

Caracterización Mineralógica y Físico Mecánica de los Agregados Pétreos de las Canteras Santa Lucia, Pie Blanco y Mina San Vicente, Usados como Materiales de Construcción

Mineralogical and physical-mechanical characterization
of the stone aggregates of Santa Lucia, Pie Blanco and
San Vicente quarries used as construction materials

Caracterização mineralógica, física e mecânica dos
agregados pétreos das lavras de Santa Lucia, Pie Blanco
e San Vicente, usados como materiais de construção

Daniela Del Pilar Cubides Torres

Ingeniera Civil Universidad Santo Tomas Tunja.
Bachiller del Colegio de Boyacá de Tunja.
Correo electrónico: daniela.cubides@usantoto.edu.co

Evelyn Jimena Molano Amaya

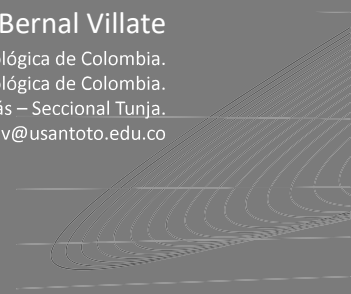
Ingeniera Civil Universidad Santo Tomas Tunja.
Bachiller Técnico Electrónico Instituto Técnico Industrial Rafael Reyes de Duitama.
Correo electrónico: evelyn.molano@usantoto.edu.co

Javier Eduardo Becerra Becerra

Geólogo Universidad Nacional de Colombia.
Doctor PhD y Magister M. Sc en Geología Economía y Aplicada.
Universidad General de Minas Gerais (Brasil).
Docente Investigador. Universidad Santo Tomás – Seccional Tunja.
Correo electrónico: javier.becerra@usantoto.edu.co

Andrés Felipe Bernal Villate

Ingeniero Civil Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
Magister en Geotecnia Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
Docente Investigador. Universidad Santo Tomás – Seccional Tunja.
Correo electrónico: andres.bernalv@usantoto.edu.co



Resumen

Esta investigación se basó en el análisis de agregados finos (arena de peña -AP y arena lavada -AL) tomadas de la mina San Vicente de Tunja, y agregados gruesos de ½" y ¾" provenientes de la cantera Pie Blanco de Paipa (CPB) y cantera Santa Lucía de Cucaita (CSL). Se identificaron, las características texturales y composicionales de los agregados por medio del microscopio de luz polarizada, analizando la susceptibilidad de procesos patológicos desde un enfoque preventivo. Se identificó cuarzo en AL, cuarzo microcristalino y moscovita en CPB, cuarzo microcristalino, calcita cristalina, calcita con bioclastos, en CSL. Se realizaron ensayos físico-mecánicos según normatividad INVÍAS para evaluar condiciones de calidad y resistencia, determinándose que los agregados de CPB y CSL cumplen los requisitos para ser usadas en diferentes obras de ingeniería y en capas de pavimentos convencionales (bases y sub-bases). En cuanto a la AP se recomienda sea usada para pañetes interiores y mampostería; la AL, sea implementada en concretos y estructuras de pavimentos convencionales. Es importante hacer un análisis para identificar minerales susceptibles a reacciones álcali-agregado, basadas en el elevado contenido de cuarzo, que identifique si este mineral presenta características que faciliten la reactividad álcali-sílice con sus consecuencias negativas en estructuras.

Palabras clave: Agregado, cantera, mineralogía, petrografía, caracterización, patologías.

Abstract

Keywords: Aggregate, quarry, mineralogy, petrography, characterization, pathologies.

Resumo

Palavras chave: agregado, pedreira, mineralogia, petrografia, caracterização, patologias.

Para citar este artículo: Cubides-Torres D.P., Molano-Amaya E.J., Becerra-Becerra J.E. & Bernal Villate A.F. "Caracterización mineralógica y físico mecánica de los agregados pétreos de las canteras Santa Lucía, Pie Blanco y mina San Vicente, usados como materiales de construcción". In *L'Esprit Ingénieur*. Vol. 9, p.p. 45-68

INTRODUCCIÓN

Los agregados pétreos son materiales granulares sólidos naturales u obtenidos de trituración de diferentes rocas en granulometrías adecuadas, que se emplean con o sin adición de elementos activos, en la construcción de elementos resistentes en diversas obras de ingeniería, tales como concretos y pavimentos (Buitrago, 2010); es importante diferenciar los tipos de fuentes que se emplean en la producción de agregados para pavimentos y concretos de carreteras (Sociedad Colombiana de Geotecnia, 2003).

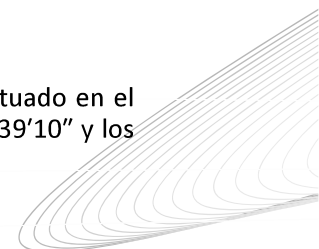
Actualmente los agregados son considerados un factor importante de las obras civiles, por lo cual es esencial el estudio de sus propiedades tanto físico-mecánicas como mineralógicas, con el fin de obtener una aplicación eficiente (Gutiérrez de López, 2003). La durabilidad de los agregados es definida como la capacidad de las partículas individuales de conservar su integridad y no sufrir cambios que afecten de forma negativa sus propiedades o su comportamiento general. Los factores que influyen en la durabilidad de los agregados normalmente se derivan de la naturaleza geológica y de la roca origen. En cuanto a la descripción y caracterización de los constituyentes de una muestra es usualmente, un paso necesario hacia el reconocimiento de las propiedades que puede esperarse influyen el comportamiento del material en su uso propuesto, y valor de cualquier inspección petrográfica dependerá en gran parte de la representatividad de las muestras examinadas, la información completa y exacta que es proporcionada al petrógrafo y la habilidad del analista para correlacionar los resultados de la inspección (Smith y Colhs, 2001).

De esta manera es importante conocer que los agregados constituyen un factor determinante en la economía, durabilidad y estabilidad en las obras civiles pues ocupan un volumen muy importante; por ejemplo, el volumen de los agregados en el concreto hidráulico es de un 65 % a 85 %, en el concreto asfáltico es del 92 % al 96 %, en los pavimentos del 75 % al 90 % (Gutiérrez de López, 2003). De igual manera entre el 65 % y 75 % del volumen del hormigón está ocupado por los agregados, y sus propiedades controlan muchas de las características del hormigón. Respecto del agregado fino (arena), que representan en el orden del 40 % del total de los agregados, sus propiedades pueden afectar al hormigón en estado fresco como endurecido cuándo se requiere elaborar hormigones con un alto nivel de resistencia mecánica o propiedades particulares. Las características de las partículas (forma, textura superficial, tamaño, porosidad y mineralogía) se tornan importantes, especialmente cuando se debe seleccionar o decidir comparativamente su empleo (Cabrera, Ortega y Traversa, 2010).

El presente trabajo es un producto de investigación del proyecto: “Caracterización mineralógica y mecánica de rocas como herramienta para la prevención de procesos patológicos en obras de ingeniería civil y arquitectura” desarrollado por el grupo de investigación ICSOS de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Santo Tomás – Seccional Tunja. Tiene como objetivo estudiar las características mineralógicas y físico mecánicas de los agregados pétreos tomados de las canteras San Vicente, Pie Blanco y Santa Lucía localizadas en el departamento de Boyacá, para garantizar una excelente calidad y resistencia de los materiales; desde el ámbito de la formación y el trabajo interdisciplinar, se pretende que el ingeniero civil conozca las ventajas del uso de la petrografía como herramienta de prevención, identifique los minerales en una sección delgada y reconozca su composición mineralógica, textura y estructura para efectos de control y diagnósticos acertados de prevención de posibles patologías que afecten el comportamiento de las estructuras de concreto y de pavimentos convencionales construidas en el departamento de Boyacá.

LOCALIZACIÓN

Esta investigación se llevó a cabo en el departamento de Boyacá, el cual está situado en el centro del país, sobre la cordillera oriental de los Andes; localizado entre los 04°39'10" y los



07°03'17" de latitud norte y los 71°57'49" y los 74°41'35" de longitud oeste. Cuenta con una extensión de 23.189 km², limita al norte con Santander, Norte de Santander y la República Bolivariana de Venezuela, al oriente con Arauca y Casanare, al sur con el departamento de Cundinamarca, y al occidente con Cundinamarca y Antioquia (Cuy,2015). Una vez determinados los puntos claves del departamento, se toman por objeto de esta investigación, los agregados correspondientes a diferentes fuentes de extracción como son la arena de peña y arena lavada pertenecientes a la mina San Vicente localizada en la vereda Runta Arriba vía Tunja-Villa Pinzón, el triturado de ½" y de ¾" materiales tomados de la cantera Santa Lucia localizada en el suroccidente del municipio de Cucaita, en el kilómetro 19 de la vía que conduce de Tunja a Villa de Leiva y la cantera Pie Blanco ubicada en la vereda la Bolsa en el kilómetro 2 de la vía que conduce del municipio de Paipa a Tunja Boyacá (Véase Figura 1).



Figura 1 . Canteras de extracción del material investigado. Fuente: Autoría propia.

Geología

La estratigrafía del Departamento de Boyacá incluye el estudio y la descripción de 6 grupos litoestratigráficos, 69 formaciones constituidas por rocas sedimentarias, 4 unidades constituidas por rocas metamórficas de bajo a medio grado de metamorfismo; 1 macizo ígneo y 3 pequeños intrusivos, todo lo cual representa un registro litológico que abarca un lapso de tiempo comprendido desde el Devónico hasta el Holoceno Reciente (Ingeominas, 2018).

Mediante la geología y geomorfología de la plancha 191 de Tunja, es posible identificar que los agregados finos (arena de peña y lavada), extraídos de la mina San Vicente provienen de la Formación Labor y Tierna (véase figura 2); así mismo, los agregados gruesos de la cantera Santa Lucia provienen principalmente por la Formación Conejo (véase figura 3); en cuanto a la cantera Pie Blanco esta se encuentra localizada en la plancha 171 de Duitama de donde se extrae el agregado grueso proveniente de la formación Tilatá (véase figura 4).

- *Formación Labor y Tierna (Kg1).*

La Formación Labor y Tierna está compuesta principalmente por shales grises oscuros y areniscas de grano medio a fino; la denominada Arenisca de Labor presenta dureza intermedia, mientras la Arenisca Tierna se caracteriza por conformar horizontes friables característicos. Su espesor estimado en el área es de 170 metros aproximadamente. Se correlaciona con el Grupo Guadalupe de la Sabana de Bogotá. Edad: Maastrichtiano temprano según (Pérez y Salazar ,1978).

