

## EVALUACIÓN DE AGREGADOS DE ANFIBOLITA Y PEGMATITA PARA LA ELABORACIÓN DE CONCRETOS

Andrea González Ruiz <sup>1</sup>, Edwin Alexander Villa Plazas <sup>2</sup>, Carlos Alberto Ríos Reyes <sup>3\*</sup>

1: Geóloga, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia

2: Geólogo, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia

3: Geólogo PhD, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia

\* E-mail: carios@uis.edu.co

### RESUMEN

En el presente trabajo se realiza la caracterización petrográfica, física, mecánica y química de los agregados pétreos que se extraen en la cantera Tritupisvar Ltda., Santa Marta (Colombia). Las muestras analizadas se clasifican petrográficamente como anfibolita (SM-1) y pegmatita (SM-2). El peso específico presenta valores entre 2,9 (anfibolita) y 2,6 (pegmatita) g/cm<sup>3</sup>. El porcentaje de absorción de agua están en el rango 0,64-0,81%, con mayor porcentaje en la pegmatita. Los valores de desgaste por abrasión de 29,78-39,66% para anfibolita y pegmatita, respectivamente, mostraron buena solidez. El contenido de materia orgánica es inocuo. La afectación debida al ataque con Mg<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> varía del 0,01 al 0,33%, lo que sugiere una alta resistencia en condiciones altamente corrosivas, aunque es mayor en las mezclas preparadas con anfibolita. La resistencia a la compresión muestra valores en el rango de 16,28-18,63 MPa para el concreto a base de anfibolita (SM-1), 16,34-17,89 MPa para el concreto a base de pegmatita (SM-2), y 15,85-17,70 MPa para el concreto a base de mezcla de SM-1 + SM-2 con relación 50:50, lo cual revela que el comportamiento geomecánico de cilindros de concreto es satisfactorio, aunque este material no puede considerarse como un elemento estructural. Los resultados encontrados permiten afirmar que los agregados evaluados son adecuados para la preparación de concretos bajo diseños de mezcla adecuados.

**Palabras clave:** Agregados de rocas, petrografía, propiedades mecánicas, concreto, normas ASTM.

### ASSESSMENT OF AMPHIBOLITE AND PEGMATITE AGGREGATES FOR THE MANUFACTURE OF CONCRETE

#### ABSTRACT

In the present work petrographic, physical, mechanical and chemical characterization of rock aggregates extracted in the Tritupisvar Ltda quarry, Santa Marta (Colombia) are performed. Petrographically analyzed samples correspond to amphibolite (SM-1) and pegmatite (SM-2). The specific gravity has values between 2,9 (amphibolite) and 2,6 (pegmatite) g/cm<sup>3</sup>. The percentage of water absorption varies from 0,64 to 0,81%, with higher percentage in pegmatite. The abrasion values of 29,78 and 39,66% were obtained for amphibolite and pegmatite, respectively, indicating good strength. The organic matter content is harmless. The affectation due to Mg<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> attack varies from 0,01 to 0,33%, which suggests a high resistance in highly corrosive conditions, although it is higher in the amphibolite-based mixtures. The compressive strength values are in the range of

16,28-18,63 MPa for the amphibolite (SM-1)-based concrete, 16,34-17,89 MPa for the pegmatite (SM-2)-based concrete, and 15,85-17,70 MPa for the mixture (SM-1+SM-2)-based concrete with ratio 50:50, which reveals that the geomechanical behavior of concrete cylinders is satisfactory, although this material cannot be considered as a structural element. The results allow us to state that the evaluated aggregates are suitable for the preparation of concretes as well as for suitable designs.

**Keywords:** Rock aggregates, petrography, mechanical properties, concrete, ASTM standards.

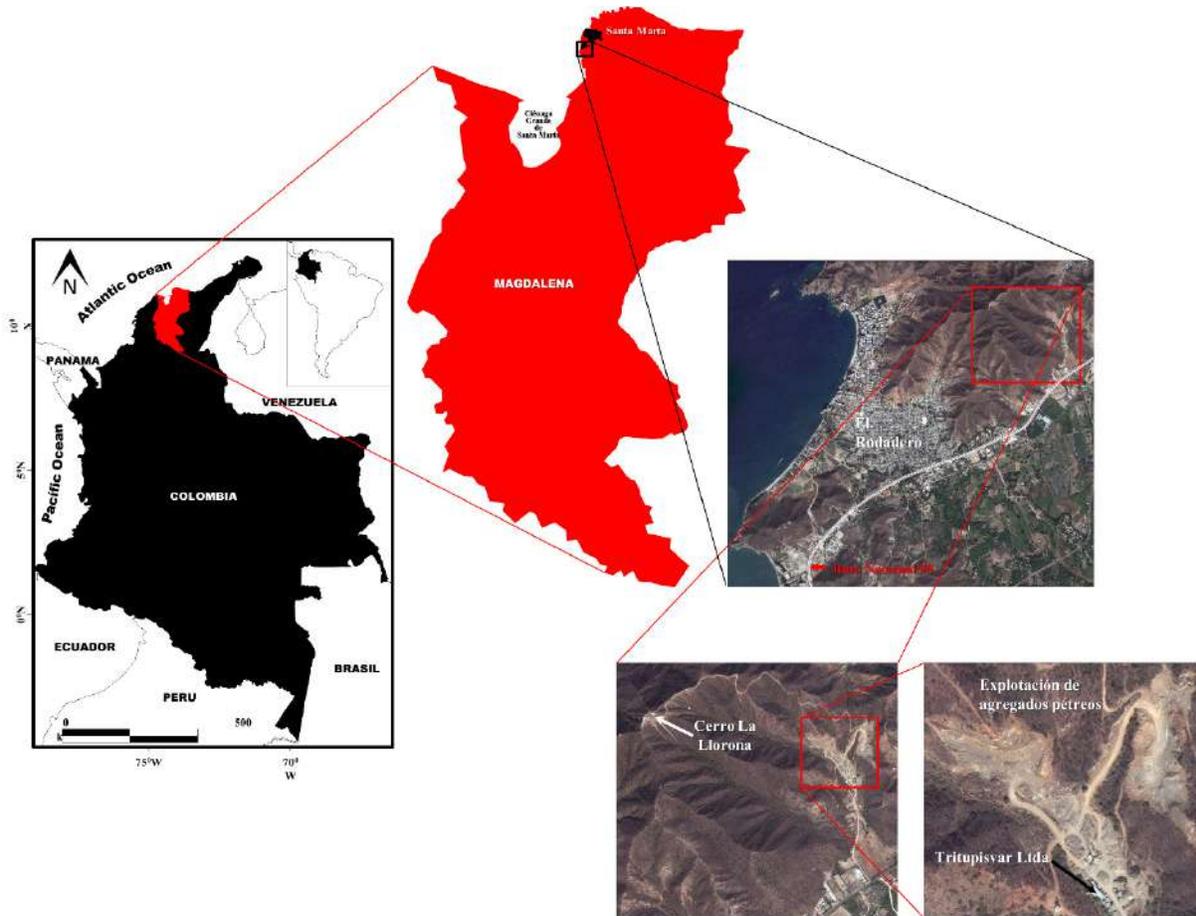
## 1. INTRODUCCIÓN

El concreto es el material de construcción más importante en todo el mundo y el más utilizado en todo tipo de obras de ingeniería civil, incluyendo infraestructuras, edificios bajos y de gran altura, instalaciones de defensa, protección del medio ambiente y desarrollo [1]. Sin embargo, este enfrenta enormes desafíos en términos de impacto ambiental, necesidades financieras, aceptación social e imagen [2]. El concreto es una mezcla heterogénea de cemento, agua, agregados finos y gruesos, con agregados gruesos, así como aditivos y materiales cementantes suplementarios [3]. El proceso de mezcla juega un papel muy importante en la microestructura del concreto que define la calidad del producto final [4]. Numerosos estudios evalúan el desempeño de concretos a base de diferentes agregados de roca [3,5–7]. Las propiedades físicas, mecánicas y químicas de los agregados gruesos juegan un papel fundamental sobre el comportamiento y el rendimiento del concreto [8]. La disponibilidad de agregados pétreos de alta calidad, bajo costo y bajo impacto ambiental, y la recirculación de los materiales es importante para el desarrollo de una sociedad sostenible [9]. El concreto es un material pétreo artificial que se obtiene de la mezcla, en determinadas proporciones, principalmente de pasta (agua-cemento) y agregados, constituyendo un esqueleto pétreo empacado lo más densamente posible y con la cantidad de pasta de cemento necesaria para llenar los huecos que éste deje [10]. Según Hudson [11], sus características afectan significativamente el desempeño del concreto fresco y endurecido y tienen un impacto sobre la rentabilidad del concreto. A excepción del agua, el agregado es el componente más económico para la preparación del concreto. Las reacciones entre los agregados pétreos y el medio alcalino con el cual se prepara el concreto son muy complejas, ya que muchos agregados naturales contienen sílice pobremente cristalina o amorfa y carbonato, los cuales pueden reaccionar con los álcalis (Na y K) de la mezcla cementante. Existen numerosos estudios sobre la reacción álcali-sílice (ASR) en el concreto, los cuales tratan de entender los fenómenos involucrados [12–24]. Sin embargo, la discusión sigue en pie debido al hecho de que la identificación del potencial de reactividad de un agregado parece ser un gran reto aún por alcanzar. La caracterización del potencial de ASR de los tipos de rocas es fundamental para mitigar su impacto en el concreto. No obstante, el deficiente conocimiento de los agregados es responsable de parte de la gran cantidad de dinero que se gasta cada año en la rehabilitación de estructuras deterioradas [25]. Los métodos que se han desarrollado a lo largo de los años para la identificación de los componentes de agregados y la caracterización del potencial de ASR, incluyen dos fases: (1) indentificación y cuantificación óptica a partir del estudio petrográfico de materias primas y secciones delgadas, y (2) evaluación del desempeño y durabilidad de los agregados en el concreto. Por lo tanto, el agregado juega un papel importante al ser un componente dinámico dentro de la mezcla y sus características como la porosidad, granulometría, absorción de humedad, forma, textura, resistencia a la ruptura, módulo de elasticidad y su composición mineralógica afectan notablemente el comportamiento del concreto [26]. Sin embargo, los métodos de dosificación de mezcla deben fomentar la optimización del

