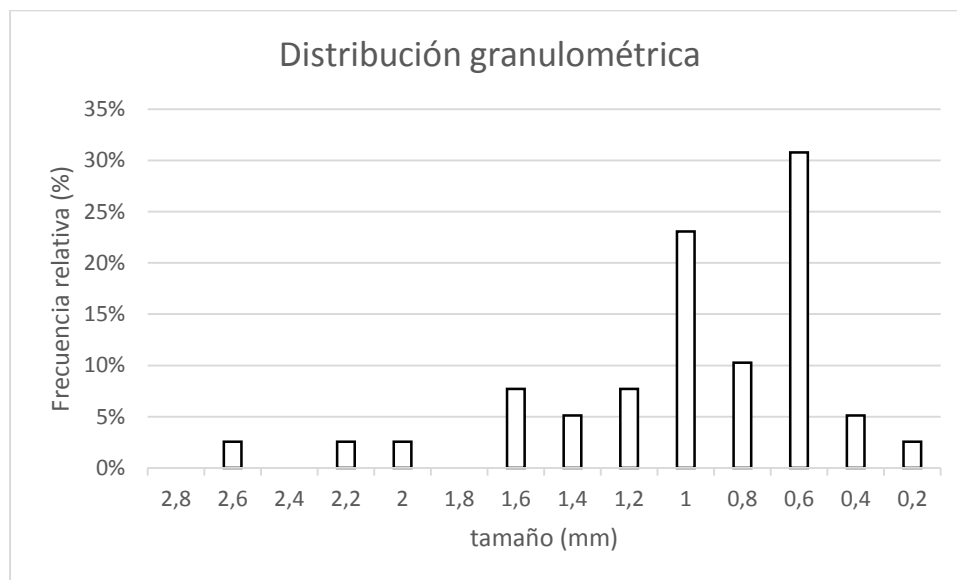
Tratándose del material denominado “arena de peña” se obtuvo la distribución de tamaños que se aprecia a continuación, donde la variación de tamaño sugerida se presenta en intervalos de 0.025 mm en un rango establecido entre 0.05 mm y 0.375 mm.

Tabla 32. Frecuencia de tamaños arena de peña

Tamaño (mm)	Frecuencia acumulada	Frecuencia realtiva (%)
0,375	1	5%
0,35	0	0%
0,325	0	0%
0,3	0	0%
0,275	0	0%
0,25	0	0%
0,225	0	0%
0,2	2	10%
0,175	1	5%
0,15	3	14%
0,125	6	29%
0,1	5	24%
0,075	3	14%
0,05	0	0%
total de muestras	21	

Fuente. Propia

Ilustración 52. Distribución de tamaños arena de peña



Fuente. Propia

La forma de los granos se consigna en la siguiente tabla.

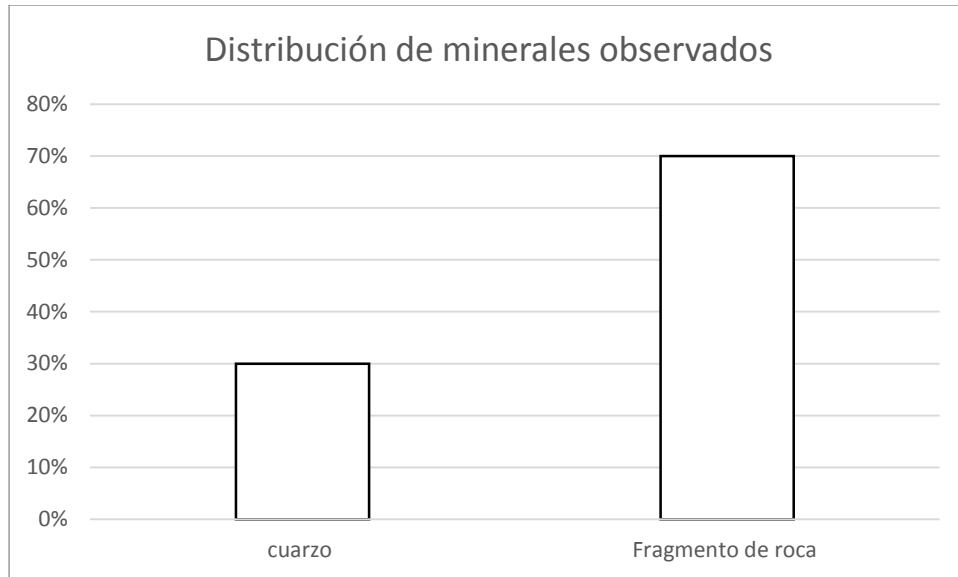
Tabla 33. Forma de granos arena de peña

	forma	Color
muestra 1	muy anguloso. Subdiscoidal	5Y 8/4
muestra 2	subredondeado subprismático	5Y 8/1
muestra 3	redondeado subdiscoidal	5Y 8/4
muestra 4	redondeado subdiscoidal	10YR 8/2
muestra 5	redondeado esférico	5Y 8/1
muestra 6	redondeado subprismático	5Y 8/4
muestra 7	subangulosos esférico	5Y 8/1
muestra 8	redondeado subdiscoidal	10YR 8/6
muestra 9	subanaguloso subdiscoidal	5Y 8/1
muestra 10	subredondeado discoidal	10YR 8/2
muestra 11	redondeado esférico	10YR 8/2
muestra 12	redondeado subdiscoidal	5Y 8/1
muestra 13	subredondeado esférico	10YR 8/2
muestra 14	subredondeado subprismático	10Y 8/2
muestra 15	subredondeado subprismático	5Y 8/4
muestra 16	subredondeado subprismático	5Y 8/4
muestra 17	subanaguloso subprismatico	10YR 8/2
muestra 18	subanaguloso subprismatico	10YR 8/2
muestra 19	angulosos subdiscoidal	10YR 8/6
muestra 20	subredondeado subesférico	10YR 8/2
muestra 21	subredondeado subesférico	10YR 8/6