La unidad litológica está constituida de arenitas de cuarzo de grano fino a grueso, en capas medias a gruesas con geometría lenticular, esporádicamente, ocurren intercalaciones de lodolitas y limolitas de cuarzo. La unidad aflora con una expresión morfológica fuerte, de laderas pendientes bien inclinadas, de difícil acceso. Espesor de 260 m medido en la Quebrada Nemicé (Rodríguez y Solano, 2000).

- *Formación Conejo (Kscn).*

Esta Formación propuesta por Renzoni G. (1981), está compuesta por areniscas principalmente

intercaladas por Shales negros, limolitas y esporádicamente estratos de calizas, se observan cerca de 280 metros de espesor. Edad: Coniaciano temprano según Etayo (como se citó en Martínez, 1990). Los autores Cáceres y Etayo (1969) la denominan informalmente como “Lodolitas Grises Indenominadas”, mientras que Rodríguez y Ulloa (1991) introducen el término de Formación Conejo. Descripción litológica: según Rodríguez y Ulloa (1991), consta de base a techo de 35 una sucesión de arcillolitas y lodolitas laminadas, a veces calcáreas, con intercalaciones de arcillolitas no calcáreas en capas delgadas a medias, limolitas de cuarzo y cuarzo arenitas de grano fino a medio, especialmente hacia el tope de la unidad. Conformación amplios valles de relieves suaves. Espesor: 400 m estimado con base en perfiles geológicos. Límites estratigráficos: el contacto inferior se ubicó en el techo de una limolita de cuarzo de la Formación La Frontera, mientras que el superior se ubicó en la base de la capa más baja de arenita de cuarzo de la Formación Arenisca Dura (Rodríguez y Solano, 2000).

- *Formación Tilatá (Tst).*

La Formación Tilatá, de edad Plioceno a Pleistoceno, está compuesta por capas de gravas, conglomerados, arenas y arcillas. El espesor estimado es de cerca de 150 metros. Esta Formación yace discordantemente sobre unidades preexistentes. Van der Hammen (1957) considera que la mayor parte de la unidad es de edad Plioceno. Localidad tipo y afloramientos: ubicada sobre la región entre la Represa del Sisga hasta Villapinzón al norte del Departamento de Cundinamarca, (Hubach, 1957). Descripción litológica: areniscas conglomeráticas, conglomerados de gravas a cantos bien redondeados, arcillas rojas y capas de turba. Límites estratigráficos: yace discordantemente sobre unidades Paleógenas y Cretácicas. Hubach (1957), menciona la presencia en la base de la unidad, floras tropicales de nivel del mar, mientras que en su parte media Van der Hammen (1957), encontró floras no tropicales, por lo que se puede asumir, que el depósito de la unidad es sincrónico con el levantamiento de los Andes (Rodríguez y Solano, 2000).

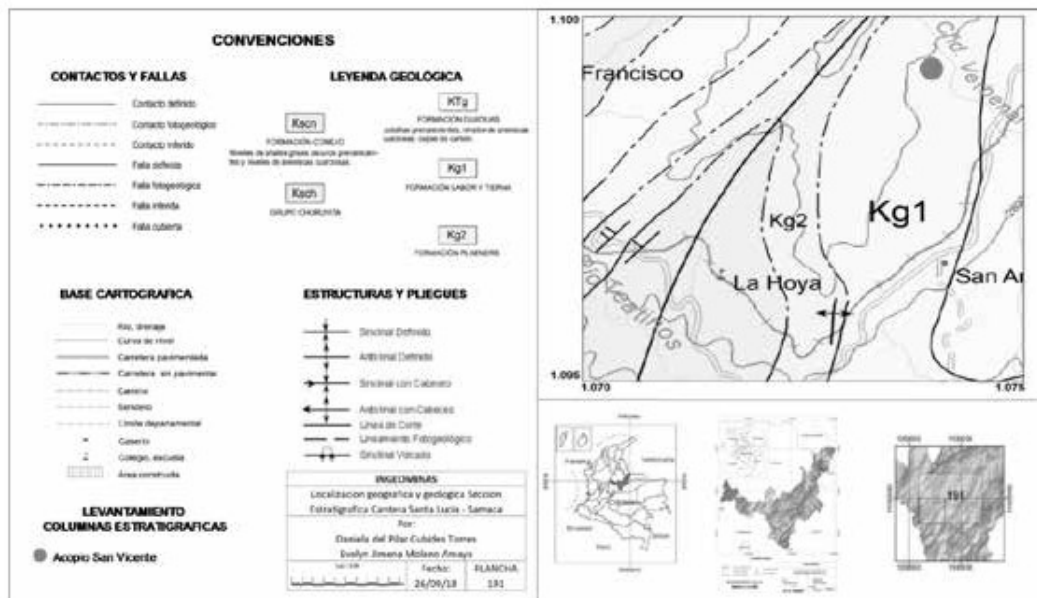


Figura 2. Localización geográfica y geológica. Acopio San Vicente Runta Arriba – Tunja. Fuente: Servicio Geológico Colombiano—modificado de Plancha 191 Tunja Boyacá.

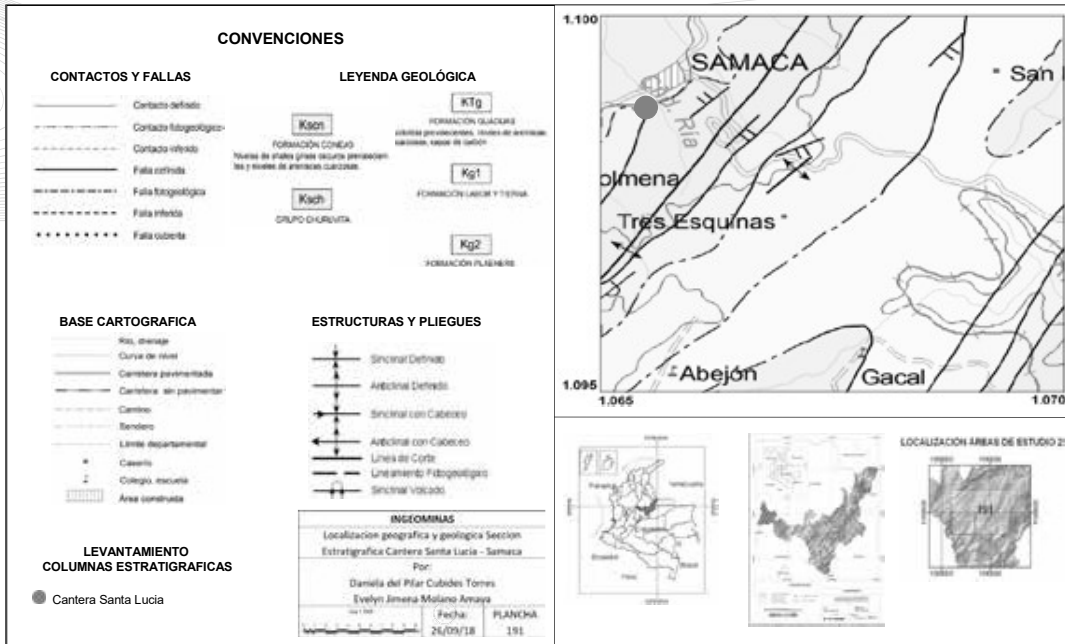


Figura 3. Localización geográfica y geológica. Cantera Santa Lucia Cucaita – Samacá Fuente: Servicio Geológico Colombiano–modificado de Plancha 191 Tunja Boyacá.

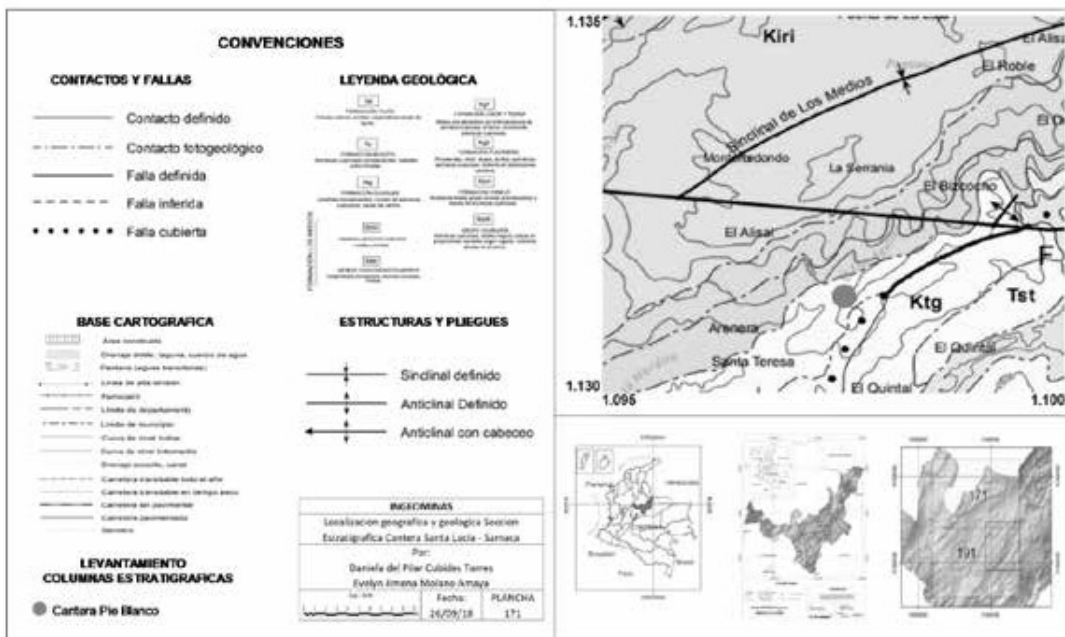


Figura 4. Localización geográfica y geológica. Cantera Pie Blanco – Paipa Boyacá. Fuente: Servicio Geológico Colombiano – modificado Plancha 171 Duitama Boyacá.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

Para la realización de esta investigación, se optó por la selección de diferentes fuentes de material mencionados anteriormente. Estos agregados corresponden a arena de peña (AP) y arena lavada (AL) extraídos de la mina San Vicente, de tamaños que varían entre 0,074 a 4,76 mm, poseen colores amarillo, anaranjado oscuro para (AP) y claro para (AL), con contenido de materia orgánica; en cuanto a los triturados de $\frac{1}{2}$ " y $\frac{3}{4}$ " tomados de las canteras Santa Lucia (CSL) y Pie Blanco (CPB), corresponden a agregados de tamaños entre 25,4 a 4,75 mm, presentan superficies rugosas y formas angulosas, con colores de gravas grises de tonalidades claras y oscuras, amarillas, naranjas, verdes, negras y rojizas (Ver Figura 5).