concreto y en consecuencia del agregado [27]. La mayoría de las obras de ingeniería civil en Colombia utilizan el concreto como material fundamental de la construcción. En este país el consumo y la demanda del concreto va en aumento, generando también la necesidad de contar con agregados que tengan un adecuado desempeño dentro de las mezclas ya que no todos son aptos para este fin, por esta razón conocer las propiedades petrográficas, físicas, mecánicas y químicas de los agregados, permite establecer el comportamiento que tendrán sobre la resistencia, estabilidad dimensional y durabilidad del concreto. La influencia de las propiedades de estas rocas como agregados, merecen atención, por lo que es necesario efectuar los ensayos respectivos para obtener resultados confiables y satisfactorios sobre los aspectos físicos, mecánicos, petrográficos y químicos de los mismos de acuerdo a las Normas de la Sociedad Americana para el Ensayo de Materiales - ASTM (por sus siglas en inglés) y sus equivalentes a la normativa colombiana que han sido adaptadas por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas (ICONTEC), el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) y el Instituto Nacional de Tecnologías de la Comunicación (INTECO). El objetivo principal del presente estudio es llevar a cabo la evaluación de las propiedades geomecánicas de agregados pétreos actualmente en explotación en una cantera de propiedad de la empresa Tritupisvar Ltda para determinar su calidad en la preparación de concreto, aplicando la normativa vigente.

## 2. CONTEXTO GEOLÓGICO

La cantera de explotación de agregados pétreos de la empresa Tritupisvar Ltda se encuentra localizada al suroeste del distrito de Santa Marta y al noreste de El Rodadero (Colombia), específicamente en zona rural, y cuyo acceso se realiza a partir de la Transversal del Caribe (Ruta Nacional 90) la cual comunica las ciudades de Santa Marta y Barranquilla (Figura 1). Sus coordenadas planas son:  $X = 985.000-987.000$ , y  $Y = 1.731.000-1.732.000$ . Desde el punto de vista geológico, esta cantera se enmarca dentro del flanco noroeste de la Sierra Nevada de Santa Marta (borde occidental de la Provincia Geotectónica de Santa Marta). Aquí afloran principalmente anfibolitas, esquistos anfibólicos, esquistos micáceos, y esquistos cuarzosos dispuestos en fajas de tendencia noreste pertenecientes a la Formación Esquistos de Gaira, la cual forma parte del cinturón metamórfico de Santa Marta. Esta secuencia de rocas metamórficas está cortada por el Batolito de Santa Marta, constituido por masas ígneas de origen intrusivo de composición principalmente cuarzodiorítica, el cual fue emplazado durante el Paleógeno en un ambiente de arco magmático y que parece mostrar una gradación con facies félsicas hacia el oeste y más intermedias hacia el este [28,29]. Algunas masas intrusivas de composición granítica forman además pequeños cuerpos, y diques pegmatíticos que atraviesan las rocas arriba señaladas. Recientemente, Figueroa *et al.* [30] llevaron a cabo la evaluación de agregados de granitoides y rocas asociadas del Batolito de Santa Marta, las cuales son adecuadas para la preparación de concreto.

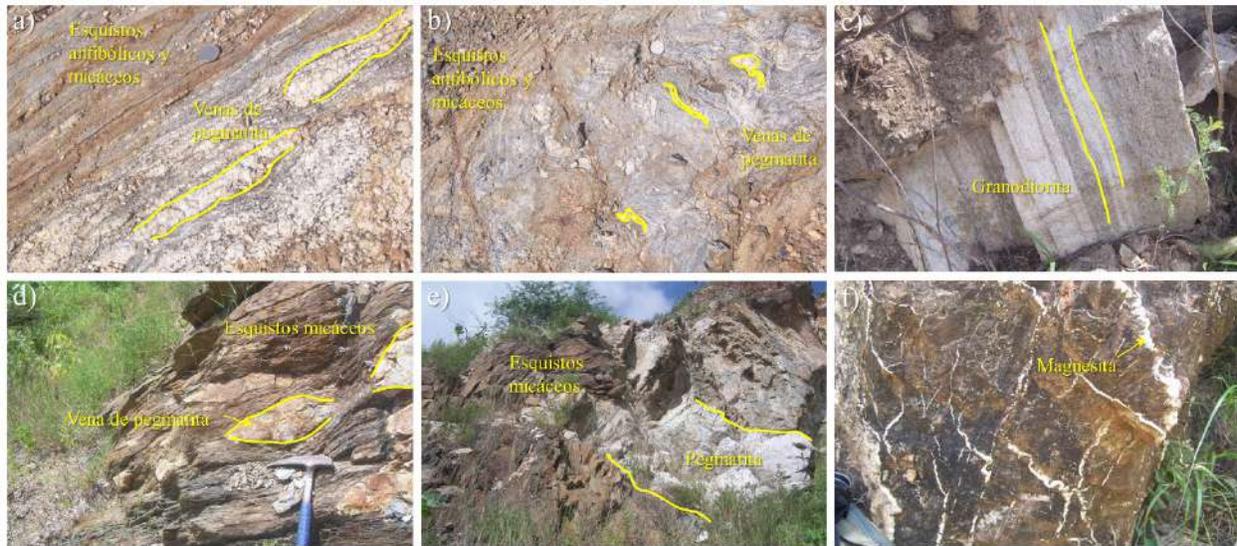


**Figura 1.** Imágenes satelitales de la localización de la cantera Tritupisvar Ltda, tomado de Google Earth [31].

### 3. OCURRENCIA DE CAMPO

La Figura 2 ilustra los rasgos geológicos más importantes observados en el área de explotación de la empresa Tritupisvar Ltda. Aquí afloran principalmente esquistos anfibólicos y micáceos con foliación metamórfica plano paralela a ligeramente ondulosa (Figuras 2a-2b), en los que se destaca la ocurrencia de venas pegmatíticas de tres tipos: (1) de geometría lenticular que siguen la foliación metamórfica (Figura 2a) y son localmente foliadas; (2) de geometría tabular que cortan a bajo ángulo la foliación metamórfica; (3) afectadas por la deformación (Figura 2b). Además, se observan diques granodioríticos en ocasiones foliados que generalmente siguen la foliación metamórfica (Figura 2c) mientras que otros la cortan a ángulos aproximadamente de 45°. Se reconocen venas de cuarzo de geometría lenticular que se disponen de manera concordante a la foliación metamórfica. Los esquistos micáceos presentan delgadas intercalaciones de esquistos tremolíticos actinolíticos de foliación metamórfica ondulosa. Venas pegmatíticas de hasta 20 cm de espesor, con geometría lenticular, se disponen de manera concordante con la foliación metamórfica de los esquistos micáceos (Figura 2d), mientras que otras de dimensiones métricas de espesor son de geometría tabular, grano grueso y cortan a bajo ángulo las rocas metamórficas (Figura 2e). La Figura 2f ilustra la ocurrencia de “*stockworks*” de magnesita, los cuales definen un estilo de mineralización. Obsérvese como algunas venillas se presentan localmente deformadas. La magnesita es criptocristalina, masiva, de color blanco, y se presenta en vetillas en rocas ultrabásicas

que han sido transformadas a serpentinitas en contextos tectónicos asociadas a complejos ultramáficos, por lo que se reconocen serpentinas que están relacionadas a la fracturación de las dorsales medio oceánicas que incorporan agua a zonas profundas, y/o igualmente asociadas a sistemas de fallas transformantes que también permiten la infiltración de agua a zonas profundas de la corteza oceánica, dando lugar a las denominadas serpentinitas de fondo oceánico [32,33]. Según Brydie [34], la formación de magnesita podría haberse favorecido durante el fracturamiento inicial de las serpentinitas, proceso probablemente iniciado por la producción de CO<sub>2</sub> a partir de la descarboxilación de sedimentos ricos en materia orgánica.



**Figura 2.** Aspectos geológicos generales de la secuencia de rocas que forman parte del área de explotación de la empresa Tritupisvar Ltda. (a) Venas pegmatíticas de geometría lenticular. (b) Venas pegmatíticas deformadas. (c) Dique granodiorítico. (d) Vena de pegmatita de geometría lenticular dispuestas de manera concordante a la foliación metamórfica de esquistos micáceos. (e) Pegmatita de grano grueso cortando esquistos micáceos. (f) Magnesita desarrollando “stockworks”.

## 4. MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.1. Muestreo de campo

El trabajo de campo incluyó una visita técnica para llevar a cabo el reconocimiento del frente de explotación de la cantera Tritupisvar (Figura 3a), teniendo en cuenta la ocurrencia de las rocas actualmente en explotación como agregados pétreos (Figura 3b), así como su composición mineral y rasgos texturales y estructurales. Adicionalmente, se recolectó información geológica con el fin de conocer acerca de los tipos de agregados de roca obtenidos en la cantera, las técnicas de minería, la producción y aplicación de agregados en la industria de la construcción, entre otros aspectos. Se recolectaron 2 muestras (bloques de roca) de aproximadamente 50 cm x 50 cm x 40 cm a fin de tener suficiente material para realizar los ensayos (Figura 3c). El muestreo de agregados se llevó a cabo de acuerdo con las normas ASTM D75/D75M [35] y NTC 129 [36].