Fuente. Propia

Con base en los resultados obtenidos se estableció una proporción de minerales en las muestras observadas

Ilustración 53. Mineralogía arena de peña



Fuente. Propia

La imagen a continuación, permite apreciar la ilustración de la muestra anteriormente tratada.

Ilustración 54. Arena de peña, microscopio digital



Fuente. Propia

6. IDENTIFICACIÓN DE MINERALES

6.1. ARENA DE RÍO

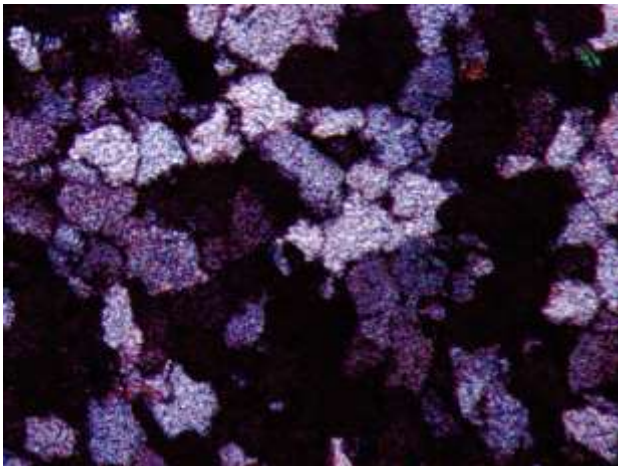
Según la observación al microscopio realizada por el docente asesor se encontró que el material denominado arena de río presenta composición básica de fragmentos de roca ígnea. A su vez se identifican agregados de rocas areniscas constituidas por cuarzo con evidencias de fracturamiento, contenido de matriz arcillosa y muestras de óxido de hierro y cristales aislados de zircón.

La biotita, el anfíbol y la plagioclasa también están presentes.

De igual forma el agregado metamórfico se evidencia con cristales orientados de grano muy fino constituidos por filosilicatos, moscovita y cuarzo.

Imágenes capturadas con el microscopio petrográfico pueden apreciarse a continuación

Ilustración 55. Agregado de arenisca



Fuente. Propia

Ilustración 56. Muestra de zircón

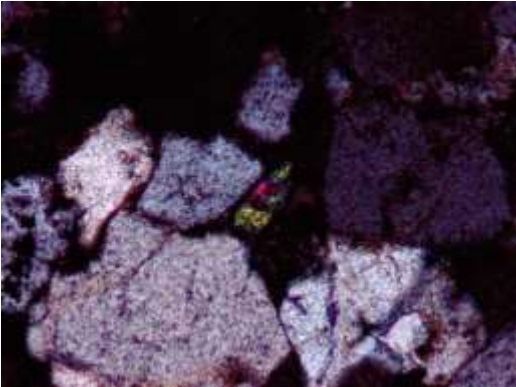


Ilustración 57. Cristal grano de horblenda

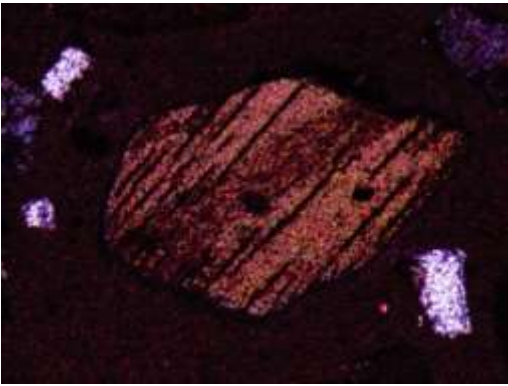
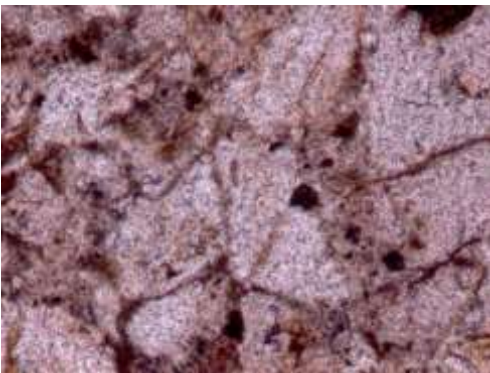