Estas plantas son especializadas en la extracción, benefició y comercialización de agregados pétreos tales como gravillas, bases y sub-bases granulares, filtros-afirmados y recebos los cuales constituyen una fuente importante para la elaboración de concretos y de pavimentos.



Figura 5. Agregados empleados en la investigación. Fuente: Autoría propia.

Métodos

La metodología empleada se describe mediante 5 fases (Ver Figura 6), la cual tiene como propósito cumplir con los objetivos planteados en el desarrollo de esta investigación y llevar a cabo los ensayos de caracterización de propiedades físicas y mecánicas, los cuales se realizaron mediante los procedimientos descritos en el manual de normas de ensayos de materiales para carreteras a cargo del Instituto Nacional de Vías (INVIAS), actualizada en el 2013. Estos ensayos fueron realizados bajo la supervisión de los laboratoristas encargados de geotecnia y pavimentos de la Universidad Santo Tomás Seccional Tunja, y son recomendados para determinar la calidad de los materiales empleados en obra. Por otra parte, los ensayos de caracterización mineralógica, realizados para determinar la composición de los agregados de $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{4}$ " y arena lavada, se llevaron a cabo con la supervisión del Doctor Javier Eduardo Becerra docente director del proyecto de investigación, el análisis petrográfico de las secciones delgadas confeccionadas por el laboratorio Minerlab fue realizado en el microscopio petrográfico Zeiss Scope A1 de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Santo Tomás sede Central, Bogotá.

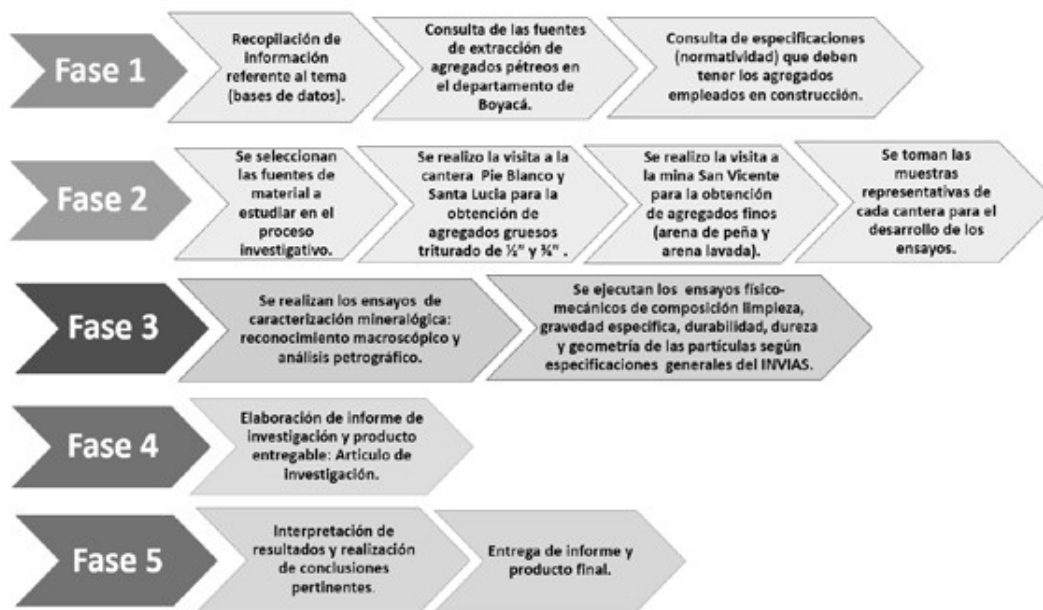


Figura 6. Diseño metodológico de la investigación. Fuente: Autoría propia.

Ensayos de laboratorio.

Los ensayos de laboratorio realizados para caracterizar el material pétreo se realizaron según las Especificaciones Generales de Construcción INVIAS 2013. De los cuales se realizan 12 ensayos de composición, limpieza, gravedad específica, dureza, durabilidad y geometría de las partículas, con el fin de determinar si los agregados cumplen o no con las especificaciones técnicas (INVIAS y NTC), con el propósito de darles un adecuado uso como materiales de construcción y poder así, analizar su susceptibilidad al desarrollo de problemas patológicos. Para poder garantizar lo anterior, se realizó un estudio más completo y específico el cual consistió en el análisis petrográfico; este se hace con el propósito de proporcionar valiosa información sobre su composición mineralógica y microestructura, siendo esencial para predecir su durabilidad, controlar su calidad y si existe algún tipo de daño realizar un diagnóstico acertado y confiable (Buitrago,2010).

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Análisis macroscópico

El reconocimiento macroscópico empleado en esta investigación (Véase figura 7) tiene como objetivo determinar la composición mineralógica, selección, tamaño, color y forma, de los agregados finos y gruesos (arena de peña, arena lavada y triturados de gravas de 1/2" y 3/4"), los cuales se analizaron mediante observaciones detalladas por inspección ocular y la ayuda de un estereoscopio o lupa. A simple vista se aprecia que los agregados son provenientes de roca arenisca con alto contenido de cuarzo presentando una dureza de 7 (muy duro) según la escala de Mohs. Para una revisión más profunda, se muestra a continuación el análisis macroscópico de cada una de las muestras tomadas como objeto de esta investigación (Véase tabla 1).

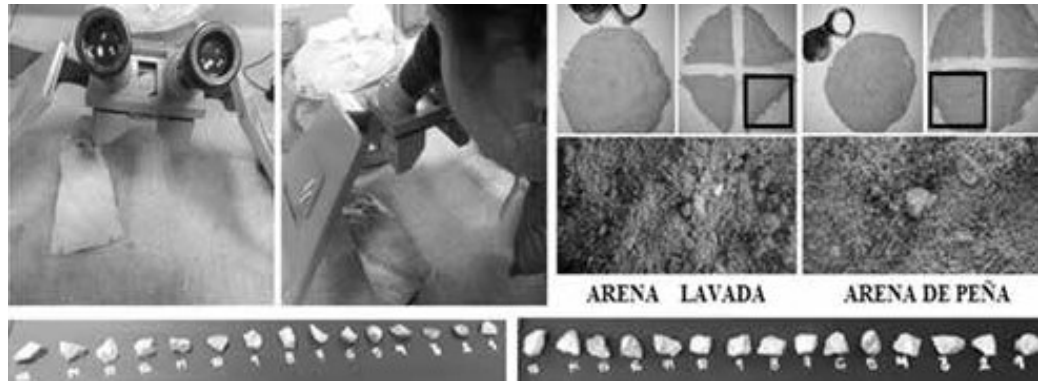


Figura 7. Fragmentos de agregados empleados para el reconocimiento macroscópico.
Fuente: Autoría propia.

Tabla 1. Descripción de cada uno de los materiales en el reconocimiento macroscópico.

MATERIAL	COMPOSICIÓN MINERALÓGICA	SELECCIÓN	COLOR	FORMA	TAMAÑO
Arena lavada	Compuestos de cuarzo como mineral esencial	Bien seleccionada	Los granos van de colores blancos y amarillentos, sin ningún tipo de oxidación	Granos Subredondeados	No existe variedad de tamaños.
Arena de peña	Compuestos de cuarzo y fragmentos líticos	No se encuentran bien seleccionados	Los granos de cuarzo no muestran oxidación superficial y son traslucidos, de tonalidades amarillas y marrones	Granos subredondeados	Los sedimentos presentan dispersión de tamaños
Triturado de ½" y ¾" Cantera Santa Lucía	Fragmentos de dos tipos de rocas: detríticas (areniscas) y químicas (calizas), los agregados de arenisca se constituyen principalmente de cuarzo, con cantidades subordinadas de feldespato potásico	No se encuentran bien seleccionados	Los fragmentos de agregados van de blanco a gris y algunos granos negros, fue posible identificar la presencia de óxido de hierro en algunos fragmentos	Los granos presentan un redondeamiento entre subanguloso (SA) a redondeado (R) y una esfericidad subprismática (SP) a esférico (E)	Los fragmentos del triturado de ½" se encontraron diversos tamaños y se estableció que se encontraban entre 1,6 cm a 2,3 cm, y en el triturado de ¾" se encontraban entre 2,6 cm a 3,4 cm
Triturado de ½" y ¾" Cantera Pie Blanco	Compuesta por cristales de cuarzo con cantidades subordinadas de moscovita y fragmentos líticos	No se encuentran bien seleccionados	Los fragmentos de agregados van de blanco a gris y de amarillo a verde, algunos presentan óxido de hierro en la superficie	Los granos presentan diferentes grados de redondez, desde subangulares (SA) a subredondeados (SR), con esfericidad subprismática (SP) a subdiscoidal (SD)	Los fragmentos del triturado de ½" estos están entre 1,5 cm a 2,2 cm y el tamaño de los fragmentos del triturado de ¾" evidencia diversos tamaños entre 2,5 cm a 3,1 cm

Fuente: Autoría propia

Análisis petrográfico

A continuación, se presentan los resultados del análisis petrográfico efectuado sobre las siguientes muestras: Arena lavada del acopio Mina San Vicente (AL), grava de la cantera Pie Blanco (CPB) y Agregado Cantera Santa Lucía (CSL), en las cuales se realizó el análisis y la determinación de algunos parámetros de textura y composición relacionados con la durabilidad y comportamiento de los agregados.

Arena lavada acopio Mina San Vicente (AL).

En la sección delgada correspondiente a la muestra (AL) se identifica que los agregados son de areniscas de origen sedimentario, constituidos por cuarzo monocristalino, con cantidades subordinadas de cuarzo policristalino (Véase Figura 8). Los colores de interferencia son grises

y blancos de primer orden y se observa el relieve medio característico del cuarzo. Todos los fragmentos de agregados presentan bajo grado de fracturamiento, con fracturas de tipo intragranular sin conexión entre ellas.