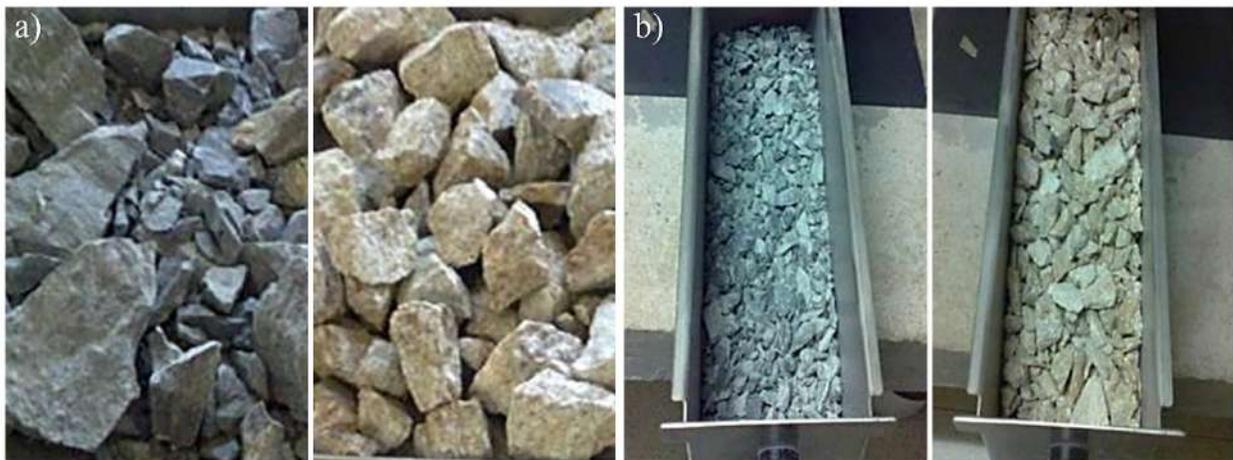
**Figura 3.** Etapas desarrolladas durante el muestreo de campo y la preparación de muestras y concretos. (a) Panorámica al Cerro La Llorona desde el frente de explotación. (b) Operaciones de explotación de la cantera. (c) Bloques de roca como fuentes de agregados pétreos.

## 4.2. Materias primas

El cemento Portland tipo I de referencia usado en este estudio es fabricado por Holcim (Colombia) S.A., Nobsa (Boyaca). La arena utilizada en la preparación de las diferentes mezclas fue extraída del Río Chicamocha (Santander), la cual es reconocida por su alta calidad para la preparación de materiales de alta resistencia. Los agregados pétreos de anfibolita y pegmatita fueron extraídos en la cantera Tritupisvar que se encuentra en la carretera Troncal del Caribe km 6 vía Gaira en los alrededores del casco urbano de Santa Marta, Magdalena.

### 4.2.1 Preparación

A partir de las muestras de anfibolita y pegmatita, se obtuvieron los agregados gruesos triturando las muestras (Figura 4a) en una trituradora de mandíbula (Retsch Jaw Crusher BB200) hasta obtener fragmentos de roca de ~3.8 cm (Figura 4b), lo cual se realizó en el Laboratorio de Trituración y Molienda de la Escuela de Geología. Por otra parte, en el Laboratorio de Preparación de Materiales Geológicos de la Escuela de Geología se llevó a cabo la elaboración de secciones delgadas utilizando un sistema de seccionamiento Petro-Thin y una pulidora Buehler (MetaServ modelo 2000) para su posterior análisis petrográfico.



**Figura 4.** (a) Fragmentos de roca antes de trituración. (b) Fragmentos de roca después de trituración.

#### *4.2.2. Caracterización petrográfica*

La caracterización petrográfica de los agregados gruesos de anfibolita y pegmatita se realizó en secciones delgadas, haciendo énfasis en sus rasgos microestructurales y texturales, y su composición mineralógica, así como en la presencia de microfracturas. La determinación de la composición mineralógica (principalmente la distribución de minerales secundarios y opacos), así como el carácter textural y estructural es importante para evaluar la tasa de meteorización de las rocas ensayadas. Esta fase metodológica es fundamental para determinar las características físicas y químicas de los materiales, describir y clasificar sus componentes, determinar la cantidad relativa de sus componentes petrográficos y/o mineralógicos, y comparar muestras de agregados de diferentes fuentes [37]. El análisis petrográfico de agregados pétreos para la preparación de concreto se llevó a cabo en el Laboratorio de Microscopía de la Escuela de Geología según las normas ASTM C295/C295M [38] y NTC 3773 [39], utilizando un microscopio triocular de luz transmitida marca Nikon (modelo Labophot2-POL), dotado de un sistema de microfotografía NIKON AFX-DX para la toma de fotomicrografías.

#### *4.2.3. Caracterización física, mecánica y química*

La caracterización física, mecánica y química tanto de las materias primas como de los concretos se llevó a cabo en el Laboratorio de Caracterización de Materiales de Construcción de la Escuela de Ingeniería Civil se describen a continuación. Las normas ASTM C136/C136M [40] y NTC 77 [41] se siguieron para el análisis granulométrico (Figura 5a), utilizando un agitador de tamices Ro-Tap con juego de tamices mallas 1", 3/4", 3/8", N° 4 y N° 8. El porcentaje de humedad (Figura 5b) se calculó según las normas ASTM C566 [42] y NTC 1776 [43]. Las normas ASTM C535 [44] y NTC 93 [45] se utilizaron para determinar la resistencia a la degradación de agregados de grano grueso por abrasión e impacto en la máquina Los Ángeles (Figuras 5c-5d). La estimación del peso unitario (suelto y compactado) y porcentaje de vacíos (Figura 5e) y de la densidad y absorción (Figura 5f) se llevó a cabo de acuerdo con las normas ASTM C29/C29M [46] y NTC 92 [47] y ASTM C127 [48] y NTC 176 [49], respectivamente. Las normas ASTM C786/C786M [50] y NTC 226 [51] fueron utilizadas para determinar la finura del cemento. El peso específico del cemento y la arena fue determinado según las normas ASTM C128 [52] INV E-222 [53]. La determinación de impurezas orgánicas en agregados finos para concreto se llevó a cabo de acuerdo a las normas ASTM C40/C40M [54] y NTC 127 [55], utilizando un Orbeco - Hellige 815 Tester.



**Figura 5.** (a) Análisis granulométrico. (b) Determinación del porcentaje de humedad. (c)-(d) Ensayo de resistencia a la degradación de agregados gruesos por abrasión e impacto en la máquina Los Ángeles. (e) Determinación del peso unitario y porcentaje de vacíos. (f) Ensayo de densidad y absorción.

### 4.3. Concretos

#### 4.3.1 Preparación de mezclas de concretos

Se prepararon mezclas de concreto, incorporando en estas el uso de agregados pétreos de anfibolita y pegmatita y una mezcla de las dos. Los ingredientes utilizados por  $m^3$  de concreto fueron: 345,6  $kg/m^3$  de Cemento Portland tipo I; 160  $kg/m^3$  de agua; 760  $kg/m^3$  de agregado fino (arena); 1050  $kg/m^3$  de agregado grueso (anfibolita o pegmatita). Las mezclas resultantes fueron introducidas en moldes cilíndricos de PVC de 10 cm de diámetro x 25 cm de altura (Figura 6).



**Figura 6.** Preparación de mezclas de concreto. (a) Mezclado de arena, agregado y agua con cemento. (b) Recubrimiento interno de moldes cilíndricos de PVC con ACPM. (c) Llenado de los moldes.

#### 4.3.2 Caracterización física, mecánica y química de concretos

Las normas ASTM C39/C39M [56] y NTC 673 [57] se siguieron en la determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos (Figura 7a), utilizando una máquina de

prueba universal (Alfred J. Amsler) con una carga máxima de hasta 5 toneladas; las muestras fueron sometidas a una carga de compresión a una velocidad de cruceta de 0,5 mm/min. Las normas ASTM C88 [58] y NTC 126 [59] se utilizaron en la determinación de la resistencia de los agregados al ataque con sulfato de magnesio (Figura 7b). El potencial de reactividad ASR de los agregados pétreos (Figura 7c) se determinó según las normas ASTM C289 [60] y NTC 175 [61]. González y Villa [62] describen en detalle estos ensayos. La determinación de la calidad de los agregados pétreos se basó tanto en sus características petrográficas como en sus propiedades físicas, mecánicas y químicas, ya que el uso de estos materiales de construcción requiere un control de calidad riguroso. Los agregados utilizados en el presente estudio fueron seleccionados con base en su mineralogía, litología y rasgos texturales y estructurales, a partir de una inspección visual preliminar. El diseño de mezcla recurrió al uso de la fracción apropiada de agregado grueso de anfibolita o pegmatita, manteniendo esencialmente la misma gradación.