Ilustración 58. Matriz arcillosa y cuarzo



Fuente. Propia

Ilustración 59. Cuarzo ondulante

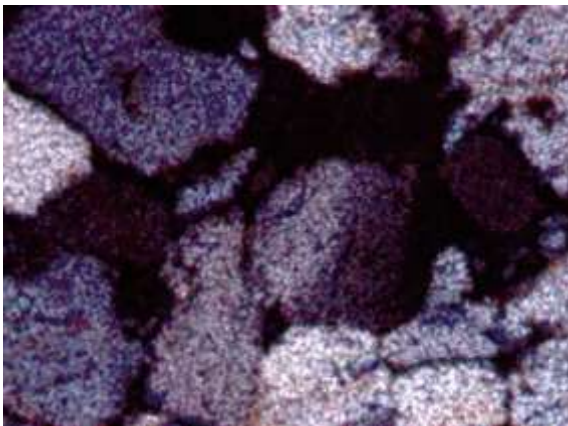
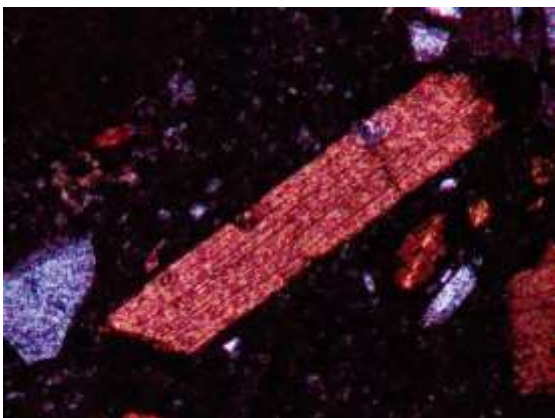


Ilustración 60. Biotita



Fuente. Propia

El análisis de la difracción de rayos x del montaje en polvo de la muestra arroja los resultados mostrados a continuación.

Tabla 34. Proporción mineralógica arena de río

PORCENTAJE EN PESO		
Mineral	fórmula química	Arena de río
Cuarzo	SiO ₂	54,34
Caolinita	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	5,74
Ilita	(K,H ₃ O)(Al,Mg.Fe) ₂ (Si.Al) ₄ O ₁₀	4,94
Albita	NaAlSi ₃ O ₈	34,98

Fuente. Datos entregados por laboratorio GMAS S.A.S

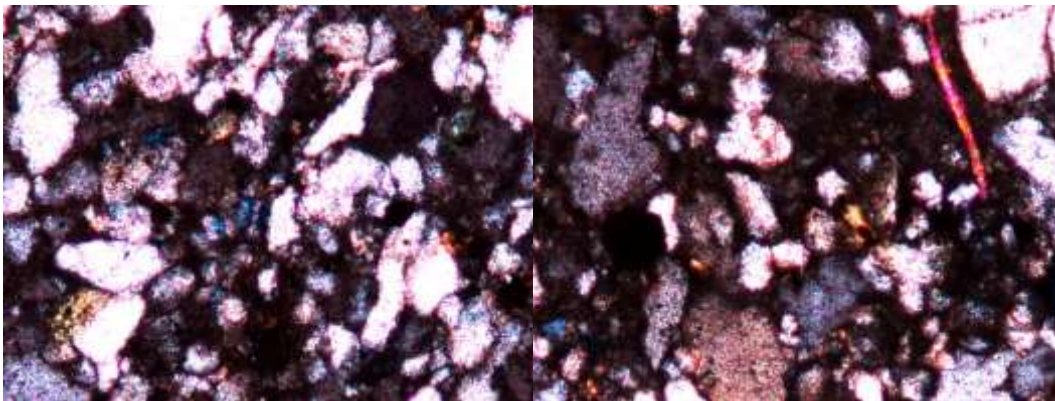
6.2. TRITURADO

La observación en el microscopio permite notar la presencia de fragmentos de roca sedimentaria (limolita o arcillolita) con evidencias de oxidación. Agregados de arenisca constituidos por cristales de cuarzo mayor al 90% en contenido y cristales de moscovita.

De igual manera presenta aisladamente cristales de zircón.

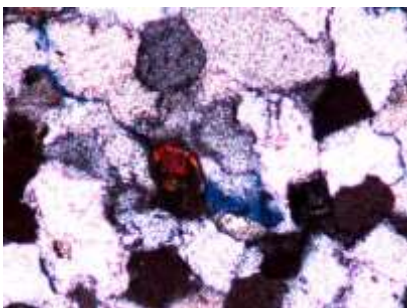
Imágenes observadas en el microscopio se muestran a continuación

Ilustración 61 Agregado de arenisca



Fuente. Propia

Ilustración 62. Zircón



Fuente. Propia

Ilustración 63. Moscovita



Ilustración 64. Agregado de arenisca



Fuente. Propia

El análisis de la difracción de rayos x del montaje en polvo de la muestra arroja los siguientes datos.

Tabla 35. Proporción mineralógica triturado

PORCENTAJE EN PESO		
Mineral	Fórmula química	Triturado
Cuarzo	SiO ₂	76,93
Caolinita	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	15,14
Ilita	(K,H ₃ O)(Al,Mg.Fe) ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀	4,02
Calcita	CaCO ₃	3,91

Fuente. Datos entregados por laboratorio GMAS S.A.S

6.3. ARENA DE PEÑA

Se observa gran abundancia de cristales de cuarzo, algunos cristales de moscovita y aisladamente cristales de zircón.