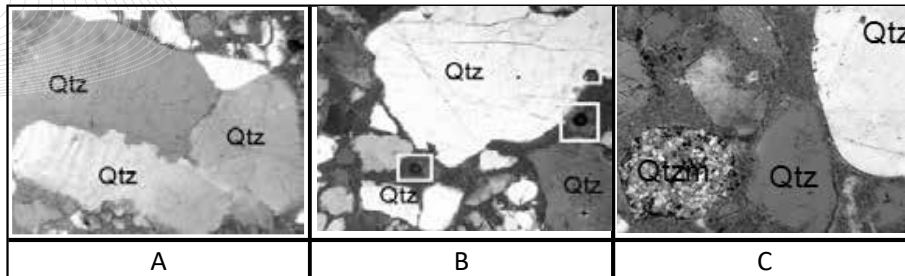


Figura 8. Observación de composición mineralógica AL, imagen en 5X de agregado de roca arenisca. (A) Cristales subangulares de cuarzo. (B) Fracturamiento intragranular en los cristales de cuarzo. (C) Granos de cuarzo microcristalino. (Qtz) cuarzo, (Qtzm) cuarzo microcristalino. Fuente: Autoría propia.

Agregado Cantera Pie Blanco (CPB).

Con el propósito de realizar una descripción minuciosa de los minerales que se encuentran en el agregado de la cantera Pie Blanco y con el fin de facilitar su análisis, se numeraron los fragmentos en la sección delgada (Véase Figura 9).

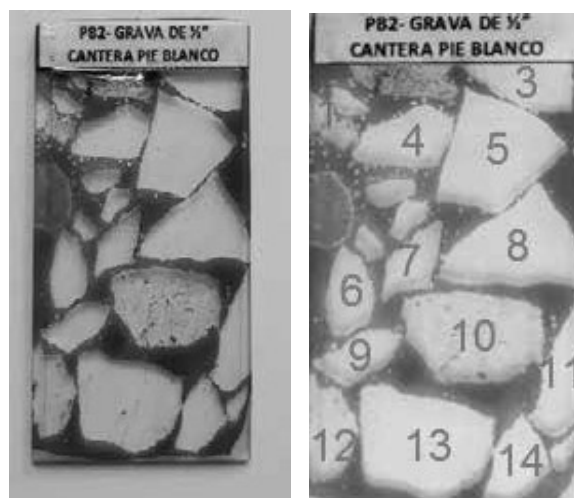


Figura 9. Sección delgada grava Cantera Pie Blanco. Fuente: Autoría propia.

Los agregados triturados son de origen sedimentario y corresponden a fragmentos de roca de arenisca constituida por cuarzo, con cantidades subordinadas de moscovita y fragmentos líticos en especial en los agregados identificados con los números 8,10 y 13. Los granos de cuarzo presentan colores de primer orden que van de blanco a grises; estos poseen forma predominantemente subangular, se encuentran bien cementados ya que sus partículas se hallan unidas entre ellos en su gran mayoría; los granos presentan fracturamiento medio de tipo intragranular, sin conexión entre las fracturas (Véase Figura 10). El fracturamiento es un factor muy importante porque causa pérdida de resistencia mecánica y la migración de fluidos, además, la degradación se manifiesta por la formación de soluciones de continuidad en las rocas y puede implicar el alejamiento recíproco de las partes fracturadas (Becerra, 2009).

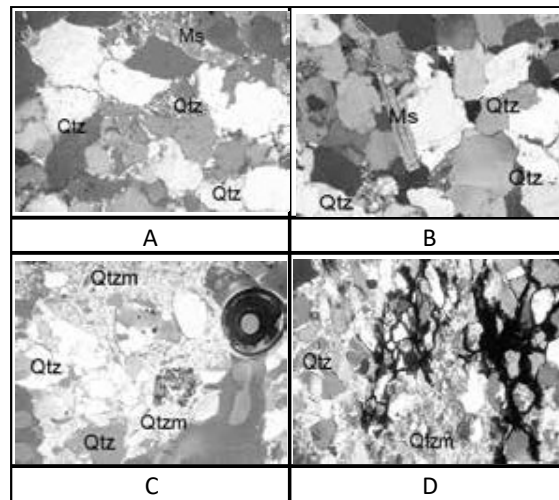


Figura 10. Composición mineralógica de agregado CPB. (A) Cuarzo (Qtz) y moscovita (Ms). (B) Moscovita con líneas de exfoliación perfectas. (C) Cuarzo monocristalino (Qtz) y microcristalino (Qtzm). (D) óxidos de hierro en la matriz del agregado entre los cristales de cuarzo. Fuente: Autoría propia.

Algunos fragmentos de agregados de arenisca presentan cemento carbonatico (cristales de calcita); este es un factor muy importante al considerar la durabilidad de los agregados, teniendo en cuenta que la mineral calcita se caracteriza por su alta solubilidad en medios acidulados, lo cual puede implicar que sea removido con mayor facilidad en el agregado. También se observan algunos agregados de arenisca con baja cementación y presencia de matriz de óxidos de hierro lo cual se puede apreciar con mayor detalle en la fotografía 10.

Agregado Cantera Santa Lucia. (CSL).

Los agregados extraídos en esta cantera son de origen sedimentario, perteneciendo a fragmentos de dos tipos de rocas: detríticas (areniscas) y químicas (calizas). Los agregados de roca caliza corresponden a los fragmentos identificados con los números 5, 6,10,13,20 (Ver Figura 11).



Figura 11. Sección delgada grava Cantera Santa Lucia. Fuente: Autores.

Los agregados de roca arenisca están constituidos principalmente de cuarzo, con cantidades subordinadas de feldespato potásico (Véase Figura 12 A,C,E). Los cristales de cuarzo se caracterizan por sus colores de interferencia blancos y grises de primer orden, su relieve es medio y se observa que sus granos presentan forma subangular, con bajo a medio fracturamiento intragranular sin conexión entre las fracturas. Los agregados de origen calcáreo (Véase Figura 12 A, B, D y F) están compuestos de calcita cristalina, se encuentran igualmente fragmentos de agregados correspondientes a biomicritas, constituidos por bioclastos de foraminíferos bentónicos de orden rotalina y algunos globigerinoides especialmente en los fragmentos 6,10,20. Se localizan también materiales esqueléticos como elementos predominantes en algunos fragmentos calcáreos y estilolitos producidos por disolución de la calcita por presión a lo largo de los planos de estratificación. Se considera que las heterogeneidades en el estrato rocoso, causan presiones verticales desiguales en puntos adyacentes por encima y por debajo de la superficie del estilolito. Esta superficie a menudo tiene una película de material arcilloso, el cual es considerado como el residuo insoluble resultante del proceso de disolución y remoción del carbonato de calcio (Nasri *et.al.*, 2018).

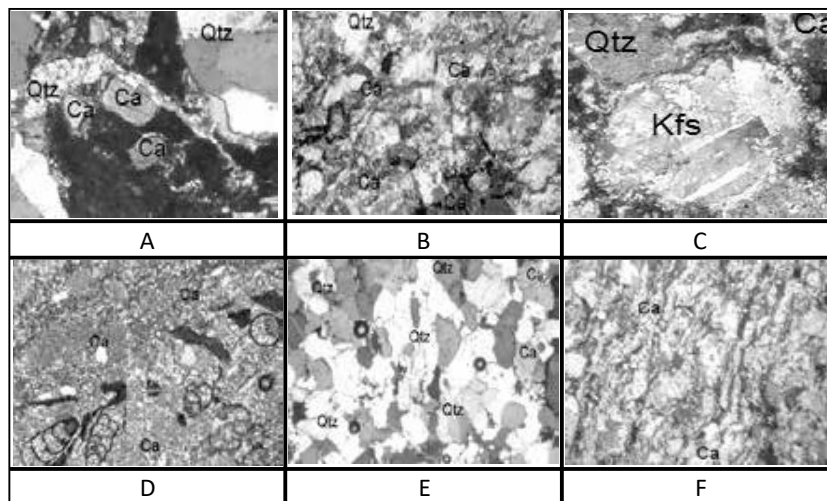


Figura 12. Composición mineralógica de agregados de CSL. (A) Cristales de cuarzo (Qtz) y calcita Ca). (B) Agregado calcáreo (Ca) con cuarzo y presencia de estilolitos. (C) Feldespato potásico (Kfs) y cuarzo en arenisca. (D) Agregado calcáreo (biomicrita) con bioclastos de foraminíferos. (E) agregado de arenisca constituido por cuarzo. (F) Agregado de roca caliza. Fuente: Autoría propia.

Los cristales de calcita (CaCO_3) muestran el maclado característico de este mineral; no se observa la presencia de dolomita. La composición de calcita en los agregados calcáreos es favorable para su uso, ya que no son susceptibles de generar reacciones de tipo álcali – carbonato, que ocurre cuando los álcalis del cemento reaccionan con el mineral dolomita $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, produciendo brucita $\text{Mg}(\text{OH})_2$ y calcita CaCO_3 . Esta reacción provoca que la roca genere poros, permitiendo que el agua entre y cause expansión de la arcilla y posterior la ruptura del agregado.

El cuarzo es la forma más común de sílice encontrada en los agregados de CSL. Este mineral se caracteriza por la disposición ordenada del tetraedro de silicio y oxígeno, estable bajo condiciones normales. La composición de cuarzo de estos agregados es favorable para su uso; no se observan minerales potencialmente reactivos con los álcalis del cemento como ópalo, calcedonia, tridimita, cristobalita, cuarzo vitrificado (criptocristalino, microcristalino), cuarzo de grano grueso (intensamente fracturado, granulado y deformado con incrustaciones submicroscópicas), sílice volcánica cristalizada (intermedia y básica), cuarzo jaspeado. Estos minerales pueden producir reacción álcali-sílice, la cual involucra reacciones químicas entre

los agregados reactivos y los álcalis contenidos en el cemento Portland, produciendo aumento de volumen, con la consecuente rotura prematura y /o pérdida de la prestación de servicio de las estructuras, es necesario realizar un control minucioso del contenido de agua que poseen los agregados, y evaluar el contenido de agua de la mezcla para evitar la ocurrencia de la reacción química (Romero,2010).