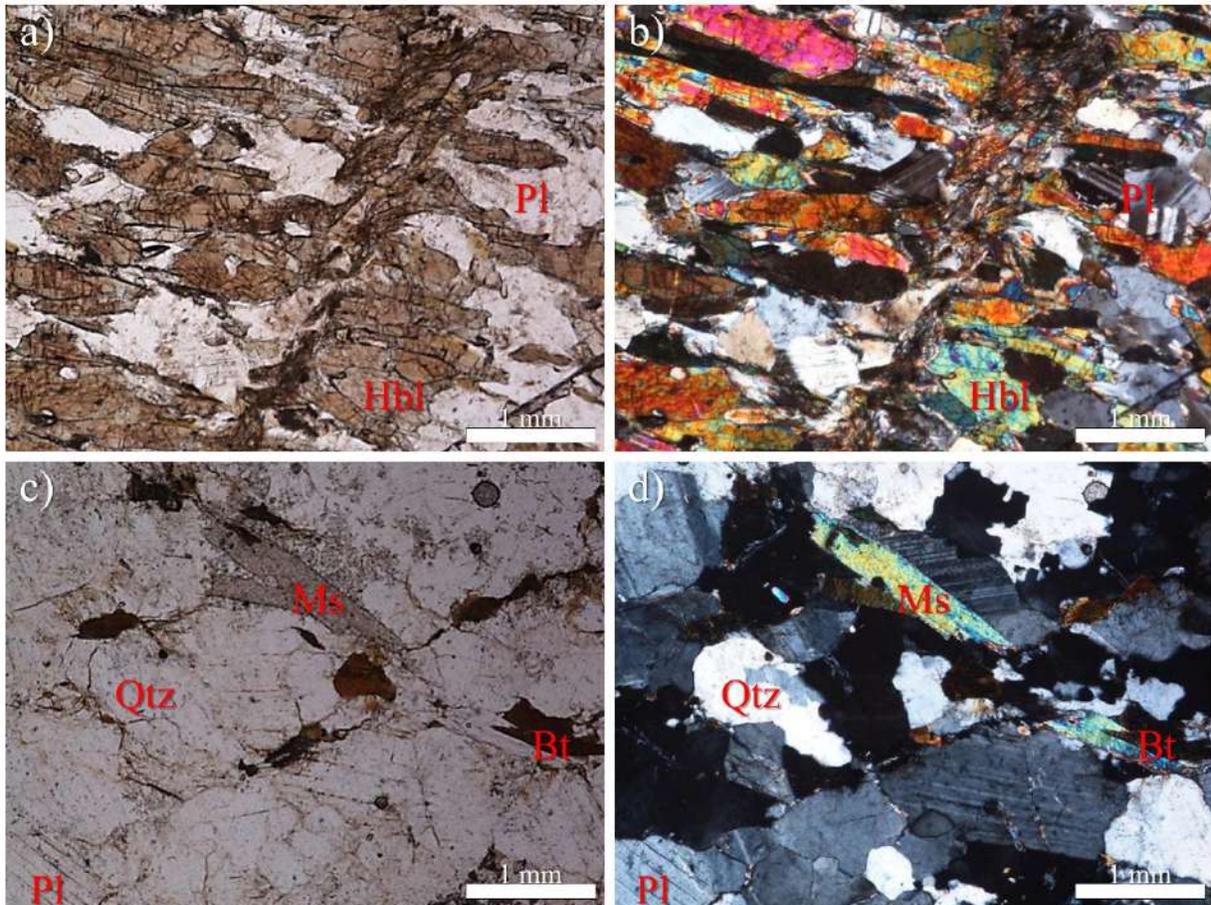


*Figura 7. (a) Ensayo de resistencia a la compresión. (b) Ensayo de resistencia al ataque con  $Mg_2SO_4$ . (c) Determinación del potencial de ASR.*

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Petrografía de agregados pétreos

La caracterización mineralógica de agregados pétreos a partir del uso de la petrografía constituye una poderosa herramienta que permiten identificar objetivamente las fases minerales presentes. Los agregados de roca utilizados en el presente estudio presentan una apariencia masiva o foliada dependiendo de su tipo litológico. El análisis petrográfico revela no solo importantes rasgos estructurales y texturales de las rocas analizadas sino también su composición mineral y tipo de fases minerales. En la Figura 8 se pueden observar los principales rasgos petrográficos de los tipos litológicos estudiados. La mineralogía de estas rocas es muy importante como quiera que la presencia de  $SiO_2$  puede atribuirse no solo a minerales, tales como cuarzo y feldspatos sino también a la presencia de minerales ferromagnesianos (*e.g.*, hornblenda o biotita), los cuales son fases minerales esenciales en estas rocas. Por otra parte, minerales del grupo de los carbonatos, tales como calcita y dolomita no fueron observados como fases minerales primarias. Por lo tanto, atribuir el contenido de  $CaO$  a estos minerales no es válido para las rocas estudiadas, ya que la presencia de este componente podría ser atribuida a minerales como hornblenda, epidota, zoisita o titanita.



**Figura 8.** Rasgos petrográficos a microscópica (a) y (b) en luz plana no analizada, y (c) y (d) en luz plana analizada, de las muestras estudiadas. Abreviaturas de los minerales según Kretz [63].

La muestra SM-1 corresponde a una anfíbolita (Figuras 8a-8b), cuyos minerales principales son plagioclasa (40%) y hornblenda (38%), con cuarzo (15%), zoisita (5%) y titanita (2%) como minerales secundarios. La roca presenta una estructura bandeada con bandas nematobásticas de hornblenda que definen la foliación principal de la roca intercaladas con bandas granoblásticas cuyo dominio está constituido por plagioclasa y cuarzo. Los minerales de alteración identificados son sericita después de plagioclasa y clorita después de hornblenda. La muestra SM-2 corresponde a una pegmatita (Figuras 8c-8d), cuyos minerales principales son cuarzo (28%), plagioclasa (55%), feldespato potásico - microclina y ortoclasa (10%); con hornblenda (5%) y clinozoisita (2%) como minerales de segundo orden. La roca muestra una estructura masiva y textura holocristalina. Los minerales de alteración identificados son sericita después de plagioclasa, caolinita después de feldespato potásico y clorita después de hornblenda. El análisis petrográfico permitió clasificar y determinar la composición mineralógica de los agregados pétreos, determinando así las fases minerales esenciales y accesorias, así como sus porcentajes, los rasgos microestructurales y texturales, su grado de meteorización y presencia de minerales de alteración, y microfracturamiento. La presencia de cuarzo en ambas muestras (SM-1 anfíbolita y SM-2 pegmatita) permite deducir que probablemente, aunque el cuarzo es una fase mineral muy estable, en medio alcalino podría promover el desarrollo de una reacción álcali-sílice, lo cual es un parámetro crítico que afecta el desempeño y la durabilidad del concreto, como quiera que repercute

en el debilitamiento estructural y acorta la vida útil de las estructuras de concreto [64]. En términos generales, con base en la petrografía de los agregados pétreos analizados, estos no son materias primas adecuadas para la elaboración de concreto.

Las propiedades físicas de los agregados gruesos están fuertemente controladas por su estado de meteorización [65,66]. La meteorización física (desintegración) y química (descomposición) de estos agregados podría estar además influenciada por la naturaleza de la roca, el clima, los factores bióticos, la topografía y el tiempo, entre otros aspectos. Algunas alteraciones menores se observaron en los agregados ensayados, las cuales corresponden a la alteración incipiente de plagioclasa a sericita (agregados de individuos diminutos de fuerte birrefringencia), feldespato potásico a caolinita (agregados de aspecto terroso que le dan una apariencia sucia al mineral) y biotita u hornblenda a clorita (de color verde pálido y leve pleocroísmo, y colores de interferencia anómalos, desarrollándose a lo largo de los bordes y trazas de exfoliación). El proceso de meteorización de las rocas, el cual se revela por la formación de estos minerales de alteración, tiene gran influencia no solo en el comportamiento de los agregados pétreos sino también en el desempeño y durabilidad del concreto preparado a base de estos geomateriales. Según Kazi and Al-Mansour [65], así como las características que indican la alteración de la roca, existen otras, las cuales indirectamente son el producto de las primeras, como la densidad, la resistencia mecánica y la permeabilidad.

Los óxidos generalmente están presentes como productos de procesos de degradación de minerales como la biotita o la hornblenda. Desde el punto de vista petrográfico, la anfibolita (SM-1) presenta una estructura foliada, lo cual significa que contiene numerosos planos de debilidad a través de los cuales se podría fragmentar, así como microfracturas que cortan la foliación de la roca casi a ángulo recto, evidenciando su fragilidad, mientras que la pegmatita (SM-2) muestra una apariencia masiva con muy pocas a casi ausentes microfracturas.

## **5.2. Características físicas, mecánicas y químicas de las materias primas**

Los resultados de la caracterización física, mecánica y química para las materias primas analizadas se describen a continuación y se resumen en la Tabla 1. El número y series de especímenes están de acuerdo con los estándares vigentes.

**Tabla 1.** Resumen de los resultados de los ensayos físicos, mecánicos y químicos de los agregados pétreos.

Ensayo	Muestra	
	SM-1	SM-2
<b>Propiedades físicas</b>		
Peso específico (g/cm <sup>3</sup> )	2,9	2,6
Peso unitario suelto (kg/m <sup>3</sup> )	1.448,18	1.533,78
Peso unitario compactado (kg/m <sup>3</sup> )	1.568,45	1.682,70
Absorción de agua (%)	0,64	0,81
% de vacíos	81,74	81,17
Contenido de materia orgánica (g/100g)	Inocuo	Inocuo
Humedad (%)	0,28	0,28
<b>Propiedades mecánicas</b>		
Desgaste por abrasión (%)	29,78	39,66
Resistencia a la compresión (MPa)	59,45	35,22
<b>Propiedades químicas</b>		
Desintegración por ataque con Mg <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,33	0,01
Contenido de materia orgánica (g/100g)	Inocuo	Inocuo
% sílice	85,3	96,2

La Tabla 2 presenta los pesos y porcentajes retenidos en cada tamiz para las muestras de agregados pétreos utilizadas en el ensayo de granulometría. La distribución del tamaño de partículas de los agregados se obtuvo mediante el análisis granulométrico según las normas ASTM C136/C136M [40] y NTC 77 [41].