El análisis de la difracción de rayos x del montaje en polvo de la muestra permite obtener estos resultados (ver tabla 38).

Tabla 36. Proporción mineralógica arena de peña.

PORCENTAJE EN PESO		
Mineral	fórmula química	Arena de peña
Cuarzo	SiO ₂	90,5
Caolinita	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	3,58
Illita	(K,H ₃ O)(Al,Mg.Fe) ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀	5,92

.Fuente. Datos entregados por laboratorio GMAS S.A.S

7. INCIDENCIA DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS AGREGADOS EN EL COMPORTAMIENTO DEL PAVIMENTO

Existen problemas asociados al uso de materiales deletéreos, componentes de los agregados a utilizarse pueden conllevar a un detrimento de la funcionalidad de la estructura vial, cuando se encuentran bajo condiciones determinadas.

Este es el caso de la reactividad álcali-agregado, el cual constituye un fenómeno que conlleva a la destrucción del material de construcción. El cual se origina debido a la reacción de álcalis con agregados reactivos en presencia de elevados contenidos de humedad⁷⁷. Esta combinación genera un gel, que posteriormente se expande y termina agrietando el material.

A pesar de ser un problema especialmente relevante en el concreto, en las capas granulares del pavimento puede ser importante, al ser un fenómeno de acción progresiva y de origen endógeno, para el cual las acciones que pueden ser realizadas son meramente preventivas.⁷⁸

Este evento desfavorable puede hacerse latente en estructuras granulares de pavimento. Cuando existe la presencia de aguas alcalinas en el lugar de la obra o cuando álcalis provenientes de minerales como el feldespato reaccionan con sílice reactiva en condiciones de humedad.

Los materiales aquí propuestos para la mezcla de subbase, están compuestos por minerales como el cuarzo, la caolinita, illita, calcita, feldespatos como la albita, zircón, anfíbol, plagioclasa y filosilicatos como biotita y moscovita.

Las observaciones realizadas con el microscopio electrónico permiten encontrar en todos los materiales, la presencia de cuarzo, el cual constituye un agente que puede conllevar a la reacción álcali sílice como lo señala en su texto, Lanza⁷⁹. Son

⁷⁷ MELO JIMÉNEZ. Leydi Johanna. REACTIVIDAD ÁLCALI-AGREGADO (RAA) EXPERIENCIAS EN PRESAS COLOMBIANAS, ANÁLISIS COMPARATIVO DE PRINCIPALES VARIABLES QUE INTERVIENEN EN EL FENÓMENO. [En línea]. [citado en 7 de julio de 2017]. Disponible en internet < <http://www.bdigital.unal.edu.co/47230/1/leidyjohannamelojimenez.2014>>

⁷⁸ Ibid

⁷⁹ LANZA. Víctor. ESTUDIO DE LA REACTIVIDAD ÁLCALI-SÍLICE ORIGINADA POR COMPONENTES REACTIVOS MINORITARIOS. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID. Madrid, 2012. Pag 31.

formas de sílice reactivas el ópalo, tridimita, cristobalina, vidrio volcánico, calcedonia, cuarzo microcristalino y criptocristalino, el cuarzo altamente deformado y microfracturado también son componentes reactivos.

Como lo establece Lanza ⁸⁰. Para que se produzca la reacción álcali-sílice es necesario que se den, de forma conjunta, distintos factores: presencia en cantidad suficiente de componentes silíceos reactivos en los áridos, concentración de álcalis suficientes en la disolución de los poros, presencia de agua y temperatura suficiente para que la reacción química se produzca.

De igual manera R N Swamy⁸¹ señala que un pequeño volumen de contenido de sílice reactiva es necesaria para que la reacción álcali-sílice tenga lugar, pues existen reportes donde un 2% de contenido de sílice reactiva es suficiente para que se produzca este fenómeno. Existe una gran variedad de rocas utilizadas como agregados para el concreto, con la excepción de variedades particularmente puras como ciertas calizas, muchas de ellas puede tener pequeñas porciones de sílice reactiva que serán suficientes para generar problemas en el concreto; es por tanto sobre la base de un registro de servicio o datos de ensayo cuidadosos, que la gran mayoría del agregado puede ser declarado no reactivos en hormigones que contienen alta concentración de álcalis. De igual manera no puede considerarse un tipo de roca como reactiva, la característica fundamental que hace a una roca reactiva depende de la naturaleza de sus minerales.

Se han encontrado que ciertos granitos, gneises graníticos, corneanas y grauvacas resultan nocivos al utilizarse para concreto, como también se sabe por medio del uso de un microscopio polarizado que los granos de cuarzo que presentan sombras de tensión son agentes reactivos, pues la extensión de la sombra de tensión, será una indicador del nivel de los esfuerzos geológicos a los que la roca ha sido sometida, lo que permite evidenciar un proceso de recristalización y la formación de cuarzo criptocristalino, el cual es un mineral reactivo.

Como el cuarzo microfracturado abunda en los agregados dispuestos para la mezcla para sub base y los feldspatos también contenidos en estos áridos pueden liberar álcalis que resulten nocivos, debe considerarse la humedad como una variable decisiva sobre la cual incidir, es así como la granulometría idónea y

⁸⁰ LANZA. Victor. ESTUDIO DE LA REACTIVIDAD ÁLCALI-SÍLICE ORIGINADA POR COMPONENTES REACTIVOS MINORITARIOS. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID. Madrid, 2012. Pag 31.