En cuanto a la reacción álcali- silicato, es una reacción producida por los álcalis presentes en el agua de poro del hormigón y varios minerales comúnmente encontrados en rocas arcillosas como las grauvacas, filitas y arcillolitas, se estima que esta reacción se debe a la presencia de ciertos filosilicatos; los álcalis y el hidróxido generado en solución acuosa poseen gran capacidad de disolución y al parecer desalojan a un mineral del tipo de las vermiculitas que se encuentra ubicado entre las capas de exfoliación de ciertos filosilicatos (minerales de arcilla). Estos últimos, una vez liberados, logran con mayor facilidad absorber agua y se expanden notablemente causando fisuración (Romero, 2010). Se observó la presencia del filosilicato, principalmente mica moscovita, pero ya que no se encuentra en grandes proporciones, esta reacción no se podría generar por lo que estos agregados son favorables para su uso.

Análisis físico-mecánicos

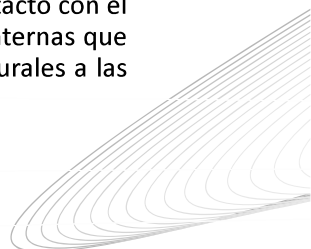
Los análisis de los ensayos físico-mecánicos que se evidencian a continuación son basados a partir de las especificaciones generales de construcción del Instituto Nacional de Vías 2013, sin embargo, fue necesario tener en cuenta las apreciaciones que presenta la norma técnica colombiana (NTC) y bases teóricas, cuyas normas establecen requisitos para garantizar el uso, la calidad y durabilidad de los materiales usados en obra. Para ello, se empleó en primer lugar un ajuste granulométrico, seguido de otros ensayos de limpieza, gravedad específica, dureza, durabilidad y geometría de partículas, para poder así, identificar que los materiales extraídos de cada una de las canteras, efectivamente cumplan con los requisitos de calidad, beneficio y comercialización que están brindando al constructor, responsable de suministrar estos materiales ya sea para obras generales de construcción o a nivel de estructuras de pavimentos convencionales.

Ensayos de limpieza.

- *Determinación de la cantidad de material que pasa por el tamiz N°200 en los agregados pétreos mediante lavado I.N.V. E 214-13 y Análisis equivalente de arena de suelos y agregados finos I.N.V E-133-13.*

Los resultados que se muestran en la tabla 2, evidencian en primer lugar, que el agregado fino (AP) posee un porcentaje mayor del (27 %) de limos y de arcillas, en comparación al agregado (AL) con un (7 %) de material fino. En segundo lugar, los valores registrados de agregados gruesos evidencian un (2 %) de valores bajos del porcentaje de material fino que pasa por el tamiz No. 200 para (CPB), y un porcentaje superior para el agregado de ½" de (CSL) con un (4 %). Los resultados que obtuvieron un (27 % y 4 %) tienen efectos perjudiciales al encontrarse en altos porcentajes en el concreto, que afectan la adherencia y aumentan la cantidad de agua requerida (ASTM C 117). Gutiérrez de López (2003), expone que un buen agregado grueso para concreto debe tener un contenido de finos entre (1 % y 3 %) para que permitan una adecuada adherencia de las partículas y el cemento en las mezclas.

Además, este autor también expone que algunos tipos de arcilla, al entrar en contacto con el agua producen fenómenos de expansión y contracción, que generan presiones internas que pueden ocasionar fisuras en el concreto, y por consiguiente afectaciones estructurales a las edificaciones.



El análisis de equivalente de arena, proporciona resultados positivos para la arena lavada (AL=28 %) de donde se puede inferir que al poseer un mayor valor de EA será un material que tendrá una mayor aplicación en obras civiles, pues proveen una mayor resistencia y no permiten la filtración de agua, que en algunos casos es la causante del deterioro de las obras. Lo anterior demuestra que la arena de peña presenta un valor negativo del (AP=19 %) conteniendo áridos muy contaminados, por consiguiente, no se recomienda utilizar en capas firmes, ya que a menor valor de EA mayor será el contenido de finos (Véase tabla 2).

Además, en la tabla 6 se evidencia que la Arena de Peña no representa un material de buena calidad para estructuras de pavimento convencionales (afirmado, base y sub-bases). Sin embargo, cabe señalar que en algunos casos se emplean arenas con ligeros contenidos de limo o arcilla, para darle mayor trabajabilidad al mortero, aunque, aquellos que son fabricados con este tipo de arena no son muy resistentes. En Colombia el uso del mortero de cemento es ampliamente difundido y se dosifica de acuerdo a la proporción en peso de cemento y arena para este tipo de material (AP) según las relaciones (C/A 1:7 a 1:9) los cuales son usados para pañetes interiores; pega para ladrillos y baldosines, pañetes y mampostería en general y pañetes no muy finos; pegas para construcciones que se van a demoler pronto. Estabilización de taludes en cimentaciones (Sánchez de Guzmán, 2001).

Tabla 1. Resumen de resultados ensayos de limpieza.

Coeficiente	Arena lavada	Arena de peña	Cantera Pie Blanco (CPB)		Cantera Santa Lucía (CSL)	
	(AL)	(AP)	1/2**	3/4**	1/2**	3/4**
	Determinación de la cantidad de material que pasa por el tamiz N°200 en los agregados pétreos mediante lavado I.N.V. E 214-13	7%	27%	2%	2%	4%
Análisis equivalente de arena de suelos y agregados finos I.N.V E-133-13	28%	19%				

Fuente: Autoría propia.

Ensayo de composición.

- *Análisis granulométrico de los agregados gruesos y finos I.N.V. E 123-13.*

En el desarrollo de este ensayo, se identifican los resultados obtenidos de granulometría de los agregados pétreos de las respectivas canteras, con la finalidad de garantizar un óptimo comportamiento del agregado usado en obra; para esto se es necesario que los materiales satisfagan los requisitos de calidad (Véase Figuras 13 y 14), mostrados mediante los límites de franjas de color naranja, tomados del capítulo 3 (afirmados, sub-bases y bases granulares) del Instituto Nacional de Vías (INVIAS).

Con base en el procedimiento de este ensayo, también se hace necesario mencionar los resultados expuestos en la tabla 3, los cuales evidencian que los agregados gruesos presentan curvas con un coeficiente de uniformidad menor a 3 lo que indica que es un suelo muy uniforme de gravas mal gradadas. En cuanto a los agregados finos (arenas) el Cu presenta valores altos (AL=14,7; AP=10) lo que significa que tiene un mayor rango de tamaños del suelo siendo arenas mal gradadas, lo cual resulta poco favorable para las estructuras ya que al tener un tamaño predominante pueden quedar más espacios, esto puede llegar afectar la estructura del pavimento o la estructura del concreto. Por otra parte, cuando el módulo de finura es menor a 2.2 como se observa en los resultados de la tabla 3, son arenas finas y según lo expuesto por Uribe (como se citó en Martínez y Torres, 2013) en este caso puede ocurrir que los morteros sean pastosos y que posea mayores consumos de cemento y agua para una

resistencia determinada, y también una mayor probabilidad que ocurran agrietamientos de tipo contracción por secado.

Tabla 2. Análisis de coeficiente granulométricos.

Coeficiente	Arena lavada (AL)	Arena de peña (AP)	Cantera Pie Blanco (CPB)		Cantera Santa Lucia (CSL)	
			1/2"	3/4"	1/2"	3/4"
Cu (Coeficiente de uniformidad)	14,7	10	0,53	0,53	0,58	0,60
Cc (Coeficiente de curvatura)	4,61	5,85	1,63	1,73	1,51	1,67
Mf (Módulo de finura)	0,83	0,9				

Fuente: Autoría propia.

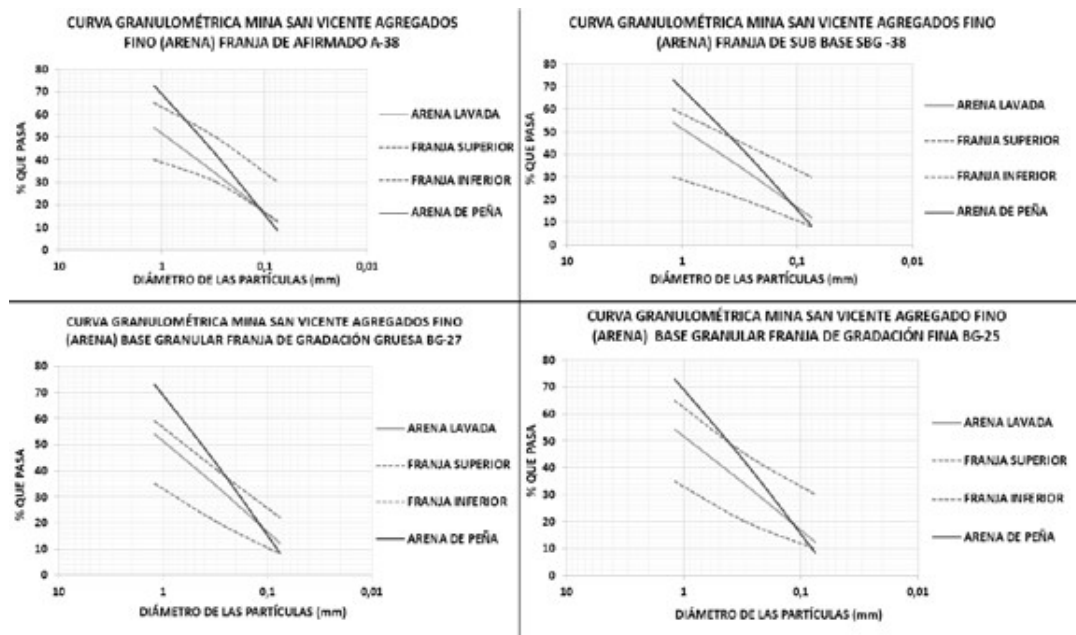
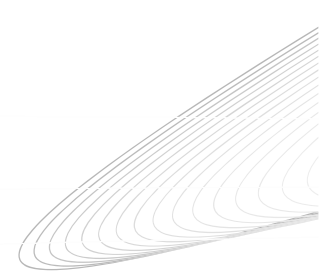


Figura 13. Tablas graficas de los agregados de la mina San Vicente mostrando granulometría ideal para afirmado, sub-bases y base granular (gradación gruesa-fina). Fuente: Autoría propia.