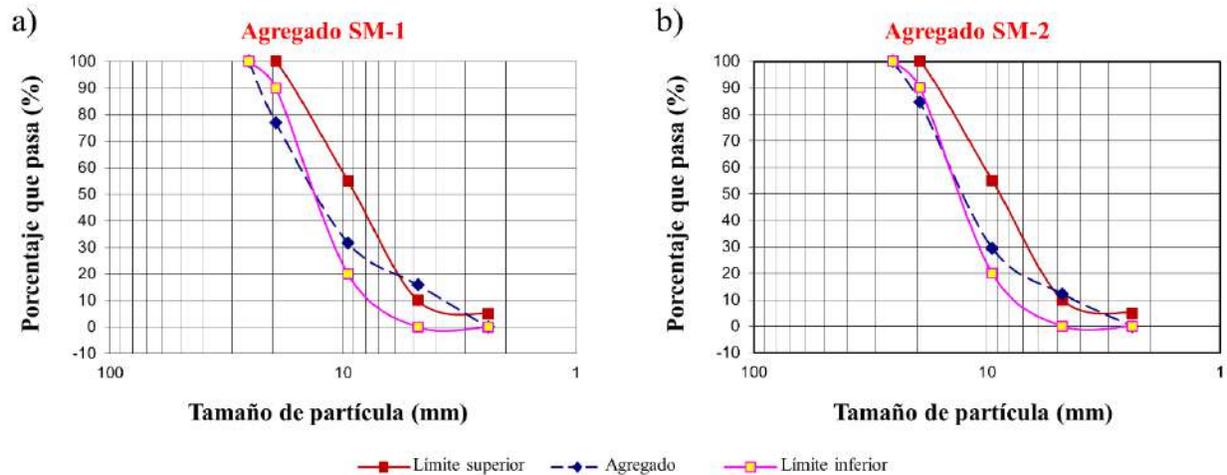
**Tabla 2.** Tabulación de datos de ensayos de granulometría de los agregados pétreos.

Malla N°	Apertura del tamiz (mm)	Peso retenido (g)		% retenido		% que pasa		Límites según la norma ASTM C136-06			
		SM-1	SM-2	SM-1	SM-2	SM-1	SM-2	SM-1 LI	SM-1 LS	SM-2 LI	SM-2 LS
1"	25,40	0	0	0,0	0,0	100,0	100,0	100	100	100	100
3/4"	19,00	2.538	1.694	23,1	15,4	76,9	84,6	90	80	90	80
3/8"	9,51	4.974	6.061	45,2	55,1	31,7	29,5	20	55	20	55
N° 4	4,76	1.742	1.897	15,8	17,2	15,9	12,3	0	10	0	10
N° 8	2,38	1.746	1.348	15,9	12,3	0,0	0,0	0	5	0	5
Fondo	0,00	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0				

LI, límite inferior; LS, límite superior

Los datos correspondientes al análisis granulométrico de agregados se representan gráficamente a través de curvas granulométricas (Figura 9), las cuales muestran que la distribución granulométrica de los agregados ensayados no se encuentra dentro de los límites establecidos por las normas ASTM C136/C136M [40] y NTC 77 [41]. Por lo tanto, esta distribución granulométrica es inadecuada ya que no cumple con los límites establecidos para los tamices 3/4" (19 mm) y N° 4

(2,36 mm) al presentar un exceso de finos y gruesos, no permitiendo una uniformidad en cada material. Sin embargo, esta propiedad puede ser controlada y modificada haciendo uso de los tamices 3/2", N° 5 y N° 6, así como también realizando la subdivisión del agregado en fracciones que se manejan y dosifican individualmente en proporciones adecuadas para integrar la curva granulométrica al porcentaje total de gravas.



agregados aumenta con el aumento de contenido de cuarzo y feldespato. Finalmente, debido a que las micas son minerales laminares y blandos, su presencia tendrá un efecto negativo más fuerte sobre la resistencia a la abrasión que en la fragilidad de la roca.

La Tabla 1 revela que los valores de peso unitario obtenidos para los agregados pétreos SM-1 (1.448,18 y 1.568,45 kg/m<sup>3</sup>) y SM-2 (1.533,78 y 1.682,70 kg/m<sup>3</sup>) se encuentran comprendidos dentro del rango establecido por las normas ASTM C29/C29M [46] y NTC 92 [47] para agregados más comúnmente utilizados en el concreto estructural y no estructural que varían de 1.300 a 1.750 kg/m<sup>3</sup>, es decir, agregados de peso normal. Esta norma también establece que el porcentaje de vacíos para agregados gruesos debe encontrarse entre 30% y 45%. No obstante, las muestras ensayadas presentan porcentajes muy superiores (81,74% para la muestra SM-1, y 81,17% para la muestra SM-2). Esto puede explicarse como consecuencia de la angularidad de los agregados haciendo que la demanda de pasta (cemento y agua) sea mayor.

Los resultados de los ensayos de densidad (peso específico) y absorción se presentan en la Tabla 1. Según las normas ASTM C127 [48] y NTC 176 [49], el peso específico para agregados gruesos se encuentra en el rango 2,4-2,9 g/cm<sup>3</sup>, el cual es usado en ciertos cálculos para el diseño y control de mezclas. Generalmente no se le emplea como índice de calidad del agregado. Para las muestras analizadas se obtuvieron valores de 2,9 g/cm<sup>3</sup> para agregados de anfíbolita y de 2,6 g/cm<sup>3</sup> para agregados de pegmatita, encontrándose así dentro del rango permisible. La densidad más baja mostrada por la pegmatita (muestra SM-1), refleja su composición mineralógica. Los agregados ensayados pueden considerarse como rocas de baja porosidad, pero la muestra SM-1 exhibe un valor de porosidad significativa. Esta característica es única para cada material, por lo tanto, debe ser excluido de las especificaciones para el uso en mezclas de concreto. Según las normas ASTM C127 [48] y NTC 176 [49], el agregado grueso debe presentar un porcentaje de absorción (contenido de humedad a superficie seca saturada) entre 0,2 y 4,0 %. Los porcentajes de absorción obtenidos en los agregados ensayados (0,64 % para agregados de la muestra SM-1, y 0,81% para agregados de la muestra SM-2) se encuentran dentro del rango establecido por la norma.

La finura del Cemento Portland tipo I utilizado en el presente trabajo es del 99.31 %. El peso específico del cemento y la arena fue de 2,89 y 2,52 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente. Los resultados del ensayo de impurezas orgánicas en agregados finos para concreto ponen de manifiesto que las muestras de agregados no presentan materia orgánica, de acuerdo con las especificaciones de las normas ASTM C40/C40M [54] y NTC 127 [55]. Por lo tanto, se concluye que las propiedades del concreto como la resistencia y durabilidad no se verán afectadas pues no hay interferencia en las reacciones químicas de hidratación del cemento durante el proceso de fraguado.

### **5.3. Características físicas, mecánicas y químicas de los concretos**

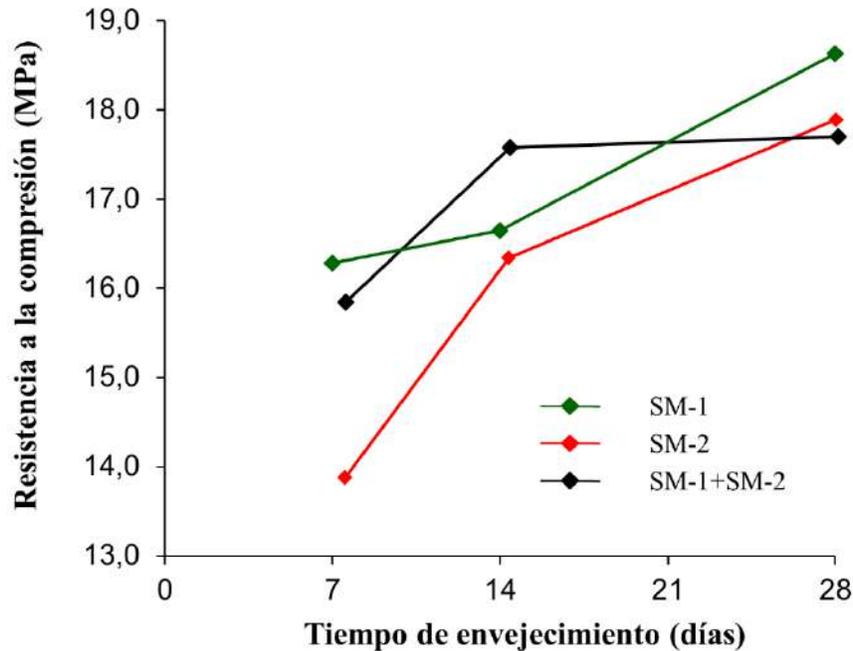
En la Tabla 3 se presentan los resultados del ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto preparado con agregados gruesos de anfíbolita (SM-1), pegmatita (SM-2), y la mezcla de ambas en proporción 50:50 después de 7, 14 y 28 días.