⁸¹ R N Swamy. The Alkali-Silica Reaction in Concrete. [en línea]. [citado en 03 de Agosto de 2017]. Disponible en internet <https://books.google.com.co/books?id=p8--3BiBbYMC&source=gbs_navlinks_s>

las obras de drenaje pueden ayudar a mitigar que este fenómeno se haga latente en el pavimento.

Según Lanza⁸² la capacidad de expansión de los productos de reacción está relacionada con la cantidad de CaO del gel.

Lanza⁸³. También señala que “Otro elemento químico que tiene influencia en la reacción álcali-sílice es el aluminio, el cual afecta a la concentración de sílice disuelta en los poros del hormigón. El resultado es siempre la disminución de la concentración de sílice en la disolución de los poros debido a la formación de aluminosilicatos. La expansión del hormigón se correlaciona con el contenido en sílice libre que aporta el árido, siendo este valor el de la sílice soluble del árido menos la que reacciona con el aluminio”⁸⁴.

Sumado al cuarzo microfracturado, se encuentra cuarzo que presenta extinción ondulante, lo cual evidencia alteración previa y la superposición de pequeños granos en forma de cuña.⁸⁵

Como lo menciona Lanza⁸⁶. Existe una correlación entre el aumento de la reactividad del cuarzo y la disminución del tamaño de grano. El tamaño de grano fino aumenta la reactividad al facilitar el acceso a las disoluciones alcalinas a lo largo de los bordes del cristal.

Bajo este concepto se puede establecer que las arenas aquí analizadas pueden ser agentes que contribuyen a la reacción álcali-sílice.

El contenido de calcita en los materiales puede incidir en la manifestación de reacciones álcali-carbonato. La cual ocurre cuando agregados dolomíticos entran en contacto con álcalis del cemento o carbonatos, originándose gel expansivo con consecuencias similares a la reacción álcali-sílice⁸⁷.

⁸² ibid

⁸³ ibid

⁸⁴ ibid

⁸⁵ ASOCIACIÓN GEOLÓGICA ARGENTINA. REVISTA ASOCIACIÓN GEOLÓGICA ARGENTINA. Volumen 52. Buenos Aires. Argentina. 318p

⁸⁶ LANZA. Víctor. ESTUDIO DE LA REACTIVIDAD ÁLCALI-SÍLICE ORIGINADA POR COMPONENTES REACTIVOS MINORITARIOS. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID. Madrid, 2012. Pag 31.

⁸⁷ MELO JIMÉNEZ. Leydi Johanna. REACTIVIDAD ÁLCALI-AGREGADO (RAA) EXPERIENCIAS EN PRESAS COLOMBIANAS, ANÁLISIS COMPARATIVO DE PRINCIPALES VARIABLES QUE

Los caolines y el metacaolín el cual es generado a partir del tratamiento térmico controlado del anterior mineral, cuando se adicionan al mortero mejoran el desempeño mecánico y la durabilidad, debido a que al combinarse con el hidróxido de calcio, procedente de la hidratación del cemento genera un material de silicatos de calcio, sílico-aluminatos y aluminatos de calcio hidratados, el cual es un gel que reduce la porosidad del concreto disminuyendo su permeabilidad y aumentando su durabilidad⁸⁸.

Por otra parte los minerales exfoliables como la biotita y moscovita identificados en la observación con el microscopio en la arena de peña, constituyen planos de debilidad que ante fuerzas actuantes en la dirección adecuada, generan rotura en superficies planas. Esto hace que ante el tránsito vehicular y la consecuente disipación de esfuerzos los minerales puedan verse alterados, pudiendo cambiar así las características globales de la capa de pavimento.

En síntesis los minerales encontrados con base en las observaciones con microscopio electrónico y ensayos sobre sección de lámina delgada pueden encontrarse en la siguiente tabla.

INTERVIENEN EN EL FENÓMENO. [En línea]. [citado en 19 de abril de 2017]. Disponible en internet < <http://www.bdigital.unal.edu.co/47230/1/leidyjohannamelojimenez.2014>>

⁸⁸ TORRES. Janeth. INFLUENCE OF THE MINERALOGICAL COMPOSITION OK KAOLINS ON THE PERFORMANCE OF ADDED MORTARS WITH MK. Universidad Nacional. [En línea]. [citado en 20 de julio de 2017]. Disponible en internet < <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v74n153/a07v74n153.pdf>>

Tabla 37. Minerales presentes en los áridos

MINERAL	PRESENTE EN	CARACTERÍSTICA INCIDENTE	OBSERVACIONES FUNCIONALES
biotita	arena de río	filosilicato de hierro y aluminio	
anfíbol	arena de río	Inosilicato	
cuarzo	arena de río, arena de peña y triturado	cuarzo deformado, microcristalino o policristalino	incide en la reactividad álcali-sílice
moscovita	arena de río , arena de peña y triturado	aluminosilicato	
zircón	arena de río, arena de peña y triturado	silicato de zirconio	
caolinita	arena de río, arena de peña y triturado	presencia de caolín	aumenta resistencia del concreto y reduce su porosidad
ilita	arena de río, arena de peña y triturado	silicato laminar	arcilla no expansiva
albita	arena de río	feldespato	puede liberar álcalis que conlleven a RAA
calcita	triturado	presencia de carbonatos	incide en la reactividad álcali-carbonato

8. CONCLUSIONES

Los ensayos mecánicos ejecutados demuestran que la mezcla de los materiales pétreos analizados no cumplen a cabalidad todos los requerimientos necesarios según lo establecido por INVÍAS para subbase.