Como se puede observar en la figura anterior, el agregado fino (Arena de Peña) no se ajusta a ninguna de las franjas granulométricas para afirmado, sub-bases y base granular recomendada por la norma INVIAS, puesto que presenta saltos bruscos en la parte superior de la franja, debido a que se encuentra mayor porcentaje de partículas de gran tamaño, por consiguiente, el material puede presentar segregaciones y en el momento de la fundición estas partículas pueden irse a la parte baja del elemento, de esta manera no garantizará ninguno de los niveles de compactación, y presentará alta permeabilidad en seco y húmedo. De acuerdo a esto, el material más recomendable es la Arena lavada siempre y cuando se ajuste a cada uno de los requisitos de calidad exigidos por la presente especificación.



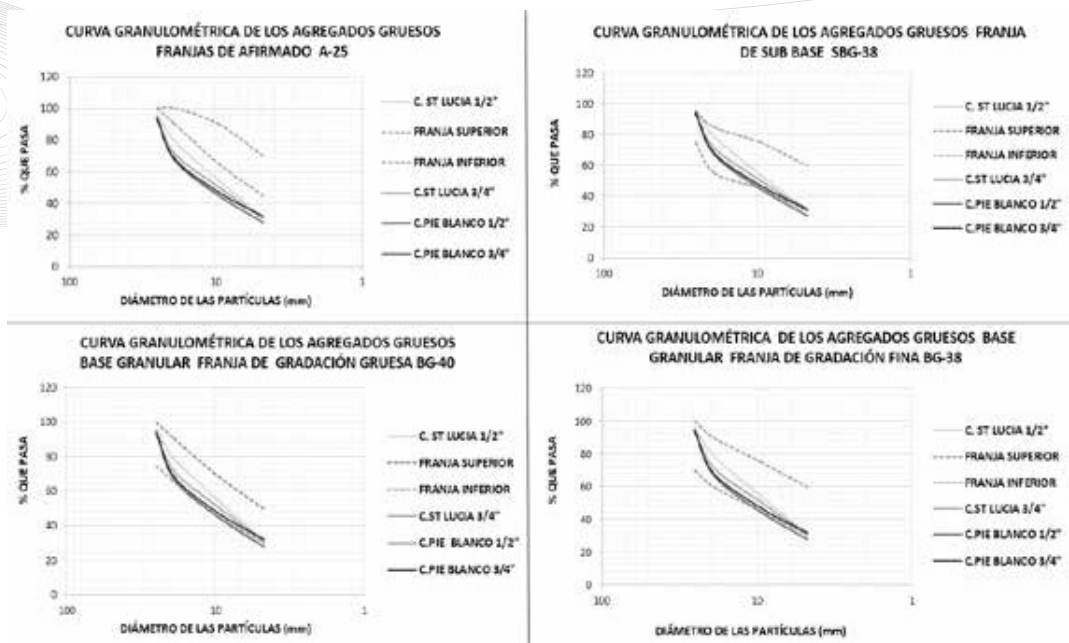


Figura 14. Tablas graficas de los agregados de cantera Santa Lucia y Pie Blanco mostrando granulometría ideal para afirmado, sub-bases y base granular (gradación gruesa-fina). Fuente: Autoría propia.

Efectivamente, los agregados gruesos de $\frac{1}{2}$ " y $\frac{3}{4}$ " de las canteras Pie Blanco y Santa Lucia satisfacen los requisitos de calidad para sub-bases y bases granulares de gradación fina y gruesa, dando lugar a curvas uniformes y sensiblemente paralelas a los límites de las franjas exigidas, siendo así que el agregado de $\frac{1}{2}$ " de la cantera Pie Blanco se tiende a desviar en una mínima parte en el límite inferior, sin embargo, el material es aceptable para ser usado para carpeta sub base y base granular. En la capa de afirmado, se observa que los materiales se encuentran por debajo de las franjas de color naranja y esto demuestra que no son recomendados para estructuras de pavimento ya que no cumplen los requisitos de calidad. Es por esto que tienden a presentar una mayor relación de vacíos (presencia de muchos poros), y en el caso de que este material llegue a ser utilizado en esta capa, y se construya la estructura del pavimento, esta puede llegar a presentar grandes afectaciones a nivel de deformaciones.

De acuerdo a los presentes resultados, es importante darles un uso adecuado a los materiales de (AP, CSL Y CPB) para ser utilizados en la capa de afirmados, por lo que se recomienda evitar que se triture tanto el material y se seleccione de una mejor manera el agregado. De esta forma, se brindarán mejores condiciones de trabajabilidad, economía y durabilidad en las diferentes obras de ingeniería.

Ensayo de Densidad Relativa (Gravedad específica).

- Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino I.N.V E-222-13 y grueso I.N.V E-223-13.

Se observan los valores más representativos del ensayo (Véase Tabla 4), indicando efectivamente que estos materiales son buenos o se pueden utilizar para cualquier tipo de construcción, puesto que se encuentran entre el rango previsto por la normativa (NTC 237 y NTC 176) donde la densidad relativa aparente (gravedad específica) de la parte solida se encuentra

por encima 2,6 para las arenas y 2,7 para las gravas, esto indica que la macroestructura de la grava o el agregado, se halla compuesto por materiales de condiciones mecánicas favorables, por tanto, en el momento de la aplicación de cargas o utilización de estos en la estructura del pavimento, o en la implementación de un concreto para cualquier tipo de estructura, el comportamiento mecánico del material va a ser muy favorable. En cuanto a los resultados de absorción del agregado fino (arena lavada y de peña), se registran valores con porcentajes altos de absorción, mientras que los agregados gruesos registran bajos valores de absorción, siendo esto más favorable para la cantera de Pie Blanco dado que sus valores son directamente proporcionales, es decir, a mayor densidad menor absorción y mejor calidad del material.

Tabla 3. Resultados densidad relativa aparente y porcentaje de absorción de los agregados pétreos.

ENSAYO	INV E-222-13 DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA (GRAVEDAD ESPECIFICA) Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO.		INV E-223-13 DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA (GRAVEDAD ESPECIFICA) Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO.	
	ARENA LAVADA	ARENA DE PEÑA	CANTERA SANTA LUCIA (CSL)	CANTERA DE PIE BLANCO (CPB)
DENSIDAD RELATIVA APARENTE g/cm ³	2,64	2,61	2,66	2,70
% ABSORCIÓN	3,62	2,93	1,33	0,50

Fuente: Autoría propia.

Ensayos de Dureza.

- Resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión (Micro-Deval) I.N.V E-238-13. Y Resistencia a la degradación de los agregados por medio de la máquina de los Ángeles I.N.V E-218-13.

De los 2 materiales estudiados para los ensayos de dureza (Véase tabla 5), el agregado de la CSL presenta la mayor pérdida por abrasión (Micro Deval) de agregados grueso en presencia de agua y carga abrasiva a 100 rpm, registrando un valor del 8 %, simultáneamente, esta misma (CSL) presenta resultados altos de resistencia a la degradación por medio de la Máquina de los Ángeles a 500 rpm, con un (32 % de desgaste), en comparación con CPB donde los valores entre paréntesis del (4 % y 27 % de desgaste) para ambos ensayos, son más bajos que los datos registrados por CSL. De acuerdo a lo anterior, y a los presentes resultados según las (normas NTC 93 y 98) indican que la calidad de ambos materiales gruesos es sobresaliente puesto que el porcentaje de pérdida del ensayo no debe ser mayor de 40 %, de esta misma manera en la tabla 6 se evidencia que dichos materiales (CSL Y CPB), cumplen los requisitos de calidad indicados por el INVIAS para ser usados como materiales para capa de afirmado, sub-base y base granular.

Tabla 4. Porcentajes de desgaste en los agregados gruesos por medio de ensayos de dureza.

ENSAYOS	CANTERA SANTA LUCIA (CSL)	CANTERA PIE BLANCO (CPB)
INV E-238-13 RESISTENCIA DEL AGREGADO GRUESO A LA DEGRADACIÓN POR ABRASIÓN (MICRO-DEVAL).	8% de desgaste	4% de desgaste
INV E-218-13 RESISTENCIA A LA DEGRADACIÓN DE LOS AGREGADOS POR MEDIO DE LA MAQUINA DE LOS ÁNGELES.	32 % de desgaste	27% de desgaste

Fuente: Autoría propia.

Ensayo de geometría de las partículas.

- *Ensayo porcentajes de partículas fracturadas en un agregado grueso I.N.V E-227-13 e índice de aplanamiento y de alargamiento de los agregados para carreteras I. N.V E 230-13.*

En la figura 15 se exponen mediante una gráfica de barras los resultados obtenidos de partículas fracturadas e índices de alargamiento y aplanamiento comparados, bajo los requisitos de calidad de bases granulares exigidos por la normativa INVIAS, obteniendo como resultados porcentajes de caras fracturadas superiores al 80 % y similares para ambas canteras, lo que representa que estos agregados son favorables porque brindan una mayor estabilidad y por lo tanto seguridad en la estructura, cumpliendo como materiales de base granular de tipo B y C. Los resultados de índices de alargamiento y aplanamiento de la CPB presentan el menor valor con el (31 %) en comparación a CSL con un (33 %), no obstante, estos valores de índices son positivos puesto que no sobrepasan el límite máximo exigido por la norma INVIAS del (35 %), indicando con esta información, que en el momento de la construcción de una vía con estos materiales, se tiene una baja probabilidad de fracturamiento por contacto entre las partículas, al igual que en el proceso de compactación del material.

Estos resultados de los ensayos de geometría de las partículas coinciden ya que demuestran que los materiales tomados de estas dos canteras presentan agregados de mejor calidad y resistencia en las construcciones de obras viales convencionales.



Figura 15. Gráfica de análisis de resultados de los ensayos de partículas fracturadas e índices de alargamiento y aplanamiento. Fuente: Autoría propia.

Ensayos de durabilidad.

- *Solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio y de magnesio I.N.V. E-220-13.*

En la figura 16, se ilustran las pérdidas de masa de cada uno de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio y de magnesio, en estas gráficas se puede observar que los agregados presentan mayor pérdida de masa al ser expuestos a la solución de sulfato de sodio, muestra una reacción mayor en cada uno de los agregados que se encuentran separados por las respectivas fracciones, en comparación con el sulfato de magnesio, el cual evidencia una pérdida menor de soluciones. También es posible demostrar que los agregados, que sufren más porcentaje de pérdidas de material, tienen una resistencia demasiado baja ante los fenómenos atmosféricos como lo son la arena de peña y los agregados de $\frac{1}{2}$ " y $\frac{3}{4}$ " de la cantera Santa Lucia.