**Tabla 3.** Resultados de resistencia a la compresión de cilindros de concreto.

Ensayo (T)	Código agregado	P (N)	Tiempo de envejecimiento (días)	Resistencia a la compresión		
				RC (MPa)	Prom. RC (MPa)	Desviación estándar ( $\sigma$ )
T1-1	SM-1-7-1	133.370,44	7	16,78	16,28	0,70
T1-2	SM-1-7-2	125.525,12		15,79		
T2-1	SM-1-14-1	137.293,10	14	17,27	16,65	0,87
T2-2	SM-1-14-2	127.486,45		16,04		
T3-1	SM-1-28-1	153.964,41	28	19,37	18,63	1,05
T3-2	SM-1-28-2	142.196,43		17,89		
T4-1	SM-2-7-1	98.066,50	7	12,34	13,88	2,18
T4-2	SM-2-7-2	122.583,13		15,42		
T5-1	SM-2-14-1	122.583,13	14	15,42	16,34	1,31
T5-2	SM-2-14-2	137.293,10		17,27		
T6-1	SM-2-28-1	137.293,10	28	17,27	17,89	0,87
T6-2	SM-2-28-2	147.099,75		18,50		
T7-1	SM-(1+2)-7-1	121.602,46	7	15,30	15,85	0,78
T7-2	SM-(1+2)-7-2	130.428,45		16,41		
T8-1	SM-(1+2)-14-1	132.389,78	14	16,65	17,58	1,31
T8-2	SM-(1+2)-14-2	139.254,43		18,50		
T9-1	SM-(1+2)-28-1	143.177,09	28	17,89	17,70	0,26
T9-2	SM-(1+2)-28-2	139.254,43		17,52		

P, carga puntual; RC, resistencia a la compresión; Prom., promedio

En la Figura 10 se comparan los resultados obtenidos. La resistencia a los 28 días es considerada casi como el máximo de tolerancia a la compresión que puede soportar un elemento de concreto, sin embargo, como es sabido el concreto sigue aumentando su resistencia a la compresión con el tiempo de envejecimiento, aunque esto está condicionado a la evolución mineralógica del cemento Portland tipo I durante el proceso de hidratación, el cual puede revelar la transformación de fases minerales anhidras del cemento en fases estables hidratadas. De lo anterior se observa que casi el 100% de la resistencia a la compresión se presenta a los 28 días. Para la mezcla SM-1+SM-2 puede ser debido a que la curva de resistencia casi se estabiliza a los 28 días, mientras que para las muestras SM-1 y SM-2 las curvas continúan aumentando su resistencia sin estabilizarse.



**Figura 10.** Resultados de resistencia a la compresión de cilindros de concreto.

Los resultados de los especímenes de concreto probados no presentan una resistencia a la compresión igual o superior a 21 MPa y la mayoría de los ensayos de resistencia produjo un resultado superior a  $f'c$  en más de 3,45 MPa. Según su resistencia a la compresión, estos se clasificarían como concretos normales. Los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión, se emplean fundamentalmente para determinar que la mezcla de concreto suministrada cumpla con los requerimientos de la resistencia especificada ( $f'c$ ) para una estructura determinada. La explicación de estos resultados bajos en los ensayos de resistencia a compresión podría ser una consecuencia de un inapropiado protocolo experimental o probablemente el exceso de agua en las mezclas diseñadas y, es importante considerar a futuro el desarrollo de un trabajo experimental que permita la obtención de concretos alta resistencia a la compresión. Por lo tanto, desde este punto de vista, los resultados de resistencia a la compresión no cumplen con la norma sismo-resistente colombiana.

Los resultados de ataques con sulfato de magnesio (Tabla 1) revelan que las muestras presentan un porcentaje de afectación menor al 1% por ataque con sulfato de magnesio, siendo para los agregados de la muestra SM-1 0,33% y para los agregados de la muestra SM-2 0,01%, lo cual está dentro de los límites establecidos en las normas ASTM C88 [58] y NTC 126 [59]. Por lo tanto, las muestras presentan alta resistencia al deterioro por acción de los agentes atmosféricos durante la vida útil de la obra en que estos sean usados.

#### 5.4. Potencial de reactividad álcali-sílice

El potencial de reactividad álcali-sílice (ASR) de los agregados es fundamental en el desempeño y durabilidad del concreto. La ASR es una reacción que se produce con el tiempo en el concreto entre la pasta de cemento altamente alcalina y la sílice pobremente cristalina o amorfa, la cual puede encontrarse en muchos agregados comunes [68]. Las propiedades físicas y proporción de los materiales perjudiciales que presentan potencial de reactividad con el cemento son cruciales con

relación a la evaluación del desempeño y durabilidad de estructuras, y la proporción de constituyentes nocivos está controlada por la composición mineralógica de los agregados pétreos y su grado de meteorización [69]. Por lo tanto, el análisis petrográfico es fundamental como apoyo sobre la toma de decisiones en la realización de ensayos químicos adicionales y en la selección del agregado [70]. Los resultados de la prueba de determinación de sílice por el método gravimétrico son: SM-1 85,3% y SM-2 96,2% como se observa en la Tabla 1. Sin embargo, es necesario culminar con la segunda fase del ensayo estipulada en las normas ASTM C289 [60] y NTC 175 [61]. Al comparar estos resultados con los obtenidos en la descripción de secciones delgadas se observan minerales como hornblenda, plagioclasa, cuarzo, ortoclasa, microclina, moscovita, biotita, clinozoisita y titanita los cuales se encuentran en el grupo de los silicatos, que indica un alto porcentaje de sílice. La presencia de feldespato alcalino (ortoclasa y albita) y de cuarzo microcristalino en porcentajes considerables en las muestras, además de evidenciarse deformación en los mismos, aportan la cantidad de sílice que podría reaccionar con los álcalis del cemento. Teniendo en cuenta lo anterior se pueden indicar que son potencialmente reactivas, aunque la sílice reactiva esta aparentemente ausente en los agregados ensayados. Por lo tanto, los porcentajes de minerales constituyentes presentes en estas rocas (anfíbolita y pegmatita) aseguran que estas pueden utilizarse como agregados con el Cemento Portland tipo I y cemento de alto contenido alcalino. Sin embargo, debe considerarse el papel que podrían jugar fases minerales tales como moscovita y biotita, que pueden promover el desarrollo de reacciones álcali-silicato. Broekmans [15] presenta una síntesis que ayuda a la comprensión del conocimiento de las fases minerales potencialmente reactivas y de la liberación de álcalis, sílice o alúmina a partir de los minerales en condiciones alcalinas. Las normas ASTM C1778 [71] y INTE C278 [72] suministran recomendaciones para identificar el potencial para reacciones álcali-agregado perjudicial y seleccionar medidas preventivas apropiadas para minimizar el impacto.

Según Fernandes *et al.* [22], la manera más confiable de identificar el potencial de ASR es el estudio petrográfico de las fracciones gruesas y finas de un agregado al mismo tiempo. No obstante, la identificación correcta del tipo litológico de agregado con potencial de ASR es importante en la prevención de este problema en el concreto. El potencial de ASR de los agregados es un parámetro crítico en cuanto a la durabilidad del concreto, ya que la expansión y el posible agrietamiento provocado por esta reacción, repercute en el debilitamiento estructural y acorta la vida útil de las estructuras a base de concreto. El análisis petrográfico revela que los agregados pétreos evaluados corresponden a anfíbolita y pegmatita. Es bien conocido que el potencial de reacción álcali-sílice de las rocas ígneas volcánicas es principalmente atribuible a la disolución no deseada de la matriz vítrea, lo cual no podría aplicarse a las rocas ígneas plutónicas. No obstante, estudios previos revelan que algunos agregados de granito presentan ASR [16,17,23]. En nuestro caso, debería considerarse esto último con relación a la pegmatita de grano muy grueso evaluada en el presente estudio, la cual podría mostrar un comportamiento diferente durante el desempeño y la durabilidad del concreto. Algunos de los aspectos que podrían influir aquí serían el hecho de que la pegmatita presente o no orientación preferencial. El potencial de ASR en las rocas metamórficas ha sido investigado extensamente [13,14,19–21]. En el caso particular de la anfíbolita evaluada, el tamaño de grano fino a medio del cuarzo influye en el área superficial para el ataque alcalino [22], mientras que la deformación de este mineral puede introducir tensión en la red cristalina [73]. Esta roca está compuesta esencialmente por hornblenda y plagioclasa, exhibe una microestructura bandeada (fábrica plano-lineal) y anisotropía estructural (lineación). Presenta una textura nematoblástica, definida por la orientación paralela de hornblenda según su hábito elongado en una dirección. El cuarzo presenta tamaño de grano fino y comúnmente exhibe extinción ondulosa, y contactos

curvados con la plagioclasa a rectos con la hornblenda. Sin embargo, no todo el cuarzo con extinción ondulosa es indicativo de un comportamiento perjudicial [74]. Es evidente que no hay presencia de sílice pobremente cristalina o amorfa. No obstante, el factor clave para determinar el potencial de ASR parece ser la presencia de cuarzo microcristalino [12,16,24] y/o la presencia de microfrazas [18]. La presencia de agregados finos de filosilicatos (sericita y clorita a partir de plagioclasa y biotita y/o hornblenda) favorecería una reacción álcali-silicato y por lo tanto no debe desconocerse [23]. En los agregados de anfibolita y pegmatita evaluados, la presencia de fases minerales como cuarzo, feldespatos y minerales ferromagnesianos que tienen en su composición sílice, difícilmente podrían reaccionar con el cemento. Excepto la presencia de pequeñas cantidades de sericita y clorita (productos de alteración hidrotermal de minerales primarios), las cuales pueden ser perjudiciales, los demás minerales presentes en estas rocas son considerados como inofensivos. La presencia de fases minerales ricas en Ca, tales como la zoisita difícilmente podría promover el desarrollo de alguna reacción álcali-silicato. Por otra parte, la principal fuente de minerales nocivos debería asociarse a la presencia de microfrazas, las cuales han sido rellenas por cuarzo (de grano fino), lo cual significa que contiene algunos planos de debilidad a través de los cuales se podrían fragmentar las rocas favoreciendo la alteración mineral con la formación de minerales potencialmente reactivos como los arriba señalados. Estos agregados no son reactivos a la presencia de álcalis debido a la escasez de minerales constituyentes nocivos presentes en estas rocas, lo cual queda evidenciado en el análisis petrográfico y en los ensayos de desempeño y durabilidad realizados, y, por lo tanto, estos pueden ser utilizados en la preparación de concreto. Por lo tanto, considerando que las tres cuartas partes del volumen de concreto son ocupados por los agregados de roca, su calidad es de gran importancia como quiera que los agregados pétreos deben estar constituidos por fases minerales estables, resistentes y durables, que a su vez desarrollen buena adherencia con el cemento. La presencia de minerales de alteración en los agregados analizados, así como otras impurezas han influenciado negativamente en la resistencia mecánica del concreto. Se destaca aquí el hecho de que estos agregados no pueden considerarse como elementos inertes dentro del concreto como quiera que estos intervienen directamente dentro de las reacciones químicas y físicas que ocurren en el concreto e influyen en sus propiedades del concreto tanto en resistencia mecánica como en desempeño y durabilidad.