En general las muestras presentan buena limpieza, por su bajo contenido en material arcilloso, el cual es catalogado como un elemento indeseable en pavimentos, por su alta capacidad para retener agua y la consecuente expansión volumétrica que esta puede presentar. Sin embargo las arcillas presentes en los materiales acá analizados presentan baja reactividad. A su vez las bajas cantidades encontradas luego de realizar los ensayos mineralógicos, puede que no incidan en un contundente debilitamiento del agregado.

En cuanto a la durabilidad, el ensayo de solidez en sulfatos demostró la competencia de los materiales analizados, evidenciando que los cambios volumétricos en los poros permeables de los agregados, se encuentran bajo los límites permitidos; esto admite correlacionar una adecuada estabilidad de los materiales ante cambios de temperatura o intemperie. Así mismo, las descripciones de las muestras de mano permiten observar una alta madurez textural y buena cementación lo que indica la poca porosidad de los materiales.

Tratándose de la dureza de los materiales los ensayos de desgaste demuestran que los materiales no cumplen con los requerimientos solicitados por INVÍAS, a pesar de tener grandes cantidades de minerales resistentes como el cuarzo.

Bajo ciertas condiciones, los materiales estudiados contienen importantes cantidades de agentes nocivos según sea el uso del material; por ejemplo el cuarzo deformado contenido en los agregados manifiesta una baja adherencia con el asfalto, lo que dificulta su utilidad para mezclas asfálticas. A su vez este mismo mineral puede conllevar a la manifestación de la reacción álcali-sílice, ya sea porque los agregados se combinen con cemento, que se utilice en la obra o porque haya presencia de aguas alcalinas o también porque el feldespato contenido en los agregados libere álcalis que puedan reaccionar con la sílice reactiva. Cabe mencionar que para que la reacción álcali-sílice pueda manifestarse es menester grandes contenidos de humedad; por lo tanto adecuadas obras de drenaje y cumplir con la granulometría y limpieza requerida para capas de subbase, puede mitigar la manifestación de este fenómeno.

La calcita que hace parte del triturado también puede contribuir a los mismos efectos que ocasiona la reactividad álcali-sílice, esta vez producto de una reacción álcali-carbonato; iguales medidas en el control de la humedad mitigan este posible efecto desfavorable.

El comportamiento mecánico evidenciado y las condiciones de limpieza de los materiales, muestran que la mezcla sugerida está compuesta por materiales que cumplirán con las condiciones de drenaje necesarias, más no con los mínimos requeridos de resistencia y durabilidad, cuando dichos agregados sean utilizados como constituyentes de la capa subbase del pavimento. Como los esfuerzos inducidos por el tráfico aumentan conforme se asciende a la capa de rodadura, se puede inferir que estos materiales no son adecuados para conformar ninguna capa estructural de pavimento. A su vez los materiales presentan un cierto potencial de presentar reacciones álcali agregado, lo que puede incidir sobre la aplicación de estos materiales en otros campos, como la construcción de obras de concreto.

Las técnicas analíticas para la caracterización mineralógica constituyen una poderosa herramienta, que sirve para crear un modelo determinista acerca del posible desempeño posterior que tendrá un material según sea su uso. Se evidencia cómo los métodos de ensayo normalizados y las observaciones realizadas con el microscopio petrográfico, permiten identificar siempre y cuando se tenga la experiencia suficiente, objetivamente los minerales encontrados en los agregados.

9. RECOMENDACIONES

Aunque los materiales esencialmente por sus condiciones de durabilidad no deben ser destinados como elemento de construcción de pavimentos, pueden resultar útiles en diferentes aplicaciones. Si estos áridos se implican en la construcción de obras en concreto deben controlarse las condiciones de humedad o las características del cemento con el fin de que no se puedan hacer latentes las reacciones álcali sílice.

El desconocimiento de las características del área fuente y de los procesos de extracción de los materiales suscita dudas acerca de la fiabilidad de los rasgos encontrados en las muestras depositadas en el acopio, la granulometría, la forma de los granos, la textura y las muestras de óxido encontradas pueden diferir en los materiales analizados en el acopio y los mismos evaluados directamente luego de su extracción en campo. Por lo tanto poseer información relativa al área fuente, disminuye este tipo de incertidumbres.

Para otros usos de los materiales en áreas de la ingeniería, deben realizarse los ensayos mecánicos pertinentes al caso, profundizar y correlacionar estos resultados con los análisis mineralógicos efectuados a estas muestras.