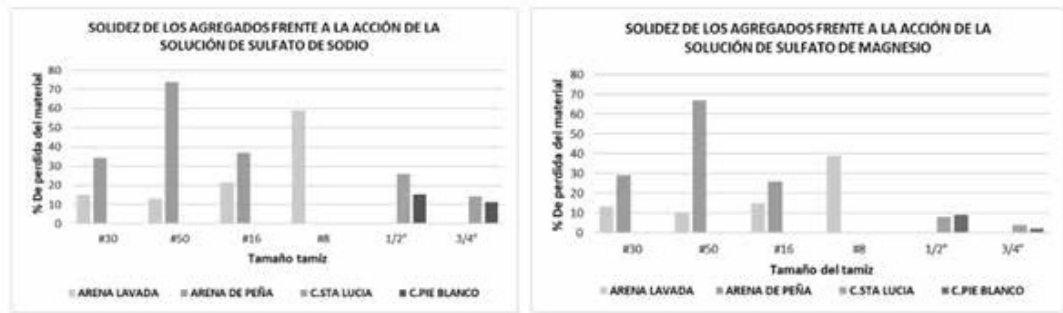


Figura 16. Gráficas comparativas de la solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio y de magnesio. Fuente: Autoría propia.

La solidez de los agregados frente a la acción de sulfatos se puede manifestar de diferentes formas. Al finalizar el ensayo se hizo una inspección cualitativa de partículas con evidencias de daños como rotura, desintegración y agrietamiento (Véase Figura 17). La desintegración es una forma de daño característica en los agregados expuestos a la solución de sulfato de sodio. De igual manera, se observa que los agregados presentan diferente intensidad de daños; así, por ejemplo, los agregados de la cantera Pie Blanco exhiben mayor cantidad de partículas disgregadas, generadas a partir del tercer ciclo, en comparación con los agregados de la Cantera Santa Lucía, en los cuales se observan indicios de desintegración, pero sin llegar ésta a ser completa (Véase Figura 18).

Por último, se analizaron estos resultados según requisitos de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras (INVIAS- 2013), como se muestra en la tabla 6, presentando que el material de las canteras Santa Lucía y Pie Blanco cumplen con los requisitos de calidad y resistencia bajo ataques atmosféricos, pero solamente frente al ataque de sulfato de magnesio, pues pueden ser utilizados como agregados para capas de subbase y base granular.

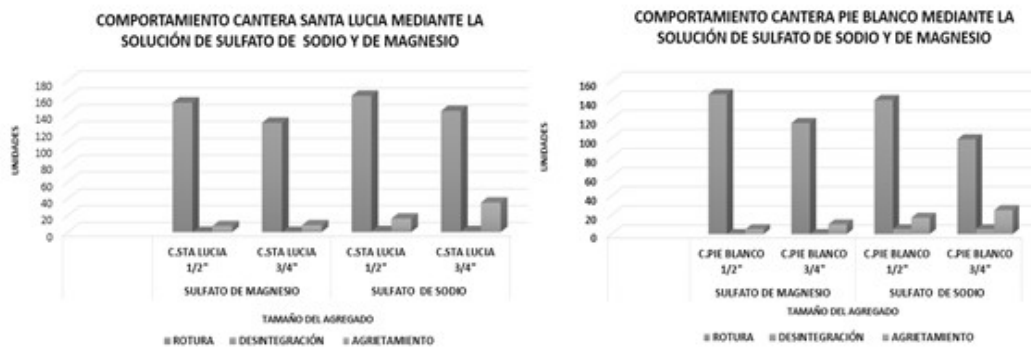


Figura 17. Inspección cualitativa cantera Santa Lucía y Pie Blanco mediante la solución de sulfato de sodio y de magnesio. Fuente: Autoría propia.



Figura 18. Resistencia de los agregados de la cantera Pie Blanco bajo ataque por sulfato de sodio. Fuente: Autoría propia.

CAPA	GEOMETRÍA DE LAS PARTÍCULAS								DUREZA					DURABILIDAD						EQUIV					
	CARAS FRACTURADAS				ÍNDICE DE ALARGAMIENTO Y APLANAMIENTO				DESGASTE EN LA MAQUINA DE LOS ANGELES		DEGRADACIÓN POR ABRASIÓN EN EL EQUIPO MICRO. DEVAL			PERDIDAS DE ENSAYOS DE SOLIDEZ EN SULFATO DE SODIO			SULFATO DE MAGNESIO								
	1 CARA		2 CARAS		E-227		E-230		E-218		E-238			E-220											
NORMA INVIAS	E-227								E-230		E-218		E-238			E-220									
AFIRMADO									50% MÁX.					12% MÁX.			18% MÁX.								
C.STA LUCIA											SI			no cumple			cumple								
C.PIE BLANCO											SI			no cumple			cumple								
ARENA LAVADA														no cumple			no cumple								
ARENA PEÑA														no cumple			no cumple								
	clase C	clase B	clase A	clase C	clase B	clase A	clase C	clase B	clase A	clase C	clase B	clase A	clase C	clase B	clase A	clase C	clase B	clase A	clase C	clase B	clase A	clase C	clase B	clase A	clase C
SUB-BASE GRANULAR										50% máx.	50% máx.	50% máx.	35% máx.	30% máx.	12% máx.	12% máx.	12% máx.	18% máx.	18% máx.	18% máx.	25% min				
C.STA LUCIA										SI	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	SI	SI	SI					
C.PIE BLANCO										SI	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	SI	SI	SI					
ARENA LAVADA															NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI			
ARENA PEÑA															NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO			
BASE GRANULAR	50% min	70% min	100% min	-	50% min	70% min	35% máx.	35 %máx.	35 %máx.	40% máx.	40% máx.	35% máx.	30% máx.	25% máx.	12% máx.	12% máx.	12% máx.	18% máx.	18% máx.	18% máx.	25% min				
C.STA LUCIA	SI	SI	NO	-	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	SI	SI	SI					
C.PIE BLANCO	SI	SI	NO	-	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	SI	SI	SI					
ARENA LAVADA															NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO				SI

Tabla 5. Requisitos de los agregados para afirmados, sub-bases y bases granulares.

Fuente: Modificado de Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras Instituto Nacional de Vías 2013, (Artículo 311 tabla 311-3, Artículo 320 tabla 320-2 y Artículo 330 tabla 330-2).

Análisis general.

Finalmente, se puede establecer que de acuerdo a la caracterización geotécnica y mineralógica de los materiales finos (arena lavada y arena de peña) de la mina San Vicente, y agregados granulares tipos gravas (triturdados de 1/2" y 3/4") de Cantera Santa Lucía y Cantera Pie Blanco, se recomienda que la arena de peña (AP) sea usada especialmente en pañetes, baldosines, morteros de pega y acabados interiores, para estructuras convencionales (tipo viviendas y edificios), debido a que su grado de exposición a la intemperie puede alterar las mezclas usadas en la construcción. Para la arena lavada (AL) se determinó que puede ser usada tanto en concretos como en pavimentos. En concretos brinda una mejor manejabilidad y en pavimentos convencionales (afirmados, bases y sub-bases) presenta una composición homogénea, una selección adecuada y un alto contenido de cuarzo que favorece la resistencia y el buen comportamiento de las capas de pavimento. En cuanto a las gravas de CPB Y CSL estas cumplen los requisitos de calidad para ser usadas como materiales para construcciones de concreto y pavimentos convencionales, especialmente, base y sub-base granular; sin embargo, no se recomienda que estos agregados gruesos se usen en capas de afirmado, debido a que su granulometría se encuentra por debajo de los límites de las franjas exigidas por el INVIAS, y al tener partículas muy grandes que al momento de compactarse generan una

mayor relación de vacíos, impidiendo que se logren buenas características de resistencia y de deformabilidad en la estructura de pavimento.

Adicionalmente, desde la observación mineralógica CPB presenta granos de medio fracturamiento intragranular y CSL presenta bajo fracturamiento intragranular, es decir, que la cantera CPB presenta más pérdida de resistencia en comparación a CSL; como resultado de esto también se evidencia en el ensayo de durabilidad o resistencia a la solidez de sulfatos de sodio, que CPB efectivamente presenta un comportamiento menos favorable ocasionando disgregación en las partículas de los agregados. Por último, en estos materiales se encontraron minerales favorables, por ejemplo en CPB (minerales de cuarzo, moscovita, fragmentos líticos y carbonatos de calcio) en CSL (minerales de cuarzo, calcita, óxidos de hierro y fragmentos líticos) demostrando así, que los análisis físico-mecánicos y mineralógicos de estos agregados, usados en construcción, satisfacen los requisitos de calidad indicados y garantizan los niveles de compactación, resistencia y durabilidad en diferentes obras de ingeniería civil.

5. CONCLUSIONES

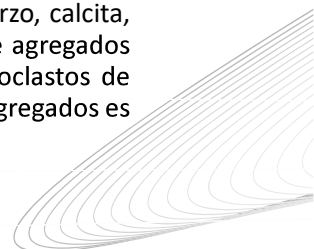
En el reconocimiento macroscópico se observó que la arena lavada constituida por cuarzo; esto se confirmó al hacer el análisis petrográfico, con el cual se determina la composición de cristales de cuarzo en mayores proporciones y agregados de cuarzo microcristalino en menores proporciones. Este material garantiza un excelente uso en mezclas de concreto y carpetas de pavimentos convencionales de afirmado, sub-bases y base granular, siempre teniendo un control en cuanto al contenido de agua del agregado y de la mezcla para evitar la reacción álcali - sílice que puede llegar a presentarse.

La arena de peña no es recomendable para ser usada como agregado fino en una mezcla de concreto y tampoco para ser empleada en una estructura de pavimento convencional, debido a que muestra alto contenido de impurezas y su resistencia a la intemperie es insuficiente, puesto que los porcentajes más altos de pérdidas frente a la acción de los sulfatos de sodio y de magnesio de la arena de peña influyen en la presencia de deterioro en la estructura, baja trabajabilidad, durabilidad y un aumento de costos de producción en las obras civiles. Sin embargo, es importante aclarar que en la actualidad estas arenas son utilizadas en viviendas y edificios para su uso en pañetes interiores, pega para ladrillos, baldosines y mampostería en general.