## 6. CONCLUSIONES

El análisis petrográfico reveló que efectivamente los agregados pétreos actualmente en explotación por parte de la empresa Tritupisvar Ltda corresponden litológicamente a anfibolita y pegmatita. La presencia de fases minerales como cuarzo, feldespatos y minerales ferromagnesianos que tienen en su composición sílice, difícilmente podrían reaccionar con el cemento. La principal fuente de minerales nocivos debería asociarse a la presencia de microfrazas, las cuales favorecen la alteración mineral con la formación de minerales potencialmente reactivos. Los ensayos de desempeño y durabilidad de los agregados pétreos evaluados revelan que estos pueden ser utilizados en la preparación de concreto no estructural debido a que los resultados de la resistencia a la compresión mostraron valores inferiores a 21 MPa. Por otra parte, estos agregados pétreos no son reactivos en presencia de álcalis debido a la escasez de minerales constituyentes nocivos presentes en estas rocas, y, por lo tanto, estos pueden ser utilizados en la preparación de concreto. No obstante, es evidente que el número de muestras analizadas (1 por cada tipo de agregado) reduce el significado estadístico de los resultados, ya que un mayor número de muestras de agregados analizados es fundamental como parte de futuros estudios.

Es indudable que el tipo de agregados y su composición mineralógica ejercen un control significativo sobre el concreto. Previo a un estudio forense del concreto es quizás más importante llevar a cabo la caracterización de agregados pétreos con el fin de establecer que tan apropiados son para la preparación de mezclas de concreto, algo que comúnmente no es un trabajo de rutina por parte de los profesionales de la construcción o de quienes financian el desarrollo de proyectos de ingeniería. De esta manera, el presente trabajo resalta la importancia que tienen los resultados obtenidos particularmente con relación a la caracterización de agregados pétreos en el control de calidad de materias primas para la preparación de concreto a fin de llamar la atención del sector de la construcción para que intensifique sus esfuerzos a fin de garantizar que los agregados pétreos cuenten con las cualidades y propiedades apropiadas para su uso en proyectos de construcción. La caracterización de los agregados pétreos objeto del presente estudio también es importante como quiera que permite establecer sus propiedades, probable comportamiento futuro, potencial de reactividad de las fases minerales y microfracturamiento. Por otra parte, es necesario obtener un concreto no solo con excelentes propiedades mecánicas sino también que tenga además un buen desempeño y durabilidad ante condiciones extremas.

## 7. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación forma parte de la tesis de pregrado de A. González y E. Villa. Los autores agradecen a la Universidad Industrial de Santander para el uso de sus facilidades de investigación, a la empresa Tritupisvar Ltda por proporcionar las facilidades para el trabajo de campo en la cantera de explotación de agregados, a los técnicos Luis Garrido del Laboratorio de Preparación de Materiales Geológicos de la Escuela de Geología y Jairo Hernández del Laboratorio de Caracterización de Materiales de Construcción de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander por su ayuda durante el trabajo en laboratorio. Los autores también agradecen a los evaluadores anónimos por la lectura crítica del manuscrito y estamos más que agradecidos con las personas e instituciones nombradas anteriormente por su colaboración.

## 8. REFERENCIAS

- [1] Parekh, D.N., Modhera, C.D. “Characterization of recycled aggregate concrete”, *International Journal of Advanced Engineering Technology*, vol. 2, no. 4, pp. 321-330, 2011.
- [2] Van Damme, H. “Concrete material science: Past, present, and future innovations”, *Cement and Concrete Research*, vol. 112, pp. 5-24, 2018.
- [3] Teye-Buertey, J.I, Wilberforce-Offei, S., Adjei-Kumi, T., Atsrim, F. “Effect of aggregates mineralogy on the strength of concrete: Case study of three selected quarry products in Ghana”, *Journal of Civil Engineering and Construction Technology*, vol. 9(1), pp. 1-10, 2018.
- [4] Ngo, H.-T., Kaci, A., Kadri, E.-H., Ngo, T.T., Trudel, A., Lecrux, S. “Energy consumption reduction in concrete mixing process by optimizing mixing time”, *Energy Procedia*, vol. 139, pp. 810–816, 2017.
- [5] Piasta, W., Góra, J., Turkiewicz, T. “Properties and durability of coarse igneous rock aggregates and concretes”, *Construction and Building Materials*, vol. 126, pp. 119-129, 2016.
- [6] Leroy, M.N.L., Molay, T.G.G., Joseph, N., Colince, F.M., Bienvenu, N.J.M. “A Comparative Study of Concrete Strength Using Metamorphic, Igneous, and Sedimentary Rocks (Crushed Gneiss, Crushed Basalt, Alluvial Sand) as Fine Aggregate”, *Journal of Architectural Engineering Technology*, vol. 6(1), pp. 1-6, 2017.
- [7] Özbek, A., Gül, M., Karacan, E., Alca, Ö. “Anisotropy effect on strengths of metamorphic rocks”, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 10, pp. 164-175, 2018.

- [8] Mukhopadhyay, A.K., Neekhra, S., Zollinger, D.G. *Preliminary characterization of aggregate coefficient of thermal expansion and gradation for paving concrete*. Report No.FHWA/TX-05/0-1700-5, 109p, 2007.
- [9] Liu, H., Kou, S., Lindqvist, P.A., *et al.*, *Microscope Rock Texture Characterization and Simulation of Rock Aggregate Properties*. Geological Survey of Sweden (SGU) Project 60-1362, 48p, 2005.
- [10] Muñoz, F., Mendoza, C.J. “La durabilidad en las estructuras de concreto reforzado desde la perspectiva de la norma española para estructuras de concreto”, *Concreto y Cemento: Investigación y Desarrollo*, vol. 4, no. 1, pp. 63-86, 2012.
- [11] Hudson, B. “Modification to the Fine Aggregate Angularity Test”. In: 7th Annual International Center for Aggregates Research Symposium, Austin, USA, 19-21 April, 1999.
- [12] Grattan-Bellew, P.E. “Microcrystalline quartz, undulatory extinction and the alkali-silica reaction”. In: 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (ICAAR), London, England, 27-31 July, 1992.
- [13] Wigum, B.J. Examination of microstructural features of Norwegian cataclastic rocks and their use for predicting alkali-reactivity in concrete. *Engineering Geology*, vol. 40, pp. 195-214, 1995.
- [14] Broekmans, M.A.T.M. *The alkali-silica reaction: mineralogical and geochemical aspects of some Dutch concretes and Norwegian mylonites*. PhD Thesis, University of Utrecht, 2002.
- [15] Broekmans, M.A.T.M. *Deleterious Reactions of Aggregate With Alkalis in Concrete*. In: Broekmans, M.A.T.M. y Pollmann, H. (Eds.), *Applied Mineralogy of Cement & Concrete, Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, vol. 74, pp. 279-364, 2012.
- [16] Ng, T.F., Yeap, E.B. “Potential alkali-silica reaction in aggregate of deformed granite”, *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*, vol. 53, pp. 81-88, 2007.
- [17] Ng, T.F. “Microstructural characteristics of some alkali-aggregate reactive granites of Peninsular Malaysia”. In: National Geoscience Conference, Selangor, Malaysia, 11-12 June, 2010.
- [18] Velasco-Torres, A., Aejos, P., Soriano, J. “Comparative study of the alkali-silica reaction (ASR) in granitic aggregates”, *Estudios Geológicos*, vol. 66, no. 1, pp. 105-114, 2010.
- [19] Locati, F., Baldo, E., Marfil, S., *et al.*, “Metamorphic rocks from Córdoba (Argentina) and the alkali-silica reaction”. In: 11th International Association of Engineering Geology Congress, Auckland, New Zeland, 5-10 September, 2010.
- [20] Locati, F., Marfil, S., Baldo, E. “Effect of ductile deformation of quartz-bearing rocks on the alkali-silica reaction”, *Engineering Geology*, vol. 116, no. 1-2, pp. 117-128, 2010.
- [21] Hongn, F., Mon, R., Petrinovic, I.A., *et al.*, Effect of ductile deformation of quartz-bearing rocks on the alkali-silica reaction”, *Engineering Geology*, vol. 116, no. 1-2, pp. 117-128, 2010.
- [22] Fernandes, I., Broekmans, M.A.T.M., Nixon, P., *et al.*, “Alkali-silica reactivity of some common rock types – A Global Petrographic Atlas”, *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, vol. 46, pp. 215–220, 2013.
- [23] Ng, T.F., Raj, J.K., Ghani, A.A. “Potential Alkali-Reactivity of Granite Aggregates in the Bukit Lagong Area, Selangor, Peninsular Malaysia”, *Sains Malaysiana*, vol. 42, no. 6, pp. 773–781, 2013.
- [24] Gomes, D.D., Conceição, H., Carvalho, V.A., *et al.*, “Influence of granitic aggregates from northeast Brazil on the alkali-aggregate reaction”, *Materials Research*, vol. 17, no. 1, pp. 51-58, 2014.
- [25] Fernandes, I., Broekmans, M.A.T.M., Noronha, F. “Petrography and geochemical analysis for the forensic assessment of concrete damage”. In: Ritz, K, Dawson, L, Miller, D. (Eds.): *Criminal and Environmental Soil Forensics*. Springer Verlag, Heidelberg, pp. 163-180, 2008.
- [26] Palbol, L. *Optimización de los agregados para concreto*. Construcción y Tecnología, México, 9 (100), 1996.