BIBLIOGRAFÍA

<<http://geol00.geol.uniovi.es/TDG/Volumen23/TG23>, SUAREZ DEL RIO et al. Características técnicas de las rocas ornamentales de Asturias. Departamento de Geología. Universidad de Oviedo. [en línea]. [consultado en 15 de enero de 2017]. Disponible en internet. [En línea]

<<http://revistas.uptc>, BECERRA. Javier y COSTA. Gilberto. UNIVERSIDAD FEDERAL DE MINAS GERAIS. ESPECIFICACIONES DE USO DE ROCAS ORNAMENTALES CON BASE EN ENSAYOS DE ALTERACIÓN ACELERADA. . [en línea]. [citado en 03 de agosto de 2017]. Disponible en internet.

<<http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/>, CORBI. Hugo y MARTINEZ. Javier. Interpretando ambientes sedimentarios: taller de sedimentología con arenas como actividad didáctica de Ciencias de la tierra. [en línea]. [citado en 17 de enero de 2017]. Disponible en. [En línea]

<http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/ing_geologo/n17_1980/a01, WOLF. Dieter. LA DIFRACTOMETRÍA DE RAYOS X Y SU APLICACIÓN EN LA GEOLOGÍA Y EL ESTUDIO DE MATERIAS PRIMAS. [en línea]. [citado en 04 de abril de 2017]. Disponible en internet. [En línea]

<<http://www.geologia.uchile.cl/laboratorio-de-espectrometria-de-fluorescencia-de->, DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA UNIVERSIDAD DE CHILE. Laboratorio de espectrometría de fluorescencia de rayos x. [En línea]. [citado en 04 de abril de 2017]. Disponible en internet. [En línea]

<https://books.google.com.co/books?id=p8--3BiBbYMC&source=gbs_navlinks_s>, R N Swamy. The Alkali-Silica Reaction in Concrete. [en línea]. [citado en 03 de Agosto de 2017]. Disponible en internet.

<<https://ssti.ua.es/es/instrumentacion-cientifica/unidad-de-rayos-x/espectroscopia-de-fluorescencia-de-rayos-x.html>>, UNIVERSIDAD DE ALICANTE. ESPECTROSCOPIA DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X. [en línea]. [citado en 04 de abril de 2017]. Disponible en internet. [En línea]

<<https://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos-izq/139>>, INVIAS. NORMAS Y ESPECIFICACIONES 2012. [en línea]. [citado en 04 de abril de 2017]. Disponible en internet. [En línea]

1999, CR. Hallsworth y R W O' B. Knox. BGS GEOLOGICAL SURVEY. Rock classification sediments and sedimentary rocks. [s.n].

2017], JAVIERA VILLALOBOS ORCHARD. Las rocas y sus procesos de formación [en línea]. < <http://www.geologia.uchile.cl/las-rocas-y-sus-procesos-de-formacion>>.[citado en 03 de abril de. [En línea]

22p, DUQUE. Escobar. GEOMECÁNICA PARA INGENIEROS. Cap 1. [s.l]. [s.n].

318p, ASOCIACIÓN GEOLÓGICA ARGENTINA. REVISTA ASOCIACIÓN GEOLÓGICA ARGENTINA. Volumen 52. Buenos Aires. Argentina.

379, Alfonso Montejó Fonseca. Ingeniería de Pavimentos para Carretera. Tomo 1. 2 ed. Bogotá. Universidad Católica de Colombia Ediciones y Publicaciones. 2002. p.

40, BORGES. Ely Frazao. ASSOCIACAO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL Tecnologia de rochas na contrucao civil. [Sao Paulo].[s.n]. 2002. p.

BRAVO. Javier y MONCAYO. Carlos. CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS PÉTREOS DE LA CANTERA AGRESUR VEREDA SAN JOSÉ MUNICIPIO FUNES, DEPARTAMENTO DE NARIÑO Y OBTENCIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE ASFALTO PARA EL DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA MEDIANTE EL “MÉTODO. [En línea]

en, RANGEL. Leidy y SARMIENTO. Mayra. INFLUENCIA DE LAS CARACTERÍSTICAS GRANULOMÉTRICAS Y MINERALÓGICAS DEL FILLER SOBRE LA RIGIDEZ DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS. UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. [en línea]. [consultado en 17 de enero de 2017]. Disponible. [En línea]

[ftp://ftp.unicauca.edu.co/cuentas/harenas/docs/MATERIALES%20I/DOCUMENTO S%20DE%20CONSULTA/](ftp://ftp.unicauca.edu.co/cuentas/harenas/docs/MATERIALES%20I/DOCUMENTO%20S%20DE%20CONSULTA/), OLARTE. Juan. ASPECTOS PETROLÓGICOS DE LOS AGREGADOS PÉTREOS PARA PAVIMENTOS EN COLOMBIA. Cap 9. [en línea]. [consultado en 15 de febrero de 2017]. Disponible en <.

HOBART T, King. What are minerals [en línea]. [citado en 04 de abril de 2017]. Disponible en internet <<http://geology.com/minerals/what-is-a-mineral.shtml>>. [En línea]

<http://civilgeeks.com/2012/06/28/descargar-libro-completo-de-pavimentos/>>, UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN SIMÓN. Facultad de ciencias y tecnologías. [en línea]. [consultado en 02 de febrero de 2017. <Disponible en internet. [En línea]

<http://geoserver.ing.puc.cl/info/conferences/Pan>, BELTRÁN. Gloria. Técnicas de microscopía y petrografía para caracterizar materiales de carreteras. Universidad Nacional de Colombia. [en línea]. [consultado en 17 de enero de 2017]. Disponible en internet <. [En línea]

<http://in>, BARREDO. Silvia. ROCAS SEDIMENTARIAS. [en línea]. [citado en 17 de enero de 2017]. Disponible en <. [En línea]

<http://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/10654/9351/2/Lo>, LONDOÑO. Milena. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FUNCIÓN DE SU ORIGEN Y GRADACIÓN DE AGREGADO PÉTREO. [en línea]. [consultado en 17 de enero de 2017]. Disponible en internet <. [En línea]

http://www.ehu.eus/sem/seminario_pdf/SEMINARI, BERNABÉU. Ana. Utilización de rocas como pavimentos. Departamento de ciencias de la tierra y el medio

ambiente. Universidad de Alicante. [en línea].[consultado en 15 de enero de 2017]. Disponible en internet <. [En línea]

<http://www.geovirtual2.cl/geologiageneral/gg.cap03b.htm>>, MUSEO VIRTUAL GEOLOGÍA. Introducción. Métodos del reconocimiento de rocas. [en línea]. [Citado en 03 de abril de 2017]. <. [En línea]

<http://www.geovirtual2.cl/geologiageneral/ggcap02a.htm>>., W. Griem. Propiedades físicas de los minerales. [en línea]. [citado en 17 de enero de 2017].Disponible en internet. <. [En línea]

<http://www.rocasym minerales.net/los-feldespatos/>>, ROCAS Y MINERALES. LOS FELDESPATOS. [en línea]. [citado en 04 de abril de 2017]. Disponible en internet <. [En línea]

http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-50732009000200002&script=sci_arttext, BARRETO. Miguel. Métodos de evaluación de las reacciones álcali-sílice en hormigones con áridos reciclados. [En línea]. [citado en 19 de abril de 2017].Disponible en internet <. [En línea]

<http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v74n153/a07v74>, TORRES. Janeth. INFLUENCE OF THE MINERALOGICAL COMPOSITION OK KAOLINS ON THE PERFORMANCE OF ADDED MORTARS WITH MK. Universidad Nacional. [En línea]. [citado en 20 de julio de 2017].Disponible en internet <.

http://www.vawaterwellassociation.org/wp-content/uploads/2014/05/Munsell-sample-from-the-munsell-website-CIPA00011_599.pdf>., MUNSELL COLOR.Geological ROCK COLOR CHART.[en línea]. [citado en 17 de enero de 2017]. Disponible en internet. <. [En línea]

<http://www2.uned.es/cristamine/fichas/cuarzo/cuarzo.htm>>, UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA. Cuarzo. [en línea].[citado en 04 de abril de 2017]. Disponible en internet.<. [En línea]

<http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Tema3.MaterialesCONSTRUCCION.PETREOS NATURALES.pdf>, MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN. Tema 3 MATERIALES PÉTREOS NATURALES. [en línea]. [citado en 25 de abril de 2017]. Disponible en internet <.

<https://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos-izq/139-documento-tecnicos/1988-esp>, INVIAS. ESPECIFICACIONES GENERALES DE CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS. Sección 200. INV E-220 -13. [en línea]. [citado en 20 de abril de 2017]. Disponible en internet <.

<https://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos-izq/139-documento-tecnicos/1988-especi>, INVIAS. ESPECIFICACIONES GENERALES DE CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS. CAPÍTULO 3.Artículo 300. [en línea]. [citado en 04 de abril de 2017]. Disponible en internet <. [En línea]

—. [En línea]

<https://www.scribd.com/document/338783310/MANUAL-DE-CARRETERAS-LUIS-BANON-BLAZQUEZ-pdf>>, BANON. Luis. MANUAL DE CARRETERAS. CONSTRUCCIÓN Y MANETENIMIENTO.. [en línea]. [citado en 20 de junio de 2017]. Disponible en internet <.

https://www.ugr.es/~agcasco/msecgeol/secciones/petro/pet_sed.htm>, UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID. Procesos sedimentarios y clasificación de rocas sedimentarias. [en línea]. [citado en 04 de abril de 2017]. Disponible en internet. <. [En línea]

LANZA. Victor. ESTUDIO DE LA REACTIVIDAD ÁLCALI-SÍLICE ORIGINADA POR COMPONENTES REACTIVOS MINORITARIOS. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID. Madrid, 2012. Pag 31.

MELO JIMENEZ. Leydi Johanna. REACTIVIDAD ÁLCALI-AGREGADO (RAA) EXPERIENCIAS EN PRESAS COLOMBIANAS, ANÁLISIS COMPARATIVO DE PRINCIPALES VARIABLES QUE INTERVIENEN EN EL FENÓMENO. [En línea]. [citado en 19 de abril de 2017]. Disponible en internet < <http://ww>.

REGIÓN DE MURCIA DIGITAL. Moscovita. [en línea]. [citado en 05 de abril]. < http://www.regmurcia.com/servlet/s.SI?sit=c,365,m,108&r=ReP-26748-DETALLE_REPORTAJESABUELO>. [En línea]