Los agregados gruesos de $\frac{1}{2}$ " y $\frac{3}{4}$ " de las canteras Pie Blanco y Santa Lucia, cumplieron los requisitos de calidad de los ensayos físico mecánicos de limpieza, composición, absorción, densidad relativa, dureza, durabilidad y geometría de las partículas, adoptadas por el INVIAS 2013; garantizando la calidad y resistencia de estos agregados que han sido comercializados por muchos años en las respectivas canteras para ser usados como materiales para bases y sub-bases en estructuras de pavimento convencionales.

Los triturados de la cantera Pie Blanco están compuestos por granos de cuarzo y pequeñas cantidades de moscovita y fragmentos líticos, adicionalmente se encuentra cementado por carbonato de calcio. Con base a estos análisis se determina que estos agregados son favorables para su uso, pero la presencia de filosilicatos en grandes cantidades puede generar la reacción álcali – silicato para lo que se debe realizar un análisis cuantitativo, y se recomienda hacer ensayos detallados.

En los triturados de la cantera Santa Lucia se reconocieron los minerales de cuarzo, calcita, óxidos de hierro y fragmentos líticos; como constituyentes de los fragmentos de agregados al microscopio se observaron granos de cuarzo, calcita, feldespato potásico, bioclastos de foraminíferos bentónicos y globigerinoides, debido a que la parte calcárea de los agregados es



de calcita, lo que es favorable para su uso, porque no se van a generar reacciones de tipo álcali carbonato, puesto que no existe dolomita en estos agregados.

En la cantera Santa lucia se identificó material calcáreo el cual posee bioclastos de foraminíferos bentónicos de orden rotalina y algunos globigerinoides, de acuerdo a la variedad presentada de bioclastos y observando sus diversas estructuras óseas, pueden presentar afectaciones en la porosidad y la resistencia mecánica en la utilización como agregado, por esto es importante observar cómo está constituida la roca para predecir el comportamiento y estudiarla detalladamente.

Los materiales empleados en el desarrollo esta investigación, son favorables para ser usados en obras de ingeniería, debido a que no existe la presencia de minerales reactivos como ópalo, tridimita, dolomita y filosilicatos que puedan generar reacciones álcali- sílice, álcali carbonato y álcali silicato.

La resistencia que ofrece el agregado de $\frac{1}{2}$ " y $\frac{3}{4}$ " de la cantera Santa Lucia y Pie Blanco frente a la acción del roce y el desgaste diario, satisfacen y garantizan su dureza para ser usados en pavimentos convencionales puesto que el desgaste debe ser menor del 35 % y menor del 40 % para ser usado en otras estructuras, obteniendo como resultados desgastes entre el 4 % hasta el 32 %, indicando con esto, que en el momento de la construcción la vía o estructura con estos materiales, tendrá una baja probabilidad de fracturamiento por contacto entre las partículas.

La baja resistencia al intemperismo frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio y de magnesio del agregado fino (arena de peña y arena lavada) y los triturados de $\frac{1}{2}$ " y $\frac{3}{4}$ " de la cantera Santa Lucia y Pie Blanco, comprometen la durabilidad de la obra, que no solo afecta su aspecto superficial (descascaramiento) sino su estabilidad por agrietamientos internos; evidenciando de esta manera que estos materiales ensayados deben tener un control y cuidado adecuado para no presentar daños a futuro en las estructuras de pavimento convencional o de concreto al soportar las altas resistencias en cambios de condiciones ambientales.

La causa de los daños de las obras viales son producto de la deficiente calidad, selección e incluso el mal uso de los materiales pétreos. Por lo cual se le debe dar importancia, en primer lugar, a la realización de un análisis petrográfico de los materiales pétreos en las obras ingenieriles trabajadas en concreto y pavimento, y, en segundo lugar, al cumplimiento de la normativa con las características físico-mecánicas, con el fin de mejorar los procesos constructivos y evitar así los procesos patológicos.

RECOMENDACIONES

Para realizar un adecuado almacenamiento se recomienda formar pilas y cubrirlas con plásticos, con el fin de evitar la pérdida de las partículas más finas, la cual es muy importante para darle manejabilidad al concreto.

Se invita a seleccionar mejor el material de las dos canteras para ser usado como carpeta de afirmado, evitando que este se triture tanto para obtener agregados de diferentes tamaños, con el fin de disminuir el espacio entre partículas y de esta forma garantizar los requisitos de agua y cemento, la trabajabilidad, compactación, resistencia, economía y durabilidad del concreto y del pavimento en las obras civiles.

Se advierte que cuando existan cantidades elevadas y peligrosas de sulfatos en los materiales se emplee un cemento resistente a estos y se realicen estudios más profundos en la composición de las muestras y una determinación en los porcentajes de minerales reactivos

en el agregado, para evitar reacciones álcali – sílice, álcali – carbonato y álcali-agregado ya que en esta investigación no fue posible darle alcance.

Se recomienda que la universidad Santo Tomas Seccional Tunja, adquiera nuevos equipos como microscopios, balanzas, equipos de corte directo para roca y carga puntual para roca e instrumentaría básica (carretillas, palas, baldes, probetas, etc.) Así mismo, plantee construir un nuevo laboratorio químico para realizar ensayos como reacción álcali sílice, fluorescencias por rayos X, entre otros, necesarios para realizar estudios con fines investigativos de forma óptima y eficiente.

REFERENCIAS

- Álvarez, A., & De, P. (n.d.). ICPC – Medellín. Manual de diseño de pavimentos de concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito.
- American Society of Testing Materials. ASTM C 117, ASTM C 586-053.
- Apulo, M. C., Alfonso, D., Cuellar, F., & López, T. (n.d.). Agregados Pétreos Para Concretos Caso: Vista Hermosa (MOSQUERA) y Mina Cemex (APULO).
- Becerra, J. E. (2009). Avaliação Da Susceptibilidade Aos Processos De Deterioração Dos Calcários Ornamentais Da Formação La Tampa Usados Na Construção Civil De Medellín - Colômbia. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Brasil.
- Boggs, S. J. (2009). Petrology of sedimentary rocks. New York, United States: Cambridge University Press.
- Bracamonte, A. J., Vertel, M. L., & Cepeda, J. A. (2013). Caracterización físico-mecánica de agregados pétreos de la formación geológica Toluviejo (Sucre) para producción de concreto. *Scientia et Technica*, 18(2), 429–436.
- Buitrago, N. R. (2010). Manual preliminar de petrografía aplicada al estudio de materiales pétreos para carreteras.
- Smith, M. &. (2001). Aggregates: Sand, gravel and crushed rock aggregates for construction purposes. Geological Society, London, Engineering Geology Special. 339.
- Cabrera, O. A., Ortega, N. F., & Traversa, L. P. (2010). Una Fuente Alternativa de Agregados Finos para el Hormigón. *Ciencia y Tecnología*, 10(7400), 17–38.
- Cipamocha, J. D. (2015). Revisión Histórica De Movimientos En Masa En El Departamento De Boyacá, “Dentro Del Marco Del Proyecto De “Investigación Aplicada a la Modelación Del Territorio A Partir Del Análisis Geomorfológico Del Departamento De Boyacá”. Sogamoso.
- Corbi, H. y. (2015). Interpretando ambientes sedimentarios: taller de sedimentología con arenas como actividad didáctica de Ciencias de la Tierra.
- Culma, A., y Rojas, F. (2018). Caracterización Mineralógica Y Física De Los Agregados De La Cantera Rodeb Y Acopios, Aplicada A Concretos Y Filtros. (pp. 36- 41,58-74,121-135).
- Geotecnia, S. C. (2003). Seminario de geotecnia para el diseño de pavimentos en la Sabana de Bogotá. Bogotá.
- Gutiérrez De López, L. (2003). El Concreto y Otros Materiales Para La Construcción. In 2003 (pp. 1–29).
- Ingeominas, I. C. (2018). Ingeominas. Obtenido de <https://www.igac.gov.co/es/contenido/instituto-colombiano-de-geologia-y-mineria-ingeominas>
- J. L. Chan, R. Solís and E. I. Moreno, “Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto”, *Rev. Ingeniería*, Vol. 7 (2), p. 39-46, México, 2003

Martinez Zamora, Lisandra; Torres Fuentes, M. (2013). Límites de conformidad de finos pasados por el tamiz 200. Influencia reológico- mecánica en la matriz del hormigón., 7(3), 79.

Nasri, F; Abderrahmane, B; Benavente, D. (2018). Influence of the petrophysical and durability properties of carbonate rocks on the deterioration of historic constructions in Tebessa (northeastern Algeria). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. Springer Ed. <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1410-7>.

Normas NTC del Instituto Colombiano de Normas Técnicas ICONTEC, NTC 77,98,237,176,3773

Normas técnicas INV.E del Instituto Nacional de Vías y Transporte. INVIAS. (2013). INV. E-214,133,123,222,223,238,218,227,230,220, ART 300.

R. Uribe.(1991). “El control de calidad en los agregados para concreto 3a parte. Construcción y tecnología” (México).

Rivera, G. (2013). *Concreto Simple*. Tecnología Del Concreto, 256.

Sámamo, S. E. (s.f.). *Atlas digital de minerales en Sección delgada*. México: Universidad de Sonora.

Sánchez de Guzmán, D. (2001). CAPÍTULO 3 Morteros Introducción. In *Tecnología del concreto y del mortero* (5th ed., p. 349). Santa Fe de Bogotá: Bandhar editores.

Sánchez, (2011). *Mineralogía II de Grado en Geología*. Prácticas. 9. Microscopía de luz transmitida de “no silicatos”: fluorita, barita, calcita y dolomita. Dpto. de Cristalografía y Mineralogía. Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad complutense. c/ José Antonio Nováis nº 2. 28040-Madrid., 5–8

Scholle, P. (1979). Constituents, textures, cements and porosities of sandstones and associated rocks. En *The American Association of Petroleum Geologist*. Oklahoma.

Solano, S. J. (2000). Mapa Geológico del Departamento de Boyacá, Bogotá, pág. 22, 23, 24.