- [27] Quiroga, P.N., Fowler, D.W. *The effects of aggregates characteristics on the performance of Portland cement concrete. Research Report ICAR – 104-1F*, The University of Texas at Austin, Austin, 2003.
- [28] Tschanz, C.M., Jimeno, A., Cruz, B. *Geology of the Sierra Nevada de Santa Marta (Colombia) - Informe 1829*, INGEOMINAS, Bogotá, 1969.
- [29] Tschanz, C.M., Marvin, R.F., Cruz, B.J., *et al.*, “Geologic Evolution of the Sierra Nevada de Santa Marta, Northeastern Colombia”, *Geological Society of America Bulletin*, vol. 85, no. 2, pp. 273-284, 1974.
- [30] Figueroa, N.P., Mendoza, S.P., Ríos, C.A., *et al.*, “Characterization and testing of rock aggregates of the Santa Marta Batholith, (Colombia)”, *Revista ION*, vol. 27, no. 2, pp. 87-104, 2014.
- [31] Google Earth, [Online], Available: <http://earth.google.com>, [Accessed: 26-Jul-2018].
- [32] Kodolányi, J., Pettke, T., Spandler, C., *et al.*, “Geochemistry of ocean floor and fore-arc serpentinites: constraints on the ultramafic input to subduction zones”, *Journal of Petrology*, vol. 53, no. 2, pp. 235-270, 2012.
- [33] Deschamps, F., Godarda, M., Guillot, S., *et al.*, “Geochemistry of subduction zone serpentinites: A review”, *Lithos*, vol. 178, pp. 96-127, 2013.
- [34] Brydie, J.R. *Geology and geochemistry of magnesite occurrences, Akamas Area, Northwest Cyprus*, Master thesis, Memorial University of Newfoundland, 1995.
- [35] ASTM D75/D75M. *Standard Practice for Sampling Aggregates*. American Society for Testing Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, PA 19428, USA, 2009.
- [36] NTC 129. *Método para la toma de muestras de agregados*. Instituto Colombiano de Normas Técnicas – ICONTEC, Colombia, 2019.
- [37] Gaitan, S. *Análisis mineralógico y examen petrográfico de agregado fino para concreto de tres bancos de la región central del país*. Tesis de pregrado, Universidad de San Carlos de Guatemala, 1996.
- [38] ASTM C295/C295M. *Standard Guide for Petrographic Examination of Aggregates for Concrete*. American Society for Testing Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, PA 19428, USA, 2012.
- [39] NTC 3773. *Guía para la inspección petrográfica de agregados para concreto*. Instituto Colombiano de Normas Técnicas – ICONTEC, Colombia, 1995.
- [40] ASTM C136/C136M. *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. American Society for Testing Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, PA 19428, USA, 2014.
- [41] NTC 77. *Método de ensayo para el análisis de los agregados finos y gruesos* Instituto Colombiano de Normas Técnicas – ICONTEC, Colombia, 1998.
- [42] ASTM C566. *Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying*. American Society for Testing Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, PA 19428, USA, 2013.
- [43] NTC 1776. *Método de ensayo para determinar por secado el contenido total de humedad de los agregados*. Instituto Colombiano de Normas Técnicas – ICONTEC, Colombia, 1994.
- [44] ASTM C535. *Standard Test Method for Resistance to Degradation of Large Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine*. American Society for Testing Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, PA 19428, USA, 2012.
- [45] NTC 93. *Método de ensayo para determinar la resistencia al desgaste por abrasión e impacto de agregados gruesos mayores a 19 mm, utilizando la máquina de Los Angeles*. Instituto Colombiano de Normas Técnicas – ICONTEC, Colombia, 2013.

- [46] ASTM C29/C29M. *Standard Test Method for Bulk Density (Unit Weight) and Voids in Aggregate*. American Society for Testing Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, PA 19428, USA, 2009.
- [47] NTC 92. *Método de ensayo para determinar la densidad volumétrica (masa unitaria) y vacíos en agregados*. Instituto Colombiano de Normas Técnicas – ICONTEC, Colombia, 2019.
- [48] ASTM C127. *Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate*. American Society for Testing Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, PA 19428, USA, 2012.
- [49] NTC 176. *Método de ensayo para determinar la densidad y la absorción del agregado grueso*. Instituto Colombiano de Normas Técnicas – ICONTEC, Colombia, 1995.
- [50] ASTM C786/C786M. *Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement and Raw Materials by the 300- $\mu$ m (No. 50), 150- $\mu$ m (No. 100), and 75- $\mu$ m (No. 200) Sieves by Wet Methods*. American Society for Testing Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, PA 19428, USA, 2017.
- [51] NTC 226. *Método de ensayo para determinar la finura del cemento hidráulico por medio de los tamices 75  $\mu$ m (M200) y 150  $\mu$ m (M100)*. Instituto Colombiano de Normas Técnicas – ICONTEC, Colombia, 1998.
- [52] ASTM C128. *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*. American Society for Testing Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, PA 19428, USA, 2015.
- [53] INV E-222. *Gravedad específica y absorción de agregados finos*. Instituto Nacional de Vías - INVIAS, Colombia, 2007.
- [54] ASTM C40/C40M. *Standard Test Method for Organic Impurities in Fine Aggregates for Concrete*. American Society for Testing Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, PA 19428, USA, 2011.
- [55] NTC 127. *Método de ensayo para determinar las impurezas orgánicas en agregado fino para concreto*. Instituto Colombiano de Normas Técnicas – ICONTEC, Colombia, 2000.
- [56] ASTM C39/C39M. *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. American Society for Testing Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, PA 19428, USA, 2012.
- [57] NTC 673. *Método de ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto*. Instituto Colombiano de Normas Técnicas – ICONTEC, Colombia, 2010.
- [58] ASTM C88. *Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate*. American Society for Testing Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, PA 19428, USA, 2005.
- [59] NTC 126. *Método de ensayo para determinar la solidez (salinidad) de agregados mediante el uso de sulfato de sodio o sulfato de magnesio*. Instituto Colombiano de Normas Técnicas – ICONTEC, Colombia, 2016.
- [60] ASTM C289. *Standard Test Method for Potential Alkali Silica Reactivity of Aggregates (Chemical Method)*. American Society for Testing Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, PA 19428, USA, 2007.
- [61] NTC 175. *Método químico para determinar la reactividad potencial álcali-silice de los agregados*. Instituto Colombiano de Normas Técnicas – ICONTEC, Colombia, 1996.
- [62] González, A., Villa, E.A. *Caracterización de agregados pétreos de la cantera Tritupisvar para su uso en la elaboración de concreto, Santa Marta, Colombia*, Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander, 2012.
- [63] Kretz, R. “Symbols for rock-forming minerals”, *American Mineralogist*, vol. 68, pp. 277-279, 1983.

- [64] Ferreira, D.A., Torres, K.M. *Caracterización física de agregados pétreos para concretos: Caso Vista Hermosa (Mosquera) y Mina Cemex (Apulo)*. Tesis de pregrado, Universidad Católica de Colombia, 2014.
- [65] Kazi, A., Al-Mansour, Z.R. “Influence of geological factors on abrasion and soundness characteristics of aggregates”, *Engineering Geology*, vol. 15, no. 3-4, pp. 195-203, 1980.
- [66] Torgal, F.P., Castro-Gomes, J.P. “Influence of physical and geometrical properties of granite and limestone aggregate on the durability of a C20/25 strength class concrete”, *Construction and Building Materials*, vol. 20, no. 10, pp. 1079-1088, 2006.
- [67] Figueroa, N.P., Mendoza, S.P. *Estudio Petrográfico y Mineralógico de granitoides y rocas afines utilizados como agregados pétreos en la cantera de explotación “Manuel Pertuz” del Municipio de Santa Marta (MAGDALENA)*, Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander, 2012.
- [68] Ichikawa, T., Miura, M. “Modified model of alkali-silica reaction”, *Cement and Concrete Research*, vol. 37, no. 9, pp. 1291-1297, 2007.
- [69] Tamrakar, N.K., Paudel, L.P. “Petrographic examination of ledge rocks aided by microscopic and X-ray diffraction analyses for alkali-silica reactivity”, *Bulletin of the Department of Geology*, vol. 14, pp. 21-28, 2011.
- [70] Monnin, Y., Dégrugilliers, P., Bultee, D., *et al.*, “Petrography study of two siliceous limestones submitted to alkali-silica reaction”, *Cement and Concrete Research*, vol. 36, no. 8, pp. 1460-1466, 2006.
- [71] ASTM C1778. *Standard Guide for Reducing the Risk of Deleterious Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*. American Society for Testing Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, PA 19428, USA, 2014.
- [72] INTE C278. *Guía para reducir el riesgo de la reacción perjudicial álcali-agregado en el concreto*. Instituto Nacional de Tecnologías de la Comunicación – INTECO, Colombia, 2017.
- [73] Broekmans, M.A.T.M. “Structural properties of quartz and their potential role for ASR”, *Materials Characterization*, vol. 53, pp. 129-140, 2004.
- [74] West, G. “A note on undulatory extinction of quartz in granite”, *Engineering Geology*, vol. 24, pp. 159-165, 1